

République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi-BBA
Faculté des sciences et de la technologie
Département génie civil

جامعة محمد البشير الإبراهيمي « برج بوعريريج »
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية



Mémoire de fin d'étude

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLOME DE : MASTER

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux

Thème :

**Influence des fibres et des granulats sur les
performances mécaniques et la durabilité du BTC**

Présenté par :

Houssam eddine BENDJEBELE

Hassan MAZITE

Encadreur :

Dr. AMRIOU Abderrachid

Co-encadreur :

Dr. MESSAOUDENE Ibrahim

Soutenu le:.....

Année universitaire : 2019/2020.

DEDICACES

ON DEDIE CE MODESTE TRAVAIL A NOS
PARENTS, A TOUS LES MEMBRES DE NOS
FAMILLES ET A TOUS NOSAMIS.

REMERCIEMENTS

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

Nous tenons à remercier par cette occasion, notre encadreur, Dr AMRIOU Abderrachid et Co-encadreur, Dr MESSAOUDENE Ibrahim pour leurs conseils qui ont permis de mener à bien le mémoire. Comme nous remercions nos parents, nos camarades, nos amis et tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce modeste travail.

Table des matières

Dédicace	
Remerciement	
Liste des figures	
Liste de tableau	
Résumé	
Introduction générale	

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée (BTS et comprimée)

Introduction.....	05
I.2 la terre crue	05
I.2.1La dobe.....	06
I.2.1.1. Définition.....	06
I.2.1.2 La production.....	07
I.2.1.3. Modes de production de l'adobe.....	07
I.2.1.4. Les produits.....	08
1.2.1.5. Les avantage d'adobe.....	08
1.2.2. Les pisés :	08
1.2.2.1. Définition.....	08
1.2.2.2 Technique de production.....	10
1.2.2.3 Les produits : différents types de pisé.....	10

1.2.2.4 Les Avantages de pisé.....	10
1.3 Blocs de terre comprimée (BTC)	13
1.4 La terre comme matériau de construction.....	15
1.4.1 Généralités sur les argiles et les minéraux argileux.....	15
1.4.2 Les argiles.....	15
1.5 Stabilisation.....	17
1.5.1 Définition.....	17
1.5.2 Objectifs.....	18
1.5.3 Procédés.....	18
1.5.3.1 Stabilisation mécanique	18
1.5.3.2 Stabilisation physique	18
1.5.3.3 Stabilisation chimique	18
1.5.4 Moyens de stabilisation.....	18
1.6 Les propriétés du matériau terre en construction.....	19
1.6.1 Texture.....	19
1.6.2 Plasticité.....	20
1.6.3 Matière organique.....	20
1.6.4 Sulfates.....	21
1.7. DEFINITION DE BETON DE FIBRES.....	21
1.7.1 : DIFFERENTES NATURE DES FIBRES.....	21
1.7.1.1: Fibres minérales.....	22
1.7.1.2. Fibres végétales.....	22
1.7.1.3. Fibres synthétiques.....	22
1.7.1.4. Fibres artificielles.....	22
1.7.1.4.1. Fibres de polypropylène.....	22
1.7.1.4.2. Fibres de verre.....	23
1.7.2. Fibres métalliques.....	23
1.7.2 .DIFFERENTS TYPES DES FIBRES METALLIQUES.....	24

1.7 Conclusions.....	25
----------------------	----

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé :

Introduction.....	29
2-1. Pâte de ciment.....	29
2.2 Ciment.....	30
2.2.1 Classification des ciments.....	30
2.2.1.1 Classification suivant la composition.....	30
2.2.1.2. Classification des ciments suivant les résistances à la compression.....	30
2.2.1.3 Classification des ciments suivant le type d'environnement.....	31
2.3: Propriétés du ciment.....	31
2.4: Eau de gâchage.....	32
a. Caractéristiques physiques.....	32
b. Caractéristiques chimiques.....	32
2.5: Les adjuvants.....	32
2.5.1 : Définition.....	33
2.5.2: Les différents cas d'application possibles.....	33
2.6 : Stabilisation au ciment.....	33
2.6.1 : Généralités.....	33
2.6.2 : Mécanisme de stabilisation.....	34
2.6.3 : Efficacité et dosage.....	35
2.6.4 : Effets sur les propriétés du matériau stabilisé.....	37
a. Effet sur la densité.....	37
b. Effet sur la résistance mécanique.....	37
C. Effet sur la résistance mécanique.....	37
d. Effet sur l'absorption totale.....	40
2.7 : Stabilisation à la chaux.....	40
2.7.1 : Généralités.....	40
2.7.2 : Mécanismes.....	41
a. L'échange cationique.....	42
b. La floculation et l'agglomération de l'argile.....	43
C. La carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques.....	43

2.7.3 : Efficacité et dosage.....	44
2.7.4 : Effet sur la résistance mécanique du matériau stabilisé.....	44
2.8 : Stabilisation mixte chaux-ciment.....	47
2.9: Chaux éteinte.....	47
2.9.1 Résistance à la compression sèche et humide.....	49
2.9.1.1: a résultats.....	49
2.9.1.2: b Analyse et Interprétation	51
2.10: Comportement mécanique à l'état sec.....	52
2.10.1: Résistance à la compression à l'état sec.....	52
2.11- Conclusion.....	54

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité
du BTS et comprimé :

Introduction.....	57
3.2 Les différents constituants du sable.....	57
3.3. Classifications des sables.....	57
3.3.1 : La granularité.....	58
3.3.2 : La propreté et la teneur en fines.....	58
3.3.3 : La nature minéralogique.....	58
3.3.4 : Leurs provenances.....	58
3.4 : Les ressources des sables en Algérie.....	59
3.4.1 : Les sables rous siliceux.....	59
3.4.2:Les sable de concassage et calcaires.....	59
3.4.3 : Le sable de dune.....	59
3.5: Utilisation de sable locale dans le béton en Algérie.....	60
3.6: Influence de la granularité du sol	60
3.7: Influence de l'ajout de sable sur l'optimum Proctor des FAC07.....	61
3.8: Densification par gradation.....	61
3.9 : Résistance mécanique à la compression.....	63
3.10 : coefficient de ramollissement.....	65
3.11 : Durabilité (mouillage-séchage)	67
3.12: Porosité volumique.....	69

3.13: Absorption totale.....	69
3.14: Résistance en compression des BTC à base de FAC07 + sable.....	70
3.15 : Résistance à l'abrasion des BTC à base de FAC07 + sable.....	72
3.16: Absorption d'eau par capillarité des cylindres de FAC07+ sable.....	73
3.17 : Comparaison des résultats.....	74
3.17: Conclusions.....	74

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

4.1 Historique et perspective de l'utilisation des fibres.....	77
4.2 Introduction.....	77
4.3 Les fibres.....	77
4.4.1Types des fibres utilisées dans le domaine de la construction.....	77
4.4.2 Différents types de fibres.....	78
4.5 : Les fibres végétales.....	78
4.5.1 : Classification des fibres végétales.....	78
4.5.1.2Fibre de sisal.....	79
4.5.1.1Fibre de coco.....	80
4.5.1.3 Fibre de palmier.....	80
4.5.1.4Fibre de jute.....	81
4.5.1.5La paille.....	81
4.5.2Propriétés des composites à matrice cimentaire renforcés par des fibres végétales.....	82
4.6. Les fibres animales.....	83
4.7. Les fibres de caoutchouc.....	83
4.7.1 Le caoutchouc.....	84
4.7.2 Poudrette de caoutchouc.....	85
4.7.3 Les caractéristiques des granulats de caoutchouc.....	85
4.8. Fibres artificielles.....	86
4.8.1 Les fibres de verre.....	86
4.9. L'effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des sols.....	86
4.10. Les fibres brutes de palmier dattier.....	87

4.11 : D’après (LAYEB Abdelouhab et HALBAOUI Ahmed) Résistance	
à la compression R C28 de BTS.....	88
4.12 : L’effet de la variation de la teneur des fibres (caoutchouc - verre)	
sur la résistance à la compression à 28j de BTS.....	89
4.12.1 : Résistance à la traction de BTS à 28 jours.....	90
4.13 D’après (TAALLAH Bachir)Effet de la teneur en fibres	
de palmier dattier sur les propriétés du BTC.....	91
4.13.1 :La résistance à la compression sèche.....	91
4.13.1.1 Les BTC à base de ciment.....	91
4.14 : La résistance à la traction sèche.....	93
4.14.1Les BTC à base de ciment.....	93
4.15 : Effet de la contrainte de compactage sur les propriétés du BCPD.....	95
4.15.1 :La résistance à la compression sèche.....	95
4.15.2 : La résistance à la compression humide.....	95
4.16 : La résistance à la traction sèche.....	97
4.17 : La résistance à la traction sèche.....	98
4.17.1: La résistance à la compression des bétons étudiés.....	98
4.17.1.1: Résistance à la compression des éprouvettes conservées à 60% d’HR.....	98
4.17.1.2 : Résistance à la compression des éprouvettes conservées à90% d’HR.....	100
4.18 : Comparaison des deux conditions de cure des éprouvettes.....	102
4.19 : Comparaison des résultats.....	104
4.19.1 : La résistance à la compression.....	104
4.19.2 : Comparaison des résultats Résistance à la traction.....	104
4.19.3 : La contrainte de compactage sur les propriétés du BCPD.....	104
4.19.3.1 :La résistance à la compression sèche.....	104
4.19.4.2La résistance à la compression humide.....	105
4.20 : Conclusion.....	105

Liste des figures

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée (BTS et comprimée)

Figure 1.1.Des Moulage et séchage blocs adobes.....	06
Figure 1.2.Moule de l'adobe.....	07
Figure 1.3.Construction un mur en pisé.....	09
Figure 1.4.Composition de pisé.....	09
Figure 1.5.Bloc de terre crue compressée réalisée à l'aide d'une presse manuelle	11
Figure I.6.Diversités des produits de blocs de terre comprimée.....	12
Figure. 1.7 : Différents produits de blocs de terre comprimée (Architectures des terre cure /Sophie BRONCHATEB 2013).....	13
Figure 1.8. Constructions réalisées en blocs de terre comprimée.....	14
Figure I-9 : Construction en BTC (Sources Internet)	14
Figure 1.10 : Couches tétraédrique et octaédrique	16
Figure 1.11 : Agencement des couches octaédriques et tétraédriques [17].....	17
Figure 1.12 : Fuseaux granulaires adoptés pour différentes techniques de construction en terre [18].....	20
Figure 1.13. Les zones des limites d'ATTERBERG de la construction en terre.....	20

CHAPITRE 2 : Influences du pourcentage du ciment sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé :

Figure 2.1 : pâte de ciment	30
Figure : 2.2: Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la compression du bloc de terre comprimée stabilisée au ciment (Walker,1997).....	31
Figure : 2.3 : Effet de la teneur en ciment et la contrainte de compactage sur la densité sèche du bloc de terre comprimée (KERALI,2001).....	37
Figure : 2.4 : Effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression	

et à la traction par fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment (Bahar, 2004).....	38
Figure. 2.5: Variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en ciment pour 3 types de sols en zone aride australienne (AKPOKODJE 1985).....	39
Figure. 2.6 : Variation de la résistance à la compression humide et la résistance à la traction des blocs de terre en fonction de la teneur en ciment (VENKATRAMA20.....	39
Figure. 2.7 : Variation du taux d'absorption d'eau dans le temps du bloc de terre comprimée (MEUKAM, 2004). stabilisée avec différents teneurs en ciment	
Figure. 2.8 : Variation des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage de la chaux par poids (KEZIDI 1979).....	41
Figure. 2.9 : Déplacement de la courbe Proctor suite à une stabilisation à la chaux (Moore, 1987).....	43
Figure. 2.10 : Variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux pour 3 types de sols en zone aride australienne (AKPOKODJE,1985)	
Figure.2 .11: Evolution de la résistance a la compression des briques d'adobe en fonction de l teneur en chaux (Millogo ,2008).....	46
Figure. 2.12: La variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et l'âge (Ausroads1998).....	46
Figure : 2.13 : Fabrication de la chaux éteinte.....	48
Figure : 2.14 : Fabrication de la chaux éteinte variation de la résistance à la compression séchedes sol par ajout des liant et selon la densité de fabrication.....	53

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité

du BTS et comprimé :

Figure 3.1 : Situation géographique des ergs de l'Algérie [28].....	60
Figure3.2 relation de densité de l humidité.....	61
Figure : 3.3:Evolution des limites d'Atterberg avec la teneur en sable (Doat, 1979).....	63
Figure : 3.4 : Influence de la teneur en sable sur les résistances mécaniques en compression du béton de terre stabilisée, avec 5% de ciment et une contrainte	

de compactage de 10 MPa (Guettala, 2003).....	63
Figure :3.5 : Evolution de la résistance à compression à l'état sec	
à l'état humide en fonction de la teneur en sable 1.....	64
Figure : 3.6 : Evolution de la résistance à compression à l'état sec	
à l'état humide en fonction de la teneur en sable 2.....	65
Figure 3.7 Coefficient de ramollissement en fonction de la teneur en sable.....	66
Figure : 3.8 : Absorption totale en fonction de la teneur en sable.....	66
Figure : 3.9 : Absorption capillaire en fonction de la teneur en sable.....	67
Figure : 3.10 : Pertes en poids en fonction de la teneur en sable stabilisé.....	68
Figure 3.11 : Evolution de la résistance à la compression moyenne à l'état sec	
en fonction du taux de sable et de la contrainte de compactage.....	69
Figure : 3.12 : Effet du sable et de la contrainte de compactage sur l'absorption d'eau	
Que l'absorption totale diminue avec l'augmentation du dosage du sable	
jusqu'à 60%, par contre, elle augmente pour un taux supérieur (80%).....	70
Figure : 3.13 : Résistance en compression des BTC à base de FAC07 et sable	
SS1006.....	71
Figure : 3.14 : Briques à base de FAC07 et sable après le test d'abrasion.....	72
Figure : 3.15: Coefficient d'abrasion des BTC à base de FAC07 et sable	
SS1006.....	73
Figure :3.16 : Cylindres à base de 60% de FAC07 et 40% de sable SS1006	
après le test d'absorption d'eau par capillarité.....	74

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

Figure 4.1. Les classes des fibres végétales.....	79
Figure 4.2 : Les plantes de sisal (a) et les fibres de sisal (b) (Sources	
Internet).....	79
Figure4.3 : La plante de palmier (a) et la fibre de palmier (b) (Sources	
Internet).....	80

Figure 4.4: Les plantes de jute (Sources Internet).....	81
Figure.4.5.Fibres des pneus de caoutchouc.....	83
Figure4.6.:Aspect des poudrettes de caoutchouc.....	84
Figure 4.7. Les différents diamètres des granulats des pneus usées après broyage (Technique et procédés KAHL pour le recyclage des pneus usagés).....	85
Figure. 4.8. : Les résistances à la compression maximales avec les teneurs en fibres de palmier dattier (Marandi, 2008).....	87
Figure. 4.9 : Les courbes contrainte-déformation des échantillons de sol renforcés et non renforcés par des fibres de palmier sous l'essai de compression non confiné (Marandi, 2008).....	87
Figure. 4.10. L'effet de teneur des fibres (caoutchouc – verre) sur la résistance Al compression de BTS.....	89
Figure 4.11. Effet du teneur des fibres de caoutchouc et des fibres de verre, type de liant (chaux et ciment) sur la résistance à la traction de BTS0.....	89
Figure. 4.12 : Résistance à la compression sèche du BCPD en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	93
Figure. 4.13 : Résistance à la traction sèche du BCPD en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	94
Figure. 4.14: Effet de la contrainte de compactage sur la résistance à la compression sèche du BCPD à base de 5% de ciment.....	95
Figure. 4. 15:Effet de la contrainte de compactage sur la résistance à la compression humide du BCPD.....	96
Figure. 4.16 : Effet de la contrainte de compactage sur le rapport de la résistance à la compression sèche sur la résistance humide du BCPD à base de 5% de ciment.....	97
Figure. 4. 17: Effet de la contrainte de compactage sur la résistance à la traction sèche du BCPD à base de 5% de ciment.....	98
Figure 4. 18 : Effet du sol argileux et des fibres sur la résistance a la compression a 7 jours.....	99
Figure 4. 19 : Effet du sol argileux et des fibres sur la résistance a la compression a 28jours.....	100
Figure4. 20 : Effet du sol argileux et des fibres sur la résistance a la compression a 7 jours.....	101

Figure 4. 21 : Effet du sol argileux et des fibres sur la résistance a la compression a 28jours.....	101
Figure 4.22 : Resistance a la compression des éprouvettes durcies a 60% et 90% d'HR a7 jours.....	103
Figure 4. 23 : Resistance a la compression des éprouvettes durcies a 60% et 90% d'HR a 28jours.....	103
Figure4. 24 : Resistance a la compression a 7, 28, et 180 jours.....	104

Liste des Tableaux:

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée (BTS et comprimée)

Le Tableau 1.1: résumé ces trois familles d'argiles présentées
.ainsi que leurs formules chimiques.....17

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment sur la résistance et la durabilité Du BTS et comprimé:

Tableau 2.1 : Exigences mécaniques définies en termes de valeur
caractéristiques31
Tableau 2.2: Résultat de compression sèche et humide à 45 jours.....49
Tableau 2. 3:Résultats compression sèche et humide à 70 jours.....51

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé :

Tableau 3.1 Composition des briques à base de FAC07 et sable SS1006.....71

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

Tableau 4 .1. Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres.....78
Tableaux4.2. Propriétés physiques et techniques des fibres.....84
Tableau 4.3 : Distribution granulométrique pour les trous de filière de Ø20 mm et Ø16
mm(Technique et procédés KAHL pour le recyclage des pneus usagés).....86
Tableau 4.4. Résistance à la compression à 28 jours en fonction du teneur des fibres.....88
Tableau 4.5. Résistance à la traction à 28 jours en fonction du teneur des fibres.....90

RESUME

Dans le but de réduire la consommation de l'énergie pour le chauffage et la climatisation et le coût des constructions. L'utilisation de la terre stabilisée était depuis longtemps une solution efficace pour ces préoccupations dans le domaine de la construction.

Le but de ce travail est d'étudier l'effet du pourcentage du ciment, de la teneur en granulats (sable), de la contrainte de compactage et l'introduction des fibres sur la résistance mécanique et la durabilité du béton de terre stabilisée et comprimée.

Par la présente étude, on espère présenter en premier lieu une relation entre la résistance mécanique à la compression et la durabilité des blocs du BTS et comprimée en fonction du pourcentage de sable et du ciment sur la performance des blocs du BTS et comprimée ensuite l'effet de l'adjonction de fibres et de la contrainte de compactage appliquée.

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

ملخص

يلعب التصميم البيئي للهياكل والتنمية المستدامة، دورا مهما في صناعة البناء والتشييد. تعتبر مواد البناء مثل الخرسانة الترابية، تحتوي على نسبة من المكونات البيئية المختلفة، ذات الأهمية الكبيرة اليوم الهدف من إنتاج هذه الخرسانة هو التقليل لاستهلاك الاسمنت وبالتالي التقليل من إنتاج ثاني أكسيد الكربون.

الهدف الرئيسي من دراسة هذا العمل هو دراسة تأثير الرمال والاسمنت والألياف على متانة الخرسانة الترابية المضغوطة والمثبتة (BTCS) بعد 12 دورة من التجفيف / الترطيب من وجهة نظر: المقاومة للضغط الكثافة الإستعاب الكلي والكثافة

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

ABSTRACT

With the aim of reducing energy consumption for heating and air conditioning and the cost of constructions The use of stabilized soil has long been an effective solution to these concerns in the construction field.

The aim of this work is to study the effect of the percentage of cement, the content of aggregates (sand), the compaction stress and the introduction of fibers on the mechanical strength and durability of stabilized earth concrete and compressed.

By the present study, it is hoped to first present a relationship between the mechanical resistance to compression and the durability of the BTS blocks and compressed as a function of the percentage of sand and cement on the performance of the BTS blocks and then compressed the effect of the addition of fibers and the applied compaction stress.

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

Introduction générale

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 connus auparavant, nous enregistrons aujourd'hui à un retour croissant à la construction en terre crue dans plusieurs pays y compris les pays industrialisés profitant du développement des techniques de production très variées, soutenues par des recherches scientifiques.

Une des raisons de l'importance de la terre dans la construction est sa disponibilité et sa proximité du site de réalisation de l'habitat. La mise en oeuvre doit être relativement aisée et fait appel à un outillage réduit, souvent d'origine paysanne. Pour ces raisons, la construction en terre crue concerne essentiellement le bâti rural, même s'il existe de nombreux exemples de constructions en terre crue en milieu urbain.

Parmi les avantages de la terre crue, nous pouvons aussi souligner le peu d'énergie que nécessite sa mise en oeuvre, 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.

Depuis l'antiquité à nos jours, l'homme a cherché à éviter les inconvénients du matériau terre, en utilisant plusieurs moyens de stabilisation permettant d'améliorer ses performances et sa sensibilité vis-à-vis de l'eau, ce qui a donné naissance à plusieurs produits en terre : l'adobe, le pisé, le torchis, le bloc de terre comprimée (BTC) et autres.

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

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La stabilisation des BTC par armature à l'aide de fibres, dont très souvent la paille est employée de par le monde depuis l'antiquité. Aujourd'hui, même dans les productions les plus modernes et industrielles, pour l'adobe aux U.S.A par exemple, on incorpore encore très souvent de la paille, combinée avec du bitume. Les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille sont très variées mais on connaît aussi l'emploi des fibres pour construire en torchis, en terre-paille, en bauge ainsi qu'en blocs comprimés et en pisé

(Hou ben, 2006). Pour le cas des fibres synthétiques, elles sont utilisées généralement dans le renforcement des sols pour augmenter les résistances à la compression et au cisaillement (Estabragh 2011 ; Prabakar 2002).

S'il est confirmé actuellement que la stabilisation des BTC par des liants et le bitume améliore leurs résistances mécaniques et leur insensibilité à l'eau (Hou ben 1994), la stabilisation des BTC par des fibres n'a pas eu le consensus de tous les chercheurs

En Algérie, la construction en terre est très répandue dans toute sa longue histoire, particulièrement dans les zones rurales et les régions arides. Aujourd'hui, on assiste à un regain d'intérêt pour ce matériau, qui s'explique d'abord par la volonté de réaliser une partie du programme consacrée au logement rural (environ 40%), ensuite par le souci d'adapter la législation au nouveau contexte international en matière du développement durable. Dans cet esprit, une loi sur la promotion des Energies Renouvelables a été d'ailleurs promulguée en août 2004 (Benouali, 2011).

L'Algérie compte plus de 17 millions de palmiers dont plus de 800 variétés de dattes (Benzouche, 2012). Les travaux annuels d'entretien des palmiers génèrent des quantités importantes de déchets composés essentiellement de palmes et de fibres de surface, qui peuvent être utilisés comme renfort fibreux dans les produits de terre. La paille elle aussi est caractérisée par son abondance dans les zones rurales et désertiques, et par son faible coût.

Pour une exploitation rationnelle de ces fibres dans les constructions de la région 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 plus précisément la région sud du pays, 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 bloc de terre comprimée (BTC) avec des fibres végétales, il s'agit ici principalement des fibres de palmiers dattiers, alors que la paille d'orge hachée à un intérêt secondaire dans cette thèse. Les fibres de polypropylène, comme fibres synthétiques, sont l'objet d'étude à titre de comparaison. Cette étude s'intéresse aussi à la sensibilité à l'eau du

BTC fibré, en étudiant son absorption totale et son gonflement après immersion dans l'eau.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'intérêt aussi est donné à l'étude du comportement mécanique en compression du BTC fibré.

Outre l'introduction générale, cette thèse est structurée en deux parties :

La première partie est composée d'un seul chapitre, il s'agit du chapitre 1, qui est consacré à la synthèse bibliographique, en vue de donner un aperçu général sur les techniques de construction en terre, en particulier le bloc de terre comprimée (BTC), les critères de choix des sols à stabiliser et les différents modes de stabilisation. Ce chapitre présentera aussi les travaux antérieurs réalisés sur l'effet de la présence des fibres et particulièrement les fibres végétales sur les propriétés physiques et mécaniques du bloc de terre comprimé, ainsi que sur son comportement mécanique.

La deuxième partie, composée de deux chapitres, est consacrée à l'étude expérimentale.

Le chapitre 2 fait le point sur les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques, physico-chimiques et minéralogiques des matériaux utilisés (le sol, le sable concassé, le ciment, la chaux et les fibres). Ce chapitre présente aussi les mélanges, les procédures de confection des blocs, les traitements des fibres végétales et les techniques de conservation, et finalement les essais effectués le long de l'étude expérimentale.

Les résultats et les discussions de l'étude expérimentale sont donnés dans le chapitre 3.

Ces résultats montrent l'effet de la teneur en fibres de palmier dattier (sans et avec traitement chimique), de la paille hachée et de fibres de polypropylène sur les propriétés mécaniques, sur le comportement mécanique et sur le degré d'insensibilité à l'eau du BTC. Les résultats illustrent aussi l'effet du temps et du mode de cure sur les propriétés mécaniques du BTC fibré à base de chaux.

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

Chapitre 1

**Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée
(BTS et comprimée)**

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée **(BTS et comprimée)**

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 fabriqué 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 CRA Terre (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 SHANXI, Yémen du Sud, ce sont des immeubles en bauge de dix étages ou plus. En chine, au Henan et au SHANXI, 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.

I.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. De nombreux monument inscrits au patrimoine mondial de l'humanité sont en terre crue : forteresses marocaines pyramides d'Egypte..... [2]. Aujourd'hui encore, environ 40% de l'humanité habite des constructions en terre crue. Facilement

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée **(BTS et comprimée)**

mobilisable dans les régions où pierre et bois manquent sa mise en œuvre est simple et ne nécessite pas de matériel sophistiqué. De même sa mise en œuvre, sans transport, sans cuisson, sans processus de transformation industriel lui confère une empreinte écologique et bilan CO2 exceptionnel [2]. Il existe plusieurs types de terre crue entre autres nous citons :

I.2.1 L'adobe :

I.2.1.1. Définition :

Les premiers éléments de construction préfabriqués utilisés par l'homme étaient des briques moulées en terre crue appelées « adobes », on est une technologie utilisée depuis des millénaires partout à travers le monde. L'adobe est un matériau de construction fait d'un mélange de sable, d'argile, une quantité de paille hachée ou d'autre fibre. De nature assez argileuse (jusqu'à 30% de fraction fine), mais très sableuse, ajoutée d'eau jusqu'à obtenir un état de pâte semi ferme (15 à 30% d'eau). Chaque élément du mélange joue son rôle. Le sable réduit la probabilité de microfissures dans le bloc de terre, l'argile agglutine les particules et la paille hachée, quant à lui, donne un certain grade de flexible. Ce mélange est par la suite déposé à la main dans un moule en bois de façon à fabriquer des petits éléments de maçonnerie la dimension requise pour être démoulé et séché directement au sol (photo I.1). La brique d'adobe peut varier d'une dimension de 15 X 25 X 10 cm soit 30 X 60 X 10 cm. La construction en adobe est très répandue dans le monde, de la Chine aux pays du Moyen – Orient, de l'Afrique, à l'Amérique latine, en France et Etats Unis d'Amérique [3,4,5].



Photo 1.1. Des Moulage et séchage blocs adobes

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée **(BTS et comprimée)**

La production des blocs d'adobe doit prendre en compte des étapes successives depuis l'extraction de la terre jusqu'au stockage final du matériau prêt à être utilisé en construction [6]

I.2.1.3. Modes de production de l'adobe :

On distingue deux principaux modes de production des adobes, l'un manuel et l'autre mécanisé traduisant un mode de production traditionnel et un mode de production modernisé

a. Le mode de production manuel :

-Moules simples :

Il correspond à un moulage traditionnel soit par façonnage manuel ou à l'aide d'un moule Façonnée à la main (photo 1.2), la terre est généralement utilisée à l'état de pâte plastique mi ferme La terre peut être employée à deux états hydriques différents, soit sous forme de pâte mi molle et selon une méthode dite du "coup d'eau" (moule préalablement nettoyé et mouillé pour faciliter le démoulage), soit sous forme de pâte ferme et selon une méthode dite du "coup de sable" (le moule préalablement nettoyé et mouillé est sou-poudré de sable pour faciliter le démoulage). Dans ces deux techniques de moulage manuelles rendements moyens de production se situent de 400 à 600 blocs par jour pour 2 ouvriers.

-Moules multiples :

Il associe l'utilisation de grands moules à compartiments multiples, généralement en forme d'échelles ou de forme carrée subdivisée en petits compartiments et la livrai sonde la terre, à l'état assez liquide par brouettes, dumpers ou bulldozers à godet. Parfois la terre est directement déversée depuis le malaxeur qui est alors mobile et tracté par ou sur un camion. Les moules doivent être manipulés facilement par 2 ouvriers (pas trop lourds) et doivent être propres et mouillés avant d'y déverser la terre. Compte tenu de l'état hydrique plus liquide de la terre, les adobes produites de cette façon présentent un risque de retrait et donc de fissuration plus importante. Il convient donc de compenser ce risque en utilisant une terre dont la texture est riche en gros sables et petits graviers.

L'organisation de la production mécanisée se fait autour de deux principaux postes qui sont le malaxage et le moulage et mobilise 5 à 6 ouvriers selon la taille des unités, La production moyenne pour ce type d'organisation est de l'ordre de 8 000 à 10 000 blocs par jour [6]

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée (BTS et comprimée)



Photo 1.2. *Moule de l'adobe*

b- Le mode de production mécanisé:

La production mécanisée de blocs d'adobe a été développée dès la fin du XIX siècle, aux Etats Unis d'Amérique, notamment par un fabricant californien, Hans Sumpf. Celui-ci inventa au point une machine tractée par un animal domestique dans un premier temps puis motorisée et munie de pneus, dotée d'un système de trémie mobile au-dessus d'un moule à compartiments multiples (25 moules) recevant directement la terre et déposant au sol les 25 blocs successivement moulés. Ce type de machine permet une production pouvant aller de 20 à 30 000 blocs par jour.

I.2.1.4. Les produits :

Les produits de la fabrication des adobes, manuelle ou mécanisée, sont extrêmement variés. Ils sont le plus souvent directement tributaires des savoir-faire traditionnels et varient quant au type de terre utilisée, au mode de moulage, aux dimensions des blocs (très changeantes) et aux destinations d'emploi plus ou moins spécifiques (blocs spéciaux). Les moules utilisés sont généralement en acier ou en bois (le plus souvent) et de forme très variée.

Les dimensions les plus fréquentes de 40 x 40 x 15 cm ou 40 x 30 x 15 cm ou 40 x 20 x 10 cm...

On distingue globalement trois principaux types de produits : Produits classiques, produits spéciaux, produits antisismiques [6,7]

I.2.1.5 Les avantages de l'adobe :

L'adobe possède plusieurs avantages par rapport aux matériaux industriels sont :

- ✓ Il a la capacité de régulariser l'humidité de l'air.
- ✓ D'emmagasiner la chaleur.
- ✓ Réduire la consommation d'énergie.
- ✓ De ne produire virtuellement aucune pollution.

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée (BTS et comprimée)

- ✓ Construction peu couteux.
- ✓ N'entraîne pas la production de gaz [3].

1.2.2. Les pisés :

1.2.2.1. Définition:

Le pisé, technique séculaire de mise en œuvre de terre crue, offre des qualités d'habitabilité et d'adaptation exceptionnelles mais nécessite une attention et un suivi régulier. Bien construit et protégé, le bâtiment en pisé traverse les siècles et s'adapte tout naturellement aux divers besoins des hommes [8]. Traditionnellement, les bâtiments en pisé portent de « bonnes bottes » et un « bon chapeau ». C'est à dire que le soubassement est traité de manière à éviter les remontées capillaires, (le plus souvent en galets, en pierre ou en briques de terre cuites maçonnées) et le débord de toiture est suffisant pour éviter le ruissellement de l'eau sur la façade. Le pisé, quant à lui, est en fait la compaction d'un volume de terre à l'intérieur d'un coffrage de façon manuelle en utilisant un pilon ou à l'aide de machinerie spécialisée. (Figure 1.3) montre un exemple de coffrage qui peut être utilisé pour la fabrication de murs en pisé [4].

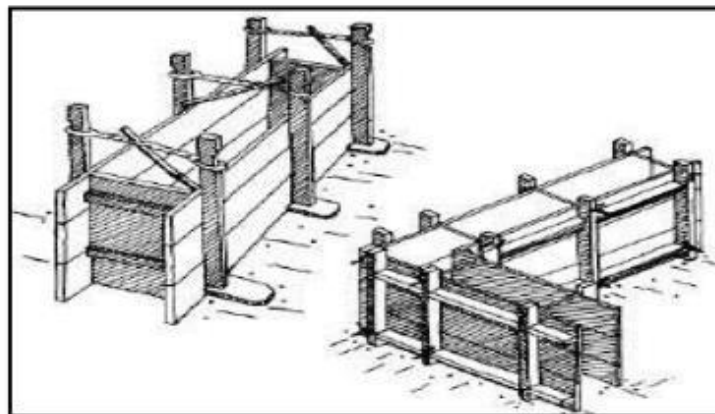


Figure 1.3. Construction un mur en pisé.

Cette technique permet d'utiliser la terre généralement directement issue du site de la construction, et ne nécessite pas de transformation (pas d'utilisation d'énergie pour Altérer ses propriétés basiques) [8]. Des « lits de chaux » ou « cordons de chaux » font souvent office de liant entre les différentes « banchées » (hauteur de coffrage)

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée (BTS et comprimée)

En revanche, cette technique n'est pas applicable avec toutes les terres. En effet, la terre à pisé doit avoir une granulométrie variée : graviers, sables, limons et argiles dans des proportions bien définies, même si selon les lieux d'extraction, la matière se comportera différemment (couleur, tenue aux intempéries,) (photo 1.5) [8]

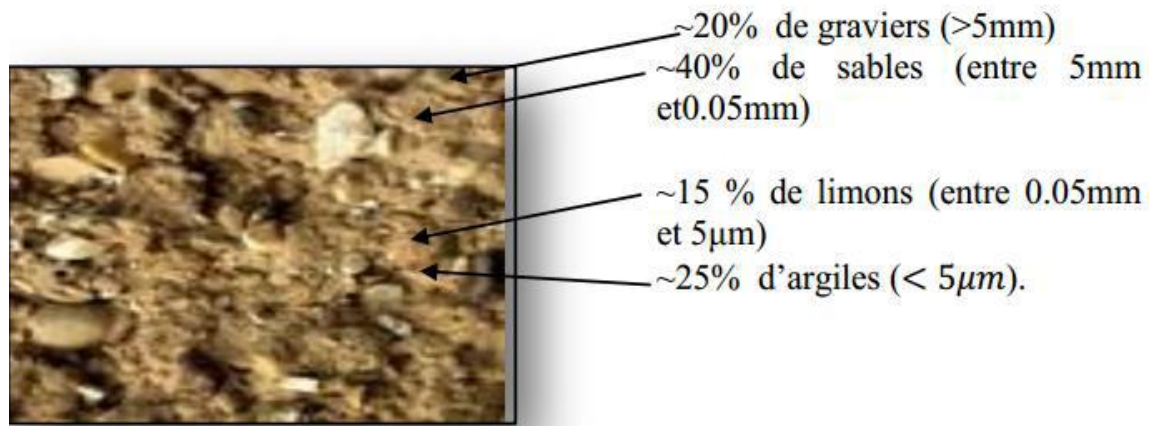


Photo 1.4. Composition de pisé.

1.2.2.3 Les produits : différents types de pisé :

L'aspect général du matériau pisé, une fois compacté et décoffré est celui d'un "béton maigre de terre", variable selon le type de terre (apparence de graviers et cailloux ou texture plus fine), selon le type de coffrage utilisé et les principes constructifs adoptés pour édifier la maçonnerie de terre en "banchées" successives (en progression horizontale ou verticale avec des coffrages traditionnels) [6].

1.2.2.4 Les Avantages de pisé :

La terre possède de multiples qualités dans le domaine du bâti :

- ✓ Régulateur d'humidité : capacité à laisser transiter la vapeur d'eau
- ✓ Durée de vie : patrimoine de bâtiments centenaires très présents.
- ✓ Déphasant : il ralentit le transfert de chaleur (et permet un confort d'été indéniable).
- ✓ Élément de forte inertie, c'est-à-dire qu'il a une bonne capacité à stocké la chaleur et à la restituer par rayonnement.
- ✓ Isolation phonique et qualité acoustique.
- ✓ Reprise aisée, mais nécessitant un savoir-faire [8].

1.2.3. Les Blocs de terre comprimée :

1.2.3.1. Définition :

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée **(BTS et comprimée)**

Les blocs de terre comprimée (BTC) sont des éléments de maçonnerie, des dimension réduites et des caractéristiques régulières et contrôlées, obtenus par compression statique ou dynamique photos (1.6) de terre à l'état humide suivie d'un démoulage immédiat. Les blocs de terre comprimée ont généralement un format parallélépipédique rectangle et sont pleins ou perforés, à relief verticale ou horizontal. Les blocs de terre comprimée sont constitués principalement de terre crue et doivent leur cohésion à l'état humide et à l'état sec essentiellement à la fraction argileuse composant la terre (gravier, sable, limon et argile) ; un additif tel que de (ciment, chaux, pouzzolane etc..) peut être ajouté néanmoins à la terre pour améliorer ou développer des caractéristiques particulières des produits. Les caractéristiques finales des BTC dépendent de la qualité des matières premières de (terre, additif) et de la qualité de l'exécution des différentes étapes de fabrication (préparation, malaxage, compression, cure



Photo 1.5. Bloc de terre crue compressée réalisée à l'aide d'une presse manuelle

1.2.3.2. Production des blocs de terre comprimée

La production des blocs de terre comprimée peut être assimilée à celle des blocs de terre cuite produits sans compactage, exception faite de la phase de cuisson. L'organisation de la production sera selon qu'elle est réalisée dans le cadre de petites unités de production artisanales (ou briqueteries) ou bien dans le cadre d'unités de production semi-industrielles ou industrielles. Les aires de production, de séchage et des stockages varient également selon les modes de production adoptés et les conditions de production issues de l'environnement climatique, social, technique et économique [5].

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée **(BTS et comprimée)**

1.2.3.3. Les Avantages de bloc de terre comprimée:

- ✓ BTC est un matériau écologique : composée essentiellement d'argile, sable et gravillons et d'un peu de ciment, fabriquée sans cuisson.
- ✓ BTC procure un confort thermique et phonique excellent : de par son inertie thermique et sa masse, un mur en BTC apporte confort thermique et isolation phonique
- ✓ BTC offre une grande résistance : la résistance à la compression d'une BTC dépasse les 60 bars (60kg/cm²)
- ✓ BTC présente un intérêt architectural et esthétique : en cloison, en mur porteur, la BTC permet une richesse de formes, et de motifs variés dans son utilisation.
- ✓ BTC est simple à mettre en œuvre : la BTC se monte avec un mortier de terre amendé.

Les règles de construction sont simples à suivre [10].

1.2.3.4 Diversités des produits de blocs de terre comprimée:

Aujourd'hui, le marché accueille une large gamme de produits de terre comprimée (HOUBEN 2006) (voir figure 1.7 et figure 1.8):

➤ **Blocs pleins**

Ils sont principalement de forme prismatique (parallélépipèdes, cubes, hexagones multiples, etc.). Leur usage est très varié.

➤ **Blocs creux**

On observe normalement de 15 % de creux, 30 % avec des procédés sophistiqués. Les évidements créés au sein des blocs améliorent l'adhérence du mortier et allègent les blocs Certains blocs évidés permettent la réalisation de chaînages (coffrage perdu).

➤ **Blocs alvéolaires**

Ils présentent l'avantage d'être légers mais exigent des moules assez sophistiqués ainsi que des pressions de compression plus forte que la normale.

➤ **Blocs à emboitements**

Ils peuvent éventuellement permettre de se passer de mortier mais exigent des moules assez sophistiqués et en général des pressions de compression plus ou moins élevées.

➤ **Blocs parasismiques**

Leur forme améliore leur comportement parasismique ou permet une meilleure intégration de systèmes structuraux parasismiques : chaînage par exemple.

➤ **Blocs spéciaux**

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée (BTS et comprimée)

Les blocs sont fabriqués exceptionnellement pour une application spécifique.

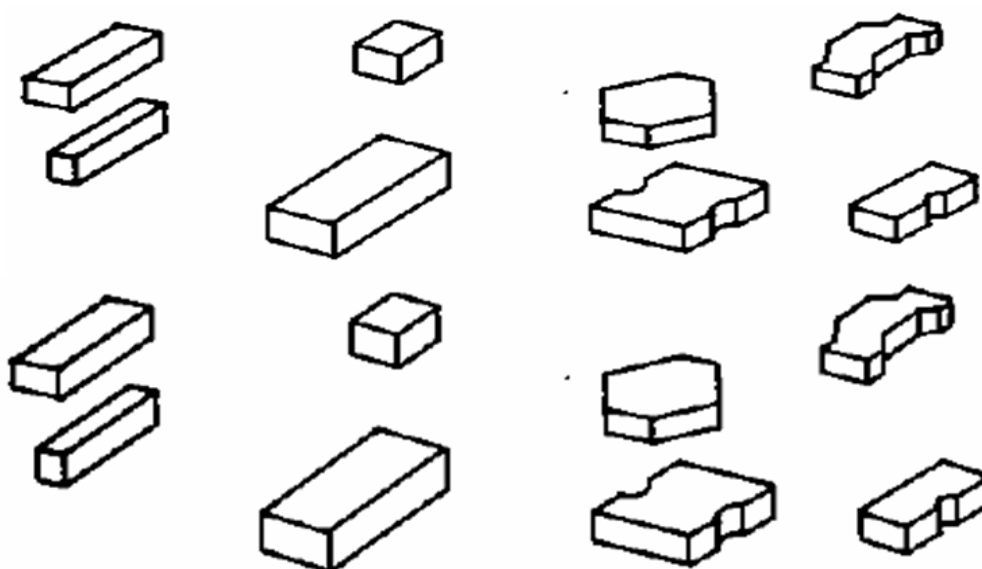


Figure I.6. Diversités des produits de blocs de terre comprimée



Fig. 1.7 : Différents produits de blocs de terre comprimée (Architectures des terres cures /Sophie Bronchart 2013).

1.2.3.5 La construction en bloc de terre comprimée dans le monde :

Plusieurs constructions ont été réalisées en blocs de terre comprimée à travers les quatre coins du monde (voir figure 1.9), profitant des avantages de cette technique moderne, que ce soit sur le plan économique, écologique, esthétique, thermique et environnemental. On peut citer ici quelques

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée (BTS et comprimée)

exemples fascinants : quasbah sud(Maroc), Mosquée de Djanné (Mali), château escoffier) France) et Mausolée(Inde)



Figure 1.8. Constructions réalisées en blocs de terre comprimée

I.3 Blocs de terre comprimée (BTC):

Les briques de terre compressée (BTC) et briques de terre compressée stabilisée (BTCS) sont obtenues par compression de la terre dans des presses et sont immédiatement démoulés contrairement aux briques d'adobe (Figure I-5). Pour la construction de blocs de terre compressée, HOUBEN et al. (1996) recommandent un sol contenant : 0-40 % de gravier, 25-80 % de sable, 10-25 % de limon et 8-30 % d'argile. Pour les BTCS, en général, 3 à 19 % de chaux hydraulique ou de ciment sont utilisés, avec une moyenne de 6 à 8 %



Figure 1-9 : Construction en BTC (Sources Internet)

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée **(BTS et comprimée)**

La résistance en compression moyenne d'une brique est de 2 à 4 MPA. Dans certains cas particuliers, les briques de terre atteignent 12 MPA (ROHLEN et al. 2013) La BTCS est plus résistante que la BTC. Touré et al., (2017) montrent une résistance en compression de 2,5 à 4 MPA pour les BTC, et de 2 à 6 MPA pour les BTCS avec 8 % de ciment. L'épaisseur mini male d'un mur porteur en BTC ou BTCS doit être de 20 cm de largeur. Zhang et al. (2018) montre nature corrélation linéaire entre la conductivité thermique et la masse volumique apparente des BTC, où les valeurs moyennes de la conductivité thermique augmentent de 0,52 à 0,93W.m⁻¹.K⁻¹ avec l'augmentation de la densité apparente de 1500 à 2100 kg m⁻³.

Les avantages des BTC et BTCS sont de diminuer l'épaisseur des murs pour des caractéristiques identiques aux autres techniques et de permettre de nombreuses formes de construction (niches, arc, frises,). Cependant, le coût de ces matériaux est plus important (HOUBEN et al. 1996).La résistance en compression moyenne d'une brique est de 2 à 4 MPA. Dans certains cas particuliers, les briques de terre atteignent 12 MPA (ROHLEN et al. 2013). La BTCS est plus résistante que la BTC. Touré et al., (2017) montrent une résistance en compression de 2,5 à 4MPa pour les BTC, et de 2 à 6 MPA pour les BTCS avec 8 % de ciment. L'épaisseur mini male d'un mur porteur en BTC ou BTCS doit être de 20 cm de largeur. Zhang et al., (2018) montre nature corrélation linéaire entre la conductivité thermique et la masse volumique apparente des BTC, où les valeurs moyennes de la conductivité thermique augmentent de 0,52 à 0,93W.m⁻¹.K⁻¹ avec l'augmentation de la densité apparente de 1500 à 2100 kg m⁻³.

Les avantages des BTC et BTCS sont de diminuer l'épaisseur des murs pour des caractéristiques identiques aux autres techniques et de permettre de nombreuses formes de construction (niches, arc, frises,). Cependant, le coût de ces matériaux est plus important (HOUBEN et al. 1996).

1.4 La terre comme matériau de construction:

1.4.1 Généralités sur les argiles et les minéraux argileux:

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

Ces minéraux se présentent généralement dans les sols sous forme :

- de grains polygonaux plus ou moins réguliers dont la taille se situe entre quelques micron set quelques millimètres ;
- de lamelles pour les argiles dont la plus grande dimension ne dépasse pas quelques microns ;

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée (BTS et comprimée)

-d'agrégats correspondant à des fragments de roches. Leurs formes résultent de la morphologie des minéraux les constituant [14].

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

1.4.2 Les argiles

Selon **Caillère et al.** [16], l'argile est constituée de particules fines de taille inférieure à 2 μm .

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

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

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée
(BTS et comprimée)

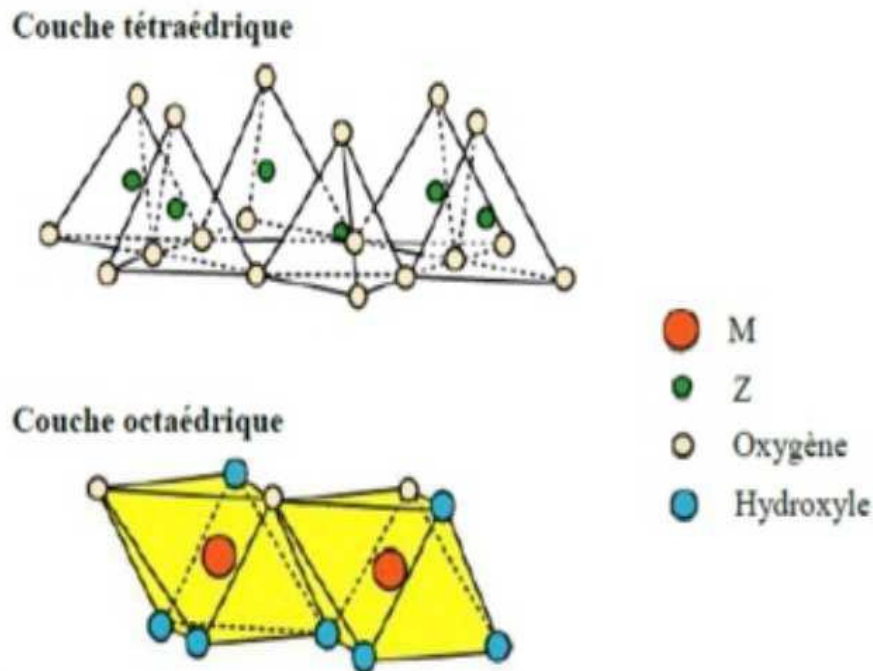


Figure 1.10: Couches tétraédrique et octaédrique [17]

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

- Groupe 1 :1, les kaolinites ou T-O (1 couche octaédrique et 1 couche tétraédrique) équidistance voisine de 7 Å.
- Groupe 2 :1, les micas ou T-O-T (1 couche octaédrique insérée entre 2 couche 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.

**Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée
(BTS et comprimée)**

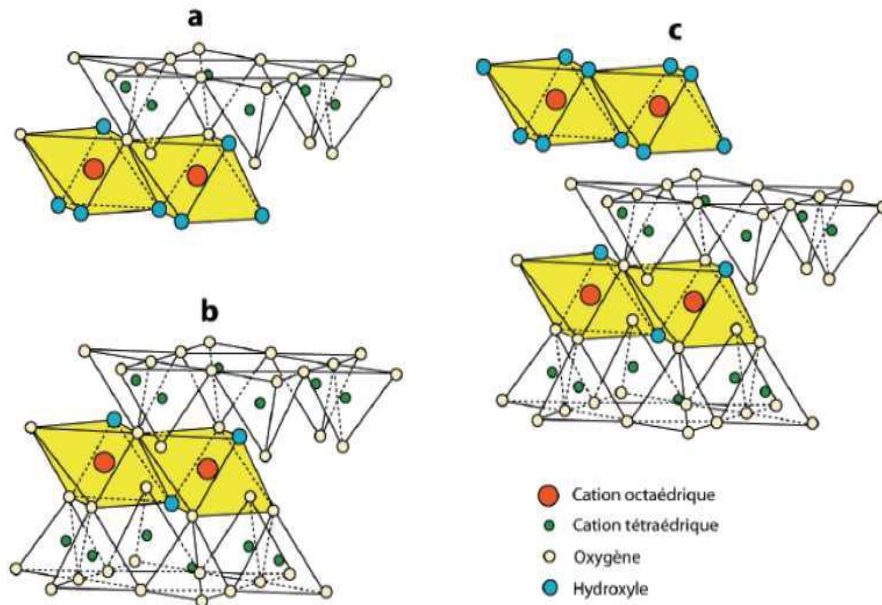


Figure 1.11 : Agencement des couches octaédriques et tétraédriques [17].

Le Tableau 1.2: résume ces trois familles d’argiles présentées ainsi que leurs formules chimiques

TYPE DE L’ARGILE	Combinaison des feuillets	Formule chimique	Espace Inter foliaire
Kaolinite	T-O	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Liaison hydrogène forte
Illite	T-O-T	$(K H_{30})(Al Mg Fe)_2(Si Al)_4O_{10} [(OH)_2, (H_2O)]$	Présence de K^+
Montmorillonite (Famille des smectites)	T-O-T	$(Na Ca)_{0.3} (Al Mg)_2 Si_4 O_{10} (OH)_2 \cdot nH_2O$	Présence ou pas des cations hydrates (Na^+ et Ca^+)

1.5 Stabilisation:

15.1 Définition:

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

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée **(BTS et comprimée)**

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

1.5.2 Objectifs:

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

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

1.5.3 Procédés:

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

1.5.3.1 Stabilisation mécanique :

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

1.5.3.2 Stabilisation physique :

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

1.5.3.3 Stabilisation chimique :

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

Le traitement du matériau terre par des produits chimiques se fait pratiquement de deux manières :

- a. Un traitement dans la masse (introduction dans la masse du sol d'une quantité minimale de stabilisant).
- b. Un traitement de surface (enduits, badigeons, hydrofuges), pour protéger la surface par imprégnation sur la partie exposée (Ghoumari 1989).

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée **(BTS et comprimée)**

1.5.4 Moyens de stabilisation:

Dans la littérature, on peut trouver diverses classifications, selon : la nature, la forme, etc. Selon Rigassi (Rigassi 1995), il y a six modes de stabilisations :

- Densifier.
- Armer.
- Enchaîner.
- Liaisonner.
- Imperméabiliser.
- Hydrofuger.

Chaque stabilisant n'agit pas obligatoirement selon un procédé exclusif, mais il peut aussi cumuler plusieurs procédés : physique et chimique (HOUBEN 2006)

1.6 Les propriétés du matériau terre en construction:

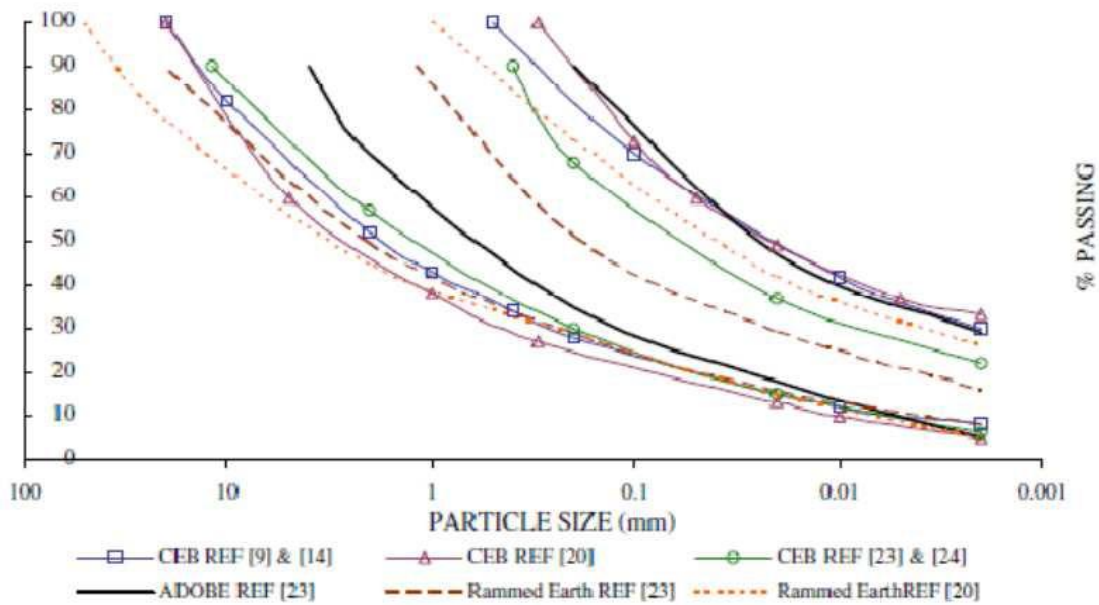
1.6.1 Texture:

Les retours d'expérience sur les techniques de construction en terre permettent de définir des fuseaux granulaires de référence. Il est très important de respecter la teneur minimale en argile pour toutes les techniques voir la (figure 1.9). Il pourrait être établi à 5 %. Le pourcentage commun d'argile à toutes les recommandations était trouvé dans les gammes comprises entre

10 % et 22 % pour les BTC et entre 10 % à 15 % pour le pisé. Cependant, la teneur en limon entre 10 % à 25 % pour le BTC [18]. Doat et al., [19], démontrent qu'une fraction trop importante en silt provoque après séchage des BTC un retrait trop important et qu'une fraction trop importante d'élément de taille plus grosse diminue les performances des BTC à cause du manque d'argile et de cohésion.

Guettala et al., [20], montrent qu'il est nécessaire de bien fragmenter le sol cohésif car il existe une taille critique pour les mottes de sols argileux. Au-delà.

**Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée
(BTS et comprimée)**



terre [18].

Figure 1.12. Fuseaux granulaires adoptés pour différentes techniques de construction en

1.6.2 Plasticité:

La plasticité est la capacité des matériaux de maintenir une déformation sans se rompre. Elle est l'un des états de la cohérence des sols. La figure 1.10 représente les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre. La plasticité est similaire pour le pisé et les blocs de terre comprimée, en revanche l'utilisation de la terre en adobe demande une limite de liquidité et un indice de plasticité plus important par rapport à des techniques de construction plus sèche comme le BTC ou le mur en pisé. En général, une bonne terre de construction ayant un indice de plasticité (**IP**) compris entre 16 à 28 % et une limite de liquidité (**WL**) entre 32 à 46 % [18].

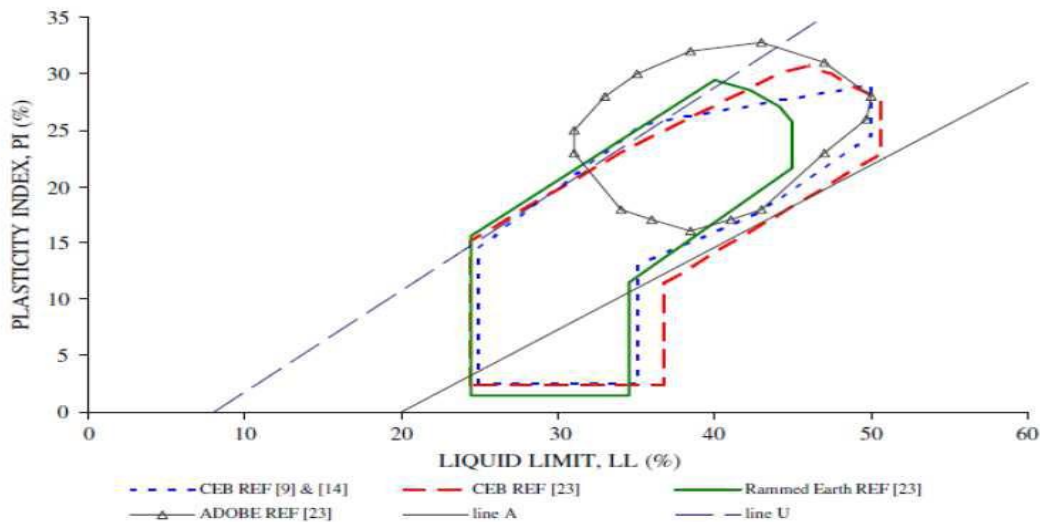


Figure 1.13. Les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre [18].

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée **(BTS et comprimée)**

1.6.3 Matière organique:

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

1.6.4 Sulfates:

Les sols peuvent contenir des quantités variables de sulfate qui peuvent entraîner dans certaines conditions (taux de sulfate, solubilité du sulfate, répartition dans le sol) des gonflements par formation d'étringite. Les minéraux de sulfure s'oxydent et réagissent avec d'autres minéraux contenus dans le sol pour former des sulfates. Cette transformation induit une augmentation du volume en raison des variations dans la structure atomique en plus d'adjonction d'eau à la structure minérale. **Guillaud H et Houben H [1]** a conseillé de faire une étude spécifique pour les terres contenant plus de 2% à 3% de sulfates.

1.7. DEFINITION DE BETON DE FIBRES:

Le béton de fibres métalliques (BFM) est un matériau composite constitué d'une matrice béton et d'un renfort par inclusion directe de fibres isolées, dont les propriétés mécaniques résultent de la combinaison des propriétés du béton, des fibres et de l'interface entre les matériaux.

L'ajout des fibres a pour rôle principal dans le béton est de modifier ces propriétés. Les fibres sont des éléments discontinus, de nature variable, répartis uniformément dans la matrice et ayant une orientation aléatoire (naturelle) ou forcée. Les fibres sont capables de l'arrêt et couvrir les fissures. Les fibres aussi permettent d'améliorer ainsi le comportement post-fissuration du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macro fissuration. Elles ont de plus, la capacité de transférer les charges, dès lors qu'une bonne adhérence fibre/matrice est assurée. La distribution homogène des fibres dans le béton est donc la condition principale pour pouvoir parler d'un béton renforcé uniformément, avec les mêmes caractéristiques dans tous les points de la matrice. Par ailleurs, les fibres constituent un obstacle au mouvement des granulats filiforme gênant l'assemblage optimal du squelette des granulats. La géométrie des fibres, leur dosage, ainsi que la mise en place du matériau frais, sont des paramètres affectants très fortement le comportement global du matériau durci. [22]

1.7.1 : DIFFERENTES NATURE DES FIBRES:

Les fibres sont ajoutées aux matériaux cimentaires afin d'améliorer leurs caractéristiques à l'état durci. Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle synthétique ou artificielle, leur forme (droite, ondulée, aiguille, etc.), leur dimension(macro ou microfibre) et aussi par leur propriété mécanique. Les principales fibres utilisées sont :

1.7.1.1: Fibres minérales:

Elles regroupent plusieurs sortes de fibres (amiante, alumine ... etc), et sont utilisées en grande quantité dans plusieurs applications traditionnelles. Les fibres d'amiante autrefois utilisée pour l'isolation, se sont aujourd'hui révélées cancérigènes.

1.7.1.2. Fibres végétales:

La principale fibre végétale est la cellulose qui résiste aux alcalis. Les fibres végétales résistent à la plupart des acides organiques mais sont détruite par les acides minéraux forts. Il existe quatre sortes de fibres végétales : les fibres provenant des poils les fibres de liber. Elles sont souvent utilisées dans la fabrication du papier et dans les panneaux de construction (fibres de bois).

1.7.1.3. Fibres synthétiques:

Cette famille regroupe plusieurs types de fibres comme (nylon, polypropylène polyester ...etc). Elles sont apparues à la fin du XIXème siècle sous le nom de rayonne. Elles sont dérivées de la cellulose naturelle. Aujourd'hui, la plupart des fibres synthétiques proviennent des produits dérivés du pétrole et de polymères géants dont la structure ressemble à celle des matières plastiques. La première fibre plastique commercialisée avec succès, le Nylon, daté de 1938. Depuis, de nombreux synthétiques, dont les fibres acrylique, l'aramide, l'oléfine et le polystyrène sont apparus. Ces fibres ont également été étudiées à des fins industrielles très précises, telles que la fabrication des matériaux d'isolation, t'issus pare-balle, les fuselages et ailes d'avion.

1.7.1.4. Fibres artificielles:

Ce type de fibre est le plus utilisé dans le domaine industriel en général et dans le domaine de génie civil en particulier. Il regroupe les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier et d'autre. Elles sont aujourd'hui les plus répandues dans l'industrie de la construction. Nous allons présenter quelques principales fibres utilisées pour renforcer les mortiers et bétons.

1.7.1.4.1. Fibres de polypropylène:

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée **(BTS et comprimée)**

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille de polyoléfines. Il est fabriqué depuis 1954 pour l'industrie textile. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages suivants : bonne résistance à la traction qui peut atteindre 800 MPA, déformabilité élevée.

Ces fibres sont obtenues suivant les processus d'extrusion, étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre des propriétés mécaniques élevées. L'ajout des fibres de polypropylène au mortier et au béton remonte à 1960 mais ce n'est qu'à partir de 1967 qu'apparaissent des réalisations intéressantes notamment en Grande Bretagne. Ces fibres sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de panneaux décoratifs, ainsi que l'élaboration de revêtement de façades de plusieurs constructions et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux.

1.7.1.4.2. Fibres de verre:

Ces fibres sont fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 tours d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100 μm .

Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12 et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois types : les fibres de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre au borosilicate.

Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes :

- Bonne adhérence avec la matrice,
- Disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues.),
- Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion,
- Conductivité thermique relativement faible.

1.7.2. Fibres métalliques:

Ce type de fibres, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherche très importante dans le monde. On se limite aux fibres d'acier qui sont les plus utilisées dans le domaine de génie civil. En effet les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion interfaciale entre fibre et la matrice. Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface de la fibre. Ce qui les conduit aux nombreuses variétés de fibre qui se différencient les unes des autres par leurs diamètre, leur section (rond, carré rectangulaire). Leur longueur et leur mode d'opération. Les diamètres des fibres d'acier varient généralement entre 0,1 et 0,7 mm, avec des longueurs de 10 à 70 mm

Les fibres métalliques utilisées en dallage industriel sont les plus souvent des fibres tréfilées comportant généralement des fils de 1mm de diamètre. Les différentes fibres existantes se

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée **(BTS et comprimée)**

différencient les unes des autres par le type d'ancrage actif dans la matrice du béton. Il existe des fibres fabriquées avec un ancrage dit déformable, par exemple des fibres à crochets.

Il existe d'autres types de fibres artificielles qui sont utilisés pour le renforcement des mortiers ou béton tel que, fibres d'amiante, fibres de cellulose...)

Chaque type de fibres présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres dimensions (diamètre, longueur...), formes (lisse, rugueuse, plate, ondulée crantée...), résistance à la traction et adhérence au béton, qui procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibres.

1.7.2. DIFFERENTS TYPES DES FIBRES METALLIQUES:

Il existe de nombreuses variétés de fibres métalliques qui se différencient par leur diamètre, leur section (circulaire, carrée), leur limite élastique, leur longueur et leur mode d'élaboration. Elles peuvent être rectilignes, ondulées, tronqués

Les fibres munies de crochets à chaque extrémité sont celles qui présentent le plus d'avantages à cause de leur bonne adhérence mécanique. Elles sont fabriquées en acier étiré à froid, ayant une résistance à la traction minimale de 1100 MPA. Elles se présentent sous forme de petites plaquettes de fibres (30 à 40 fibres), accolées avec un produit soluble dans l'eau, ce qui facilite leur incorporation dans le béton et le malaxage. Au contact de l'eau de gâchage, les fibres se libèrent aléatoirement dans la masse du béton en reprenant leur élanement unitaire. On obtient ainsi une meilleure homogénéité du matériau.

Ces fibres travaillent par déformation des crochets qui se redressent lors du glissement de la fibre dans la matrice, [23]

La rupture du béton fibré étant toujours par arrachement des fibres, l'utilisation des fibres de haute adhérence améliore la résistance à l'arrachement et par conséquent améliore les propriétés mécaniques du matériau composé. Les proportions d'un mélange normal en béton à base de fibres varient généralement entre 1 à 3% par volume bétonné ; les fibres sont des longueurs qui varient entre 20 et 60mm au maximum. L'élanement, défini comme étant le rapport longueur/diamètre (l/d), est un paramètre important dans le sens où il traduit les deux caractéristiques d'une fibre qui sont la longueur et le diamètre. Pour une efficacité optimale, ce paramètre doit varier entre 50 et 75. Les dosages élevés en fibres longues donneraient des performances mécaniques meilleures si les fibres pouvaient être distribuées uniformément. Les problèmes de la maniabilité et de la distribution uniforme deviennent plus aigus avec l'augmentation du % et de la longueur des fibres. L'amélioration de la résistance à la flexion avec l'utilisation des fibres d'acier varie de moins de deux fois pendant que les résistances à

Chapitre 1 : Généralité sur le béton de terre stabilisée et comprimée **(BTS et comprimée)**

la fissuration excessive et à la ductilité peuvent être améliorées jusqu'à vingt fois. Les fibres d'acier trouvent leur application dans les bétons de dallage industriels et les bétons autoplaçants, dans les pistes d'aérodrome, dans les dalles de compression pourp lanchers, dans les bétons projetés des tunnels et des talus, dans les bétons préfabriqués pour les panneaux de façades et pour les bétons de terrain stable...Etc.

1.8 Conclusions :

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



CHAPITRE 2

Influences du pourcentage du ciment

Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

Introduction:

Le béton comme matériau de construction le plus utilisé dans la construction, il permet de réaliser des prouesses technologiques telles que les barrages, ponts, immeubles, tunnels centrales nucléaires. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance à la compression, sa durabilité et son faible coût et d'autres qualités. Les origines du béton de terre remontent à la plus haute antiquité, mais c'est au XXe siècle que l'utilisation du béton se généralise aux dépens de l'acier et de la maçonnerie. Aujourd'hui, le béton doit répondre à un ensemble de spécifications très précises qui sont la rhéologie, la résistance au jeune âge, les aspects de parement, la résistance à 28 jours, la durabilité, etc.

Le durcissement du béton est le passage d'un état plastique à un état durci, et ce, grâce à un résultat d'un certain nombre de réactions chimiques entre l'eau de gâchage et les grains de ciment appelé réaction d'hydratation du ciment portland. Un peu d'histoire...

Le béton est né du besoin d'avoir un matériau de construction bon marché, malléable au moment de le mettre en place et résistant ensuite.

La forme la plus ancienne du béton remonte à 7000 ans avant JC. Un matériau similaire était connu des égyptiens et des Romains, mais l'essor réel du béton tel qu'on le connaît aujourd'hui est dû à l'anglais Joseph Aspidine qui en 1824 fait breveter le ciment Portland

2-1 .Pâte de ciment

La pâte de ciment correspond à l'ensemble (ciment + eau + air + additions+ adjuvants). La pâte présente à l'intérieur du béton, joue à la fois le rôle de liant et de remplissage. Elle contribue à l'écoulement suivant un processus rhéologique lié essentiellement à sa viscosité [Nguyen T.L.H, 2007]. Celle-ci peut être présentée schématiquement comme une suspension des particules suspendues dans un liquide newtonien qui est l'eau.



Figure 2 .1 : pâte de ciment

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

2.2 Ciment:

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui mélangée avec l'eau forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (C a O) et du dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

2.2.1 Classification des ciments :

2.2.1.1 Classification suivant la composition :

Selon la teneur des constituants autres que le gypse ajouté ou non au clinker, la norme européenne NF EN 197-1 donne 27 ciments courants, qui sont regroupés en cinq types principaux à savoir :

- CEM I Ciment Portland Artificiel ;
- CEM II Ciment Portland composé ;
- CEM III Ciment de haut fourneau ;
- CEM IV Ciment pouzzolanique ;
- CEM V Ciment aux laitiers et aux cendres.

Ces ciments différents par le type d'ajout et sa teneur, incorporés dans le but de modifier certaines de leurs propriétés en raison des conditions d'environnement ou de performances mécaniques auquel ces ciments sont destinés. Les différents types d'ajouts normalisés sont : [03]

2.2.1.2. Classification des ciments suivant les résistances à la compression :

La norme européenne NF EN 197-1 classe les ciments courant d'après leur résistance à la compression (résistance normale) déterminée conformément à la norme EN 196-1, mesurée à 28 jours en six classes de résistance. [01]

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2 jours	7 jours	28 jours	
32,5 N	—	> 16.0	> 32.5	< 52.5
32,5 R	> 10.0	—		
42,5 N	≥ 10,0	—	> 42.5	< 62.5
42,5 R	> 20.0	—		
52,5 N	> 20.0	—	> 52.5	—
52,5 R	> 30.0	—		

Tableau 2.1 : Exigences mécaniques définies en termes de valeur caractéristiques [01]

2.2.1.3 Classification des ciments suivant le type d'environnement :

Certains ciments ont des propriétés supplémentaires leur permettant de s'adapter à des environnements spéciaux de type :

- **Ciment PM : NF P 15-317** résistant à l'eau de mer est un ciment courant posé dans des caractéristiques physiques et chimiques complémentaires (teneur limitée en aluminatetricalcique) qui lui donne une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence d'ions chlorure, au cours de la prise et ultérieurement.

- **Ciment ES : XP P 15-319** résistant aux eaux sulfatées est un ciment courant présentant des teneurs limitées en aluminatetricalcique (C3A) afin d'avoir une résistance accrue à l'agression des ions sulfate au cours de la prise et ultérieurement.

- **Ciments CP : NF P 15-318** pour béton précontraint, on distingue deux types de ciments qui diffèrent par leur teneur en ions sulfure SO₄²⁻:

- ✓ Ciments de la classe CP2 contenant moins de 0,2 % d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par prétention.

- ✓ Ciments de la classe CP1 contenant moins de 0,7 % d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par post tension. Il existe par ailleurs des ciments spéciaux répondant à des conditions spécifiques (durcissement très rapide, résistance aux fortes chaleurs ou aux agressions chimiques).

C'est le cas du ciment alumineux fondu, très résistant aux milieux acides.

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

2.3: Propriétés du ciment :

Mouture d'un ciment est caractérisée par sa surface spécifique ou surface développée totale des grains contenus dans une masse donnée. Cette finesse, mesurée conventionnellement selon la norme **NF P 15-4420** est exprimée en cm^2/g , elle varie de 1700 à 3500 cm^2/g .

- La masse volumique des ciments est en générale de 800 à 1200 kg/m^3 on compte en moyenne 1100 kg/m^3 pour un ciment en vrac non tassé.
- La masse volumique spécifique varie en général de 2900 à 3200 kg/m^3 .
- La fin de prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide (il n'existe pas d'essai normalisé) ; elle ne peut se définir avec précision.
- Les temps de début de prise peuvent varier de quelques minutes pour les ciments prompts, à plusieurs heures pour les ciments à prise lente. Pour la plupart des ciments courants. Le début de prise à 20°C se situe entre 2 et 5 heures. [01]
- après la prise, le phénomène d'hydratation se poursuit, on obtient après quelques jours presque la totalité de la résistance (80%), mais pour d'autres ciments le durcissement se poursuit pendant des mois...

2.4: Eau de gâchage :

L'eau de gâchage est la quantité d'eau ajoutée au mélange sec de béton, elle remplit deux fonctions : d'une part elle sert à l'hydratation du liant et d'autre part, elle permet la fluidification du mélange ayant pour but de faciliter la mise en place du béton.

a. Caractéristiques physiques :

L'eau doit être propre, elle ne doit pas contenir des matières en suspension au-delà de.

-2g/l pour les bétons de types A et B

-5g/l pour les bétons de type C

Béton **A** : béton de haute qualité à forte résistance

Béton **B**: béton à grande imperméabilité

Béton **C**: béton courant peu ou non armé

b. Caractéristiques chimiques :

L'eau ne doit pas contenir de sels dissous au-delà de :

-1.5g/l pour les bétons de types A et B.

-3g/l pour le béton de type C.

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

2.5: Les adjuvants :

Ce sont des substances ajoutées au béton pour améliorer certaines de ses propriétés à de faibles doses. Les adjuvants peuvent changer considérablement les caractéristiques du béton frais et du béton durci.
[04]

2 .5.1 : Définition :

Un adjuvant peut être défini comme un produit chimique qui est ajouté au béton selon un dosage n'excédant pas 5% de la masse totale du ciment. Soit au cours d'un malaxage complémentaire avant la mise en œuvre du béton dans le but de le modifier ou d'améliorer certaines de ces propriétés...

Pour des raisons de commodité d'utilisation, la plupart des adjuvants existent en poudre afin de réduire leur coût de transport.

2.5.2: Les différents cas d'application possibles

- ❖ Accroissements de la compacité du béton pour un dosage en ciment fixé ; et pour une granulométrie déjà déterminée.
- ❖ Accroissements des résistances mécaniques, sans la modification de la teneur imposée en ciment.
 - ❖ Augmentation de la maniabilité, sans accroissement de la quantité d'eau de gâchage.
 - ❖ Amélioration de l'imperméabilité d'un béton. Diminution du retrait.
 - ❖ Accroissement de la résistance à la flexion.
 - ❖ Résistance au gel du béton déjà durci.
 - ❖ Durcissement par piéride de gel intense.
 - ❖ Durcissement par temps froid ou petites gelées.
 - ❖ Résistance au Blessing (ségrégation de l'eau).
 - ❖ Résistance aux eaux agressives.
 - ❖ Aptitude d'un mortier à être injecté (mortier thixotropique).
 - ❖ Aptitude du béton à être coulé sous l'eau.
 - ❖ Résistance à la dessiccation du béton durci.
 - ❖ Confection du béton léger.
 - ❖ Possibilités de démoulage rapide.
 - ❖ Confection du béton clou balès, non fissura blé.

2.6 : Stabilisation au ciment

2.6.1 : Généralités

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

Les premières tentatives de stabilisation au ciment dans le domaine routier, ont lieu aux U.S.A en 1915. La stabilisation au ciment, en construction de bâtiment s'est développée dépendamment en Allemagne, dès 1920. Aux U.S.A, à partir de 1935, le sol-ciment est de plus en plus employé : routes, pistes d'aérodrome. Depuis lors, dans le monde entier, on ne compte plus les applications de la stabilisation au ciment autant dans le domaine des travaux publics que dans celui du bâtiment (HOUBEN ,2006).

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

D'après VENUAT (VENUAT ,1980), tous les ciments normalisés conviennent en principe pour la stabilisation des sols, mais la préférence est donnée aux ciments de classes faibles, car une grande résistance n'est pas nécessaire [27]. Alors que d'autres auteurs (Doat,1979), préconisent un type de ciment selon la nature du sol :

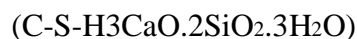
- Sol contenant un certain pourcentage d'argile : emploi du ciment riche en alite C_3S et bélite C_2S qui donne, après hydratation, beaucoup de PORTLANDITE, $Ca(OH)_2$. VERDEY en conseille le ciment pour les sols dont la teneur en argile n'existe de pas 20 à 30 % ($I_P < 25\%$) (VERDEY ,1971).

2.6.2 : Mécanisme de stabilisation

La poudre de ciment contient plusieurs phases différentes. Les phases principales sont : l'alite (C_3S), la bélite (C_2S), l'aluminate tricalcique (C_3A), l'aluminoferrite tétra calcique (C_4AF) et la périclase (MgO). Des phases mineures sont également trouvées : la chaux libre (CaO), les sulfates de sodium et de potassium (Na_2SO_4 et K_2SO_4) (MOSZKOWICZ, 2001).

Suivant les proportions de ces éléments, les ciments pourront avoir des propriétés différentes. Par exemple, une forte teneur de C_3S donnera une résistance élevée, par contre un ciment à forte teneur en C_3A aura une faible résistance à l'action des eaux agressives.

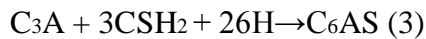
Une fois le mélange avec le sol est réalisé, le ciment va se dissoudre et s'hydrater si la quantité d'eau est suffisante pour former des constituants hydrates. La principale réaction provient de l'hydratation des deux silicates de calcium (C_3S et C_2S) qui forment deux nouveaux composés : la portlandite (CH) et le silicate de calcium hydraté



CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

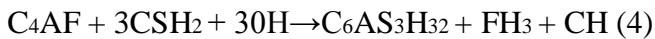
Du BTS et comprimé

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



En l'absence de gypse, les C₃A réagissent avec l'eau pour donner des C₄AH₁₃, C₂AH₈, et des C₃AH₆. Les C₄AH₁₃ et C₂AH₈ sont instables. Sous l'action de la chaleur d'hydratation ils se transforment en C₄AH₈.

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



La minéralogie et la granulométrie des sols traités influent peu sur les effets du ciment puisque la poudre de ciment contient en elle-même tout ce dont elle a besoin pour réagir et former des produits cimentaires ; le ciment va créer des liens physiques entre les particules augmentant ainsi la résistance des sols (TRAN, 2009) [28].

Pour le cas des sols pulvérulents, leurs particules ont des tailles plus grandes que celles des grains de ciment, donc elles peuvent être revêtues de ciment. Le ciment peut réagir avec lui-même ou avec le squelette granulaire du sable (United Nations, 1992) [29].

Dans le cas des sols cohérents, beaucoup de particules sont plus fines que les grains de ciment, donc elles ne peuvent pas être revêtues par du ciment (Bell, 1975)[30]. Cependant, suite eau compactage appliqué sur les hydrates de ciment, ces derniers forment un squelette rigide qui sera de plus en plus résistant à mesure que l'hydratation avance, menant à l'augmentation de la résistance.

De plus, une réaction en trois étapes avec de l'argile se produit (United Nations, 1992)[28]:

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

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

Il en résulte en fait trois structures mêlées (HOUBEN, 2006) :

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

- une matrice inerte sableuse liée au ciment,
- une matrice d'argile stabilisée,
- une matrice de terre non stabilisée.

2.6.3 : Efficacité et dosage

La meilleure efficacité est obtenue par une compression à l'état humide. Les meilleures résistances à la compression sont atteintes avec des graves et des sables plutôt qu'avec des limons et des argiles (Houben,2006). Ceci confirme les résultats obtenus par Walker (Walker1997) [31]. Ces résultats montrent que la résistance à la compression du bloc de terre comprimé est stabilisée au ciment diminue avec l'augmentation de teneur en minéraux argileux (figure1.22).

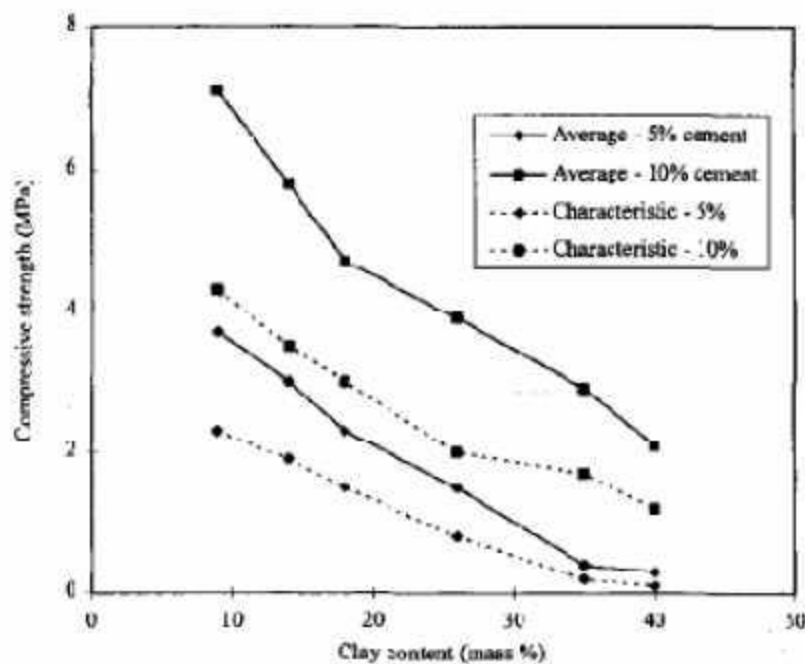


Figure : 2 .2:Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la compression du bloc de terre comprimée stabilisée au ciment (Walker, 1997).

En général, il faut au moins 5 à 6 % de ciment pour obtenir des résultats satisfaisants.

La résistance en compression reste très dépendante du dosage, 8 % de ciment constitue souvent une limite supérieure économiquement acceptable (DOAT 1979[36]. D'après GOODING (GOODING, 1993), le bloc de terre stabilisée avec 3 à 12% en masse de ciment, semble être le bloc le plus courant. (HEATHCOTEH, 1994)[37], montre que la teneur minimale en ciment est 0,75%, au-dessous de laquelle, la résistance est indépendante de la quantité de ciment employée. Mais les résultats de l'auteur ne concordent pas avec ceux d'autres chercheurs exigeant une valeur comprise entre 5 et 12%

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

pour être le mieux adapté. Par exemple, (Walker, 1995)[34] indique que les blocs base de moins de 5% de ciment sont souvent trop friable pour être manipulés. Plus tard Walker (Walker, 1996)[32] reconnaît que la teneur en argile du sol doit être comprise entre 5 et 20%, la teneur en ciment entre 4 et 10% et l'indice de plasticité du sol entre 2,5 et 30%.

2.6.4 : Effets sur les propriétés du matériau stabilisé

a. Effet sur la densité

KERALI (KERALI 2001)[61], à travers les résultats de ses recherches présentés par la figure 1.23, a constaté que l'incorporation du ciment dans le mélange du sol améliore la densité sèche des BTC, mais l'amélioration est plus importante avec l'augmentation de la contrainte de compactage.

b. Effet sur la résistance mécanique

L'ajout de ciment à un sol augmente nettement sa résistance à la compression (AKPOKODJE, 1985; Walker, 1995) [38]. Bahar et al (Bahar,2004), ont montré que la résistance à la

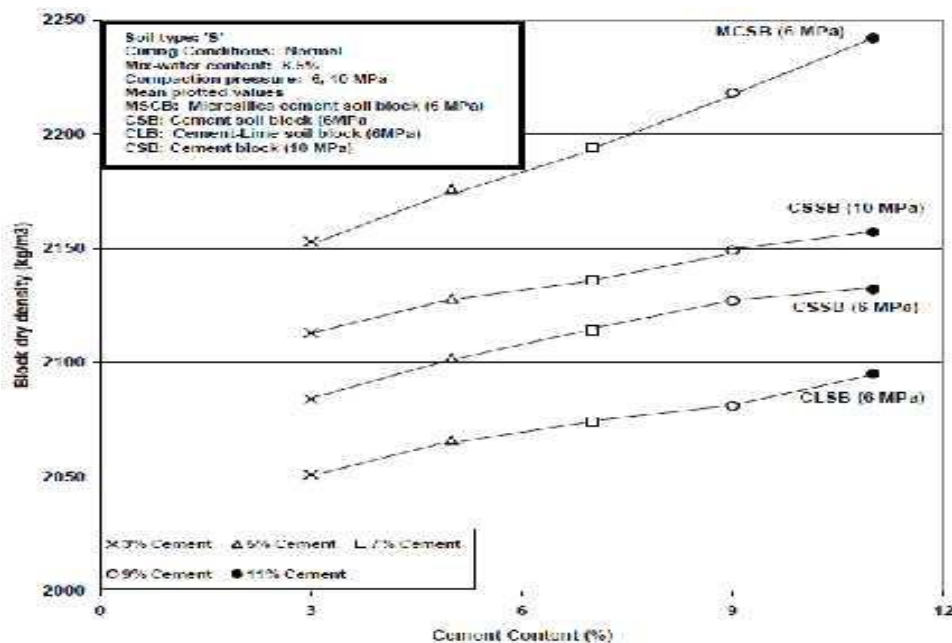


Figure 2.3 : Effet de la teneur en ciment et la contrainte de compactage sur la densité sèche du bloc de terre comprimée (KERALI, 2001).

C. Effet sur la résistance mécanique

L'ajout de ciment à un sol augmente nettement sa résistance à la compression (AKPOKODJE 1985; Walker, 1995). Bahar et al (Bahar,2004), ont montré que la résistance à la compression et à la traction par fendage augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment (figure 1.24).

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

AKPOKODJE a examiné l'effet sur la résistance du sol avec différents teneurs en ciment (AKPOKODJE, 1985) [38]. Il a constaté que la résistance à la compression augmente avec la teneur en ciment selon une fonction linéaire. La figure 1.25 montre les résultats pour les trois types de sols : un loam argileux, un loam sableux et un loam limoneux. La résistance à la compression à l'âge de 7 jours pour le loam sableux est la plus élevée, avec des valeurs de 13 et 2,7 MPa pour 2% et 6% de ciment respectivement. La figure 1.25 montre également que la résistance du loam sableux augmente plus rapidement en fonction de la teneur en ciment que celles du loam argileux et du loam limoneux. Des effets similaires sur la résistance de sol stabilisé ont été constatés par CROFT (1968) [39] et Walker (1995).

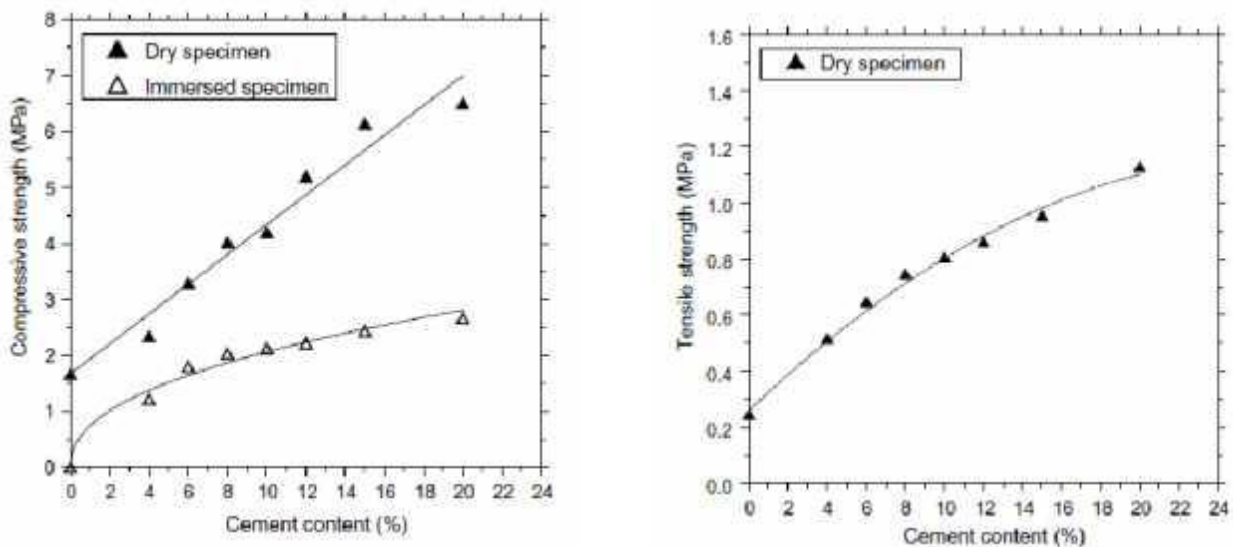


Figure 2.4 : Effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression et à la traction par fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment (Bahar, 2004)[40]

L'amélioration de la résistance à la compression peut, suivant le sol traité, évoluer différemment avec la teneur en ciment (DOAT 1979)[36] et (AKPOKODJE, 1985).

L'effet principal de la stabilisation au ciment est l'insensibilisation à l'eau du matériau par un traitement au ciment bien conduit, on peut obtenir des résultats très satisfaisants. Une étude réalisée par VENKATRAMA et al (VENKATRAMA 2005) [41], a montré que la résistance à la compression humide et la résistance à traction des blocs de terre stabilisée au ciment augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment, et qu'en doublant la teneur en ciment la résistance à la compression humide augmente par 2,3 fois (figure 1.26).

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

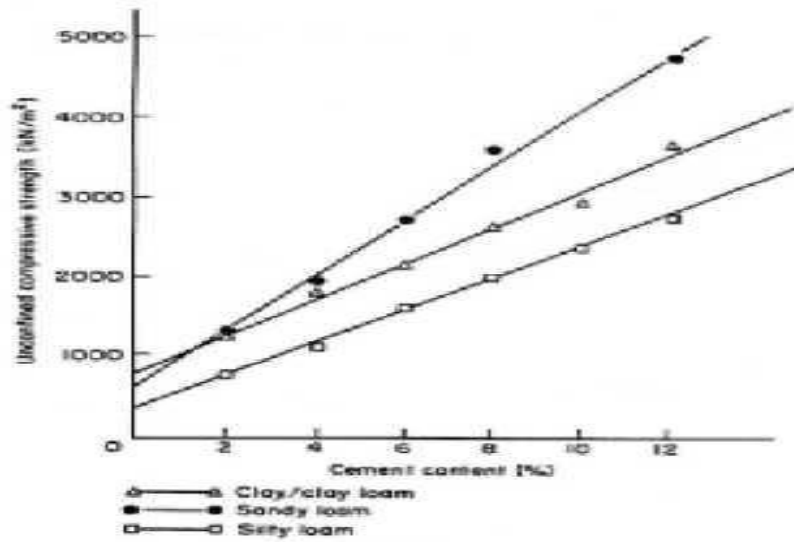


Fig. 2.5: Variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en ciment pour 3 types de sols en zone aride australienne (AKPOKODJE ,1985)

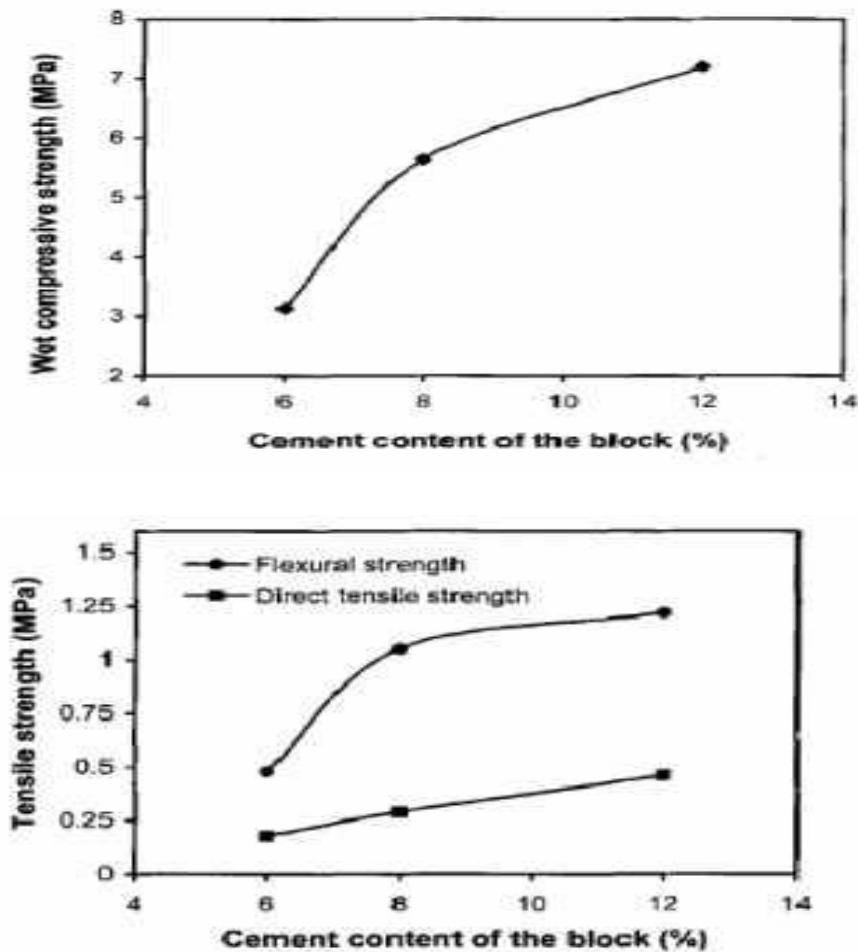


Fig. 2.6 : Variation de la résistance à la compression humide et la résistance à la traction des blocs de terre en fonction de la teneur en ciment (VENKATRAMA 2005).

Du BTS et comprimé

d. Effet sur l'absorption totale

Les résultats de l'étude de MEUKAM montrent que l'ajout du ciment a un effet bénéfique sur l'absorption d'eau du bloc de terre stabilisée. La figure 1.27 montre la variation du taux d'absorption d'eau en fonction du temps a différentes teneurs en ciment. L'auteur a constaté que le taux d'absorption de l'eau diminue avec l'augmentation de la teneur en ciment (MEUKAM 2004)[42].

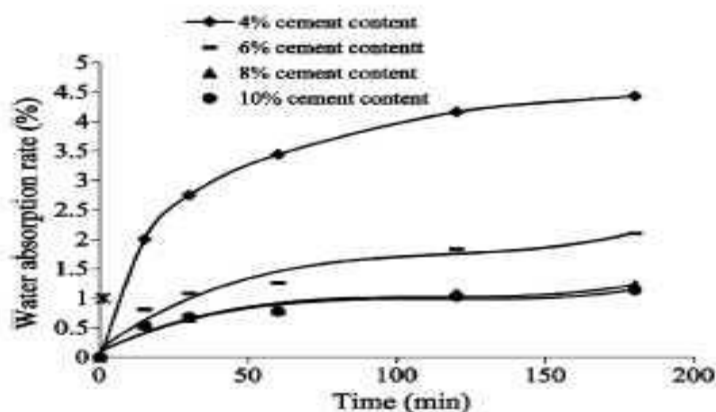


Fig. 2.7 : Variation du taux d'absorption d'eau dans le temps du bloc de terre comprimée stabilisée avec différentes teneurs en ciment (MEUKAM, 2004).

2.7 : Stabilisation à la chaux

2.7.1 : Généralités

L'utilisation de la chaux dans la stabilisation des sols est connue depuis l'antiquité Elle a été utilisée comme stabilisant de la chaussée par les Romains et d'autres civilisation anciennes (Jarrige, 1989) [43].

La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Chimiquement, c'est un oxyde de calcium avec plus ou moins d'oxyde de magnésium, mais la désignation usuelle de chaux peut englober différents états chimiques de ce produit. On les distingue notamment dans le langage courant par rapport à leurs utilisations dans la construction :

- La chaux vive est le produit direct de calcination du calcaire, principalement de l'oxyde de calcium (CaO). $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (5)
- La chaux aérienne, ou chaux éteinte, est obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau. Elle est constituée surtout d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2). Elle est dite « aérienne », car elle réagit avec le CO_2 de l'air $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{chaleur}$ (6)
- La chaux hydraulique contient en plus des silicates et des aluminates, car elle provient de calcaires argileux. Elle est appelée « hydraulique » parce qu'elle durcit en présence d'eau.

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

Tous les types de chaux peuvent être employés, mais la préférence est donnée néanmoins aux chaux aériennes qu'aux chaux hydrauliques (DOAT, 1979). La chaux est surtout conseillée pour les sols contenant une fraction argileuse de 20 % et les sols ayant $IP > 17$ et

$LL > 40$.

La chaux éteinte est beaucoup plus conseillée que la chaux vive, car cette dernière présente deux inconvénients majeurs : conservation difficile à l'abri de l'humidité avant son emploi et manipulation pénible lors des mélanges (Le Roux, 1969)[44] . Le Roux (Le Roux, 1978) [45] a prouvé que pour des sols riches en kaolinite, la résistance (de 2 jusqu'à 90 jours) croît avec la teneur en chaux, mais que pour des sols riches en illite, un optimum de 5 % de chaux se caractérise à moyen et à long terme.

2.7.2 : Mécanismes

Deux phases regroupant quatre types de réactions peuvent se produire lors d'une stabilisation à la chaux ; l'échange cationique, la floculation et l'agglomération des argiles, la carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques entre la chaux, la silice et/ou l'alumine (Choquette, 1988 ;LOCAT 1990 ; Roger, 1996a). Dans un premier temps, les deux premières réactions augmentent la plasticité, la maniabilité ainsi que la résistance du sol et réduisent typiquement l'indice de plasticité tel qu'illustré sur la figure 1. 28. Cette première phase est reconnue comme étant la période de modification du sol.

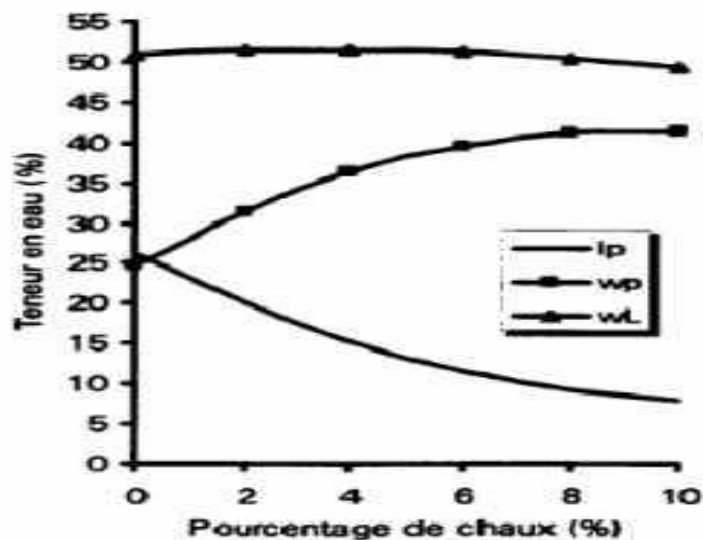


Figure. 2.8 : Variation des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage de la chaux par poids

(Kézdi, 1979)

La deuxième phase est celle de la stabilisation qui englobe le troisième et quatrième type de réaction. Cette période entraîne une cimentation du produit qui augmente progressivement la résistance au cisaillement et la durabilité du sol.

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

Il est reconnu qu'une température inférieure à 13 °C peut décélérer le processus des stabilisation alors qu'une température plus élevée l'accélère (Moore, 1987).[47]

En utilisant de la chaux vive, la diminution de la teneur en eau sera plus forte en raison de la chaleur dégagée par la réaction (réaction exothermique). Quoique la chaleur dégagée parla réaction soit en grande partie responsable de l'évaporation de l'eau, le malaxage peut également provoquer une aération qui, elle aussi, est bénéfique à l'évaporation. Un apport de matériaux secs peut aussi contribuer au processus d'assèchement.

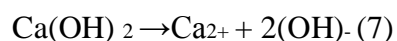
a. L'échange cationique

La première réaction de la phase de modification est celle de l'échange cationique qui initie le processus de stabilisation très rapidement suivie par la floculation et l'agglomération de l'argile. Cet échange de cations est en général relativement très rapide, soit de l'ordre de quelques heures (Prusinski, 1999)[53] . En contact avec la chaux, les liaisons entre les particules argileuses sont modifiées ce qui les rend moins sensibles à l'eau. Certains minéraux argileux telles la montmorillonite et l'illite, sont plus actifs sur le plan de l'échange cationique (Holtz 1991) [54]. Comme nous l'avons mentionné au paragraphe 1.6.3.3, elles sont dotées d'une structure 2 :1, soit deux feuillets de silice tétraèdre et une d'alumine octaèdre. Les deux surfaces de silice possèdent des ions négatifs (anions) et elles sont donc susceptibles d'attirer et de s'agglomérer aux ions positifs (cations) comme l'eau. C'est pour cette raison qu'elles possèdent également un indice de plasticité plus élevé que les autres types de minéraux argileux.

Lorsque la chaux vive est ajoutée au sol argileux une réaction de déshydratation se produit créant ainsi l'hydroxyde de calcium. Cette réaction assèche le sol considérablement.

Ceci entraîne une dissolution de la silice et de l'alumine des particules d'argile (Bergado1996)[55].

L'hydroxyde de calcium se dissocie suivant l'équation ci-dessous :



Les ions de calcium libérés entraînent l'échange cationique des ions de calcium bivalents (Ca^{2+}) de la chaux avec le sodium monovalent (Na^+) et l'hydrogène (H^+) de l'argile.

L'échange cationique peut apporter les changements importants suivants (Rogers 1996a)[50]:

- Réduction de la distance (épaisseur) entre les groupes de feuillets d'argiles réduisant la sensibilité à l'eau ;
- Floculation des particules d'argiles ;

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

- Augmentation de l'angle interne de friction entre les particules agglomérées provoquant une augmentation de la résistance au cisaillement ;
- Diminution de l'indice de plasticité ;
- Changement de texture du sol d'une argile plastique vers un granulat friable.

b. La floculation et l'agglomération de l'argile

On appelle floculation de l'argile, le fait de passer d'un état dispersé, dans lequel l'argile est plastique et sujette à des variations de volume suivant son niveau d'humidité, à un état floculé beaucoup moins plastique et donc plus stable.

L'argile prend donc l'apparence de matériaux granulaires s'agglomérant en grumeaux. La floculation et l'agglomération sont attribuées à un contenu élevé en électrolyte, un pH élevé et la réduction d'épaisseur entre les couches d'argiles par l'échange cationique. Comme l'échange cationique, la floculation et l'agglomération sont relativement rapides où les changements significatifs ont lieu à l'intérieur dans quelques heures (Prusinski, 1999) [53].

Le résultat des deux premières réactions (échange cationique et floculation/agglomération) se reflète par un changement de la relation entre la densité et la teneur en eau. En effet, l'argile en'a plus la même nature avec le changement continu de ses propriétés physiques. Lorsque compacté, un mélange chaux-argile possède une densité maximale inférieure au sol non-traité.

De plus, la teneur en eau optimale augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux (Moore, 1987; Little, 1995[56]). A cet effet, la figure 1.29 illustre bien le déplacement de la courbe de l'optimum Proctor d'une argile traitée à 4 % de chaux.

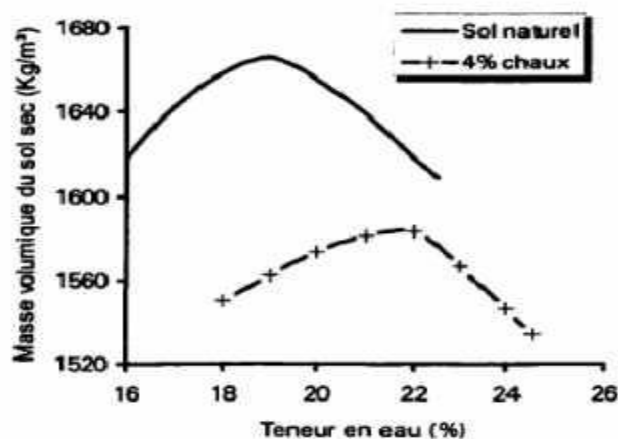
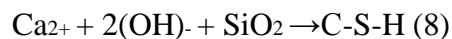


Figure. 2.9 : Déplacement de la courbe Proctor suite à une stabilisation à la chaux (Moore, 1987)

C : La carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques

La carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques sont les deux réactions secondaires responsables de la dite stabilisation. La carbonatation de la chaux est la réaction entre cette dernière et le CO₂ de l'atmosphère menant à la formation de carbonate de calcium (Choquette, 1988). Le calcium augmente le pH du sol augmentant ainsi la solubilité et la réactivité de la silice et de l'alumine présentes dans les particules d'argile (Herzog, 1963). Les ions de calcium s'associent à l'alumine et à la silice pour former des agents de cimentation (équations 8 et 9) (Moore, 1987). Ces produits sont donc des silicates de calcium hydratés (CS-H) et des aluminates de calcium hydratés (C-A-H) (Choquette, 1988).



Les réactions pouzzolaniques peuvent se produire lentement, pouvant s'échelonner sur plusieurs mois et même des années. Durant cette période, le sol gagnera de la résistance en cisaillement et la plasticité sera diminuée.

Pour qu'une réaction pouzzolanique ait lieu, le pourcentage d'argile doit être >20 % et la somme d'argile et de silt doit être >35 % (Broms, 1991)[57]. A défaut d'atteindre ces valeurs, il n'y aura pas suffisamment de silice ni d'alumine disponibles pour les réactions pouzzolaniques. Par contre, même si une stabilisation n'a pas lieu, une modification du sol peut être atteinte par le biais de la floculation et de l'agglomération.

2.7.3 : Efficacité et dosage

L'efficacité de la stabilisation des argiles avec la chaux est difficile à prédire. Le gain en résistance au cisaillement dépend de plusieurs variables : la minéralogie de l'argile, le pH du sol, la présence de sol organique, la capacité d'échange cationique, la grosseur des particules, la surface spécifique des particules, la quantité d'eau, la concentration en chaux ainsi que le temps de mûrissement (LOCAT, 1990 ; Moore, 1987; Rogers et al, 1996b).

Il n'y a pas de règle stricte mentionnant un optimum donné pour un sol entrant dans une classification donnée. L'ajout de 2 à 3 % de chaux provoque immédiatement une diminution de la plasticité de la terre et un brisage des mottes. Pour des stabilisations ordinaires, on pratique en général des dosages de 6 à 12 %. On notera qu'une proportion optimale de chaux existe pour chaque type de terre (HOUBEN, 2006).

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

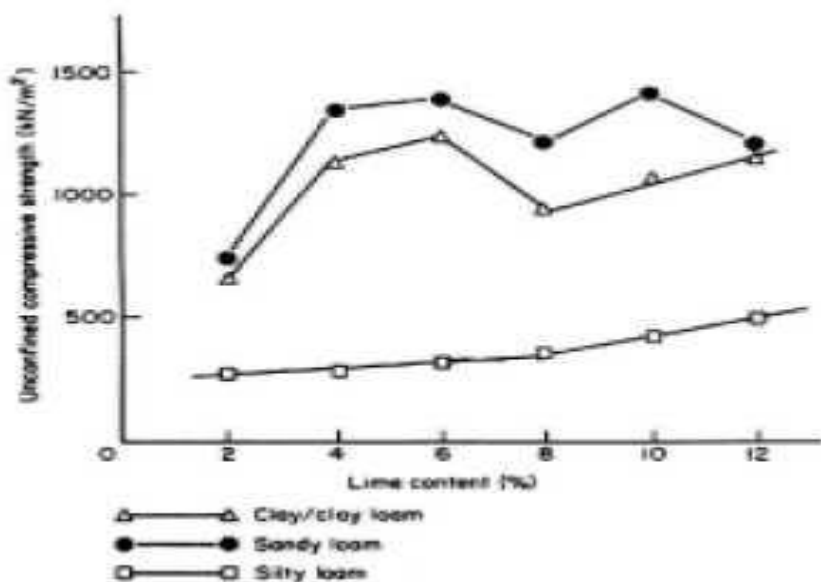
Du BTS et comprimé

Pour analyser l'influence de la minéralogie de l'argile, et à travers la réalisation d'éprouvettes traitées à la chaux et compressées, Toubeau (Toubeau ,1987) a pu suivre l'évolution des réactions sol-chaux, d'une part sous un aspect mécanique et d'autre part, sous un aspect minéralogique et chimique. Cette étude, lui a permis de faire un classement, de favorables au moins favorables dans l'ordre : kaolinite, > illite, >semectite.

2.7.4 : Effet sur la résistance mécanique du matériau stabilisé

La résistance en compression simple augmente considérablement avec l'utilisation de la chaux pour la stabilisation des sols (Akpokodje, 1985;Symons, 1999).Akpokodje (1985) a étudié la stabilisation des sols des zones arides d'Australie en utilisant de la chaux. Il a employé dans cette étude un loam sableux (59% de sable, 28% de limon, 13% d'argile), un loam limoneux (15%, 75%, 10%), et un loam argileux (36%, 27%,37%). Pour le loam argileux et loam sableux, une teneur en chaux de 2% a donné une résistance à la compression de 7 jours d'environ 0,7 MPa, mais en augmentant la teneur de 4%, la résistance à la compression obtenue est de l'ordre de 1.2 à 1.3 MPa (figure 1.30). Mais des teneurs en chaux plus de 12 % n'ont pas d'effet bénéfique sur la résistance des échantillons. Des résultats similaires sont obtenus par Mill go (Mill go, 2008)[59] (figure 1.31).

D'après AUSROAD (AUSROAD 1998)[63]., des teneurs élevées en chaux ne donnent pas nécessairement des résistances initiales élevées. La figure 1.32 montre la variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et le temps. Il indique que le gain de résistance précoce (résistance à 7 jours) est faible, alors qu'après 28 jours il est significatif.



CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

Figure. 2.10 : Variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux pour 3 types de sols en zone aride australienne (AKPOKODJE ,1985)

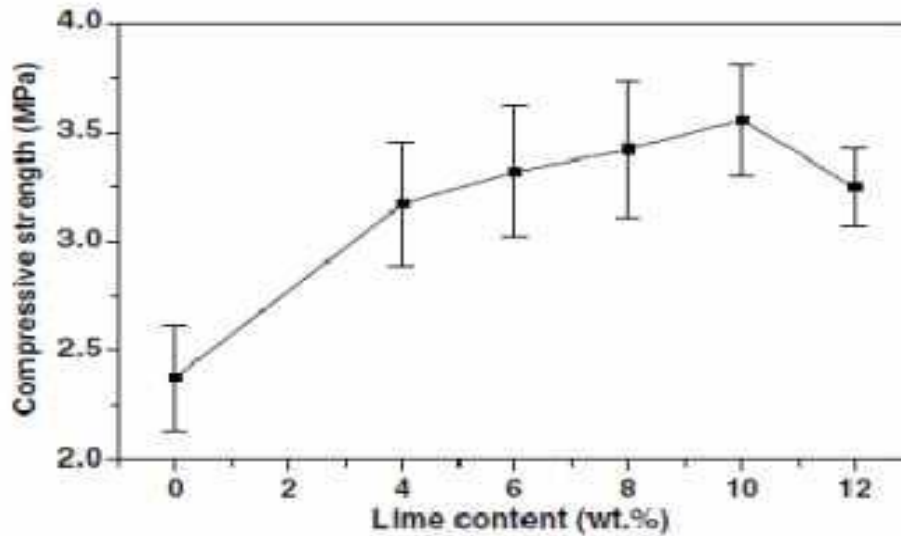


Figure.2 .11:Evolution de la résistance a la compression des briques d'adobe en fonction de l teneur en chaux (Millogo ,2008)

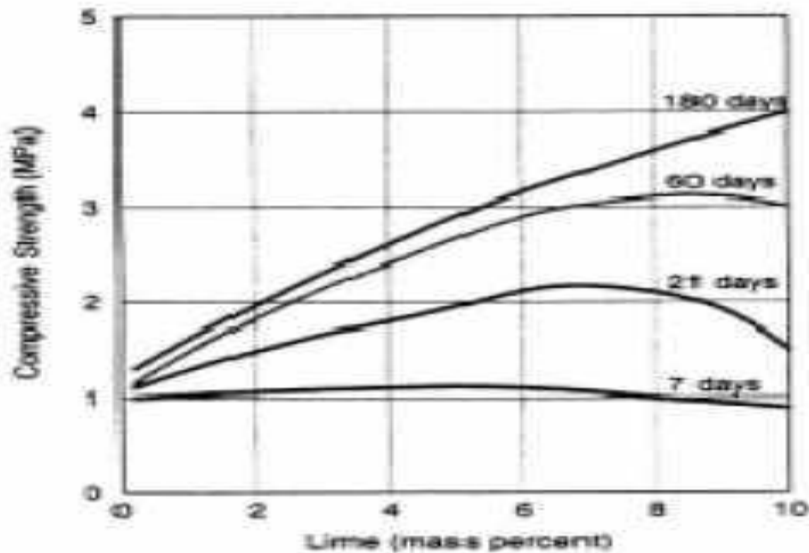


Figure. 2.12: La variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et l'age (AUSROAD 1998).

A travers une étude menée pour l'amélioration de la durabilité du béton de terre stabilisée Guettala (Guettala, 2003)[61] a constaté une évolution de la résistance a la compression a l'état sec et humide en fonction de l'augmentation de la teneur en chaux. Les résultats montrent à titre d'exemple, que l'augmentation de la résistance à la compression a l'état sec peut être rapide pour de faibles teneurs en chaux de 5 a 8 % provoquant

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

une augmentation de 54 % et qu'ensuite elle évolue lentement de l'ordre de 18 % pour une teneur de chaux de 8 à 12 %, pour la contrainte de 10 MPa.

2.8 : Stabilisation mixte chaux-ciment

Ce type de traitement s'effectue sur les sols trop humides et plastiques. On utilise d'abord la chaux seule a des faibles teneurs puis le ciment. Les deux liants ne sont pas concurrents mais complémentaires. Un traitement préalable à la chaux permet l'assèchement du sol trop humide. Sa floculation en présence de chaux le rend pulvérulent et friable donc plus apte a être mélange ensuite au ciment. Le ciment dont la cinétique d'hydratation est plus grande que celle de la chaux permet l'obtention des résistances mécaniques dès les premiers jours de traitement. Il n'existe pas a notre connaissance d'étude sur les mécanismes qui régissent ce traitement. Apparemment, on peut penser que la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libérée par le ciment en solution joue le même rôle stabilisant que celui de la chaux. Les hydrates formés par la chaux libre et par la portlandite du ciment vont se cumuler à ceux provenant du ciment dissous (Guettala, 2003)[61].

Une étude menée par TESORIERE et al. ((TESORIERE 1981)[60] cité par (Guettala, 2003)) apporté sur la caractérisation mécanique des sols limoneux trop plastiques ayant subi un traitement mixte chaux-ciment. L'évolution observée des résistances a la compression des mélanges sol-liant s'effectue de la façon suivante :

- Pour le traitement du sol par le ciment, il y a une phase unique de développement des résistances. Les mélanges sol-ciment atteignent des résistances proches des valeurs finales dans des temps relativement courts $\sigma_{28} = 1,863 \text{ MPa}$ pour une valeur finale de 2,1 MPa ;
- Quant au traitement à la chaux, le même phénomène observé par Perret (Perret, 1977) qui a remarqué l'évolution en fonction du temps des paramètres chimiques et mécaniques s'effectue en trois phases a 25° C . Le passage de la première phase à la deuxième se vérifie à vingt et un (21) jours. Pendant la deuxième phase de stabilisation, il y a un développement sensible et progressif de la résistance qui conduit à des valeurs théoriques maximales supérieures à celles que l'on peut relever dans la stabilisation au ciment ;
- Pour le traitement mixte chaux-ciment, l'évolution des résistances se fait comme dans le cas de la stabilisation à la chaux en trois phases :

A court terme, les mélanges mixtes permettent des performances supérieures à celles des mélanges binaires à dosage égal. Il existe un dosage optimal en chaux, dépendant de l'humidité de traitement et

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

pour lequel on obtient les meilleurs résultats. Si le dosage en chaux est à peine suffisant pour corriger la plasticité du sol, l'accroissement des résistances parait limité comme pour les mélanges sol-ciment.

2.9: Chaux éteinte

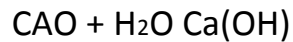
La chaux est obtenue à partir d'un calcaire très pur, qui, porté à une température d'environ 1000 degré, et suite à une réaction chimique se décompose en chaux vive (CAO) et en gaz carbonique.

Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte

Mémoire de fin d'étude Master Génie Civil Seick Omar SORE 2012-2013 Page 5



Après cuisson, la chaux vive garde le même aspect physique mais sa masse volumique apparente devient plus faible. Elle réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de chaleur, puis se transforme en une poudre blanche appelée **chaux éteinte** (Ca(OH) 2).



Du BTS et comprimé



Figure 2.13: fabrication de la chaux éteinte

Chaux vive : **CAO** nom chimique « **Oxyde de calcium** »

Chaux éteinte **Ca(OH)₂** nom chimique « **Hydroxyde de calcium** » (C. Abdelkhalek et all, 2012)

Les effets de la chaux sont très dépendants de la nature des terres mais la comparaison avec les effets du ciment, dans de nombreux cas, pourra être tentée. On observe que la chaux réagit beaucoup plus avec des argiles du type montmorillonites qu'avec des argiles KAOLINIQUE, réduisant la plasticité des montmorillonites et n'ayant que peu d'effet sur la plasticité des kaolinites. Par contres donne des meilleurs résultats de compression avec les argiles de type KALOPEUVENT ne contenir que 60% de chaux active (le reste étant constitué d'incuits ou de surcuits), il faudra augmenter ces dosages.

Cependant la chaux éteinte que nous utilisons dans notre formulation est un résidu issu de la production du gaz d'acétylène produit par la société BIG (Burkina INDUSTRIAL GAZ). Ce gaz est obtenu par l'hydratation du **carbure de calcium** de formule brute **CaC₂**, il se présente sous la forme de cailloux qui peuvent paraître naturels, bien qu'ils soient produits de manière industrielle. Au contact de l'eau, il produit de l'acétylène et de la chaux éteinte sous forme liquide. Cette réaction est très exothermique :

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé



La phase liquide d'acétylène sera transformée en gaz après passage au séchoir à basse pression et la solution concentrée de chaux éteinte quant à elle va être stocké dans une piscine et se transformé en poudre au cours du temps et sous l'action du soleil.

2.9.1 Résistance à la compression sèche et humide

2.9.1.1: a résultats (D après les résultat seik omar sore)

La résistance à la compression est souvent utilisée pour confirmer le potentiel des blocs stabilisés. Les résistances à la compression des blocs sèches et humides à l'âge de la maturité de 45 et 70 jours sont présentées respectivement dans les tableaux 10 et 11. Les tracés des données sont aussi présentés aux figures 15 et 16.

Tableau 2.2: Résultat de compression sèche et humide à 45 jours

Compression simple à sec à 45 jours de cure					
Compression simple à sec à 45 jours de cure	Force Maximale (KN)	ECARTYP sur la force	surface (cm ²)	RC (MPa)	ECARTYP
10 % Chaux éteinte	81,67	2,36	196	4,17	0,12
15 % Chaux éteinte	98,33	2,36	196	5,02	0,12
20 % Chaux éteinte	83,33	2,36	196	4,25	0,12

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

10 % Ciment	212,50	2,5	196	10,84	0,13
Compression simple humide à 45 jours de cure					
10 % Chaux éteinte	50,67	0,94	196	2,59	0,05
15 % Chaux éteinte	59,33	0,94	196	3,03	0,05
20 % Chaux éteinte	49,00	1,41	196	2,50	0,07
10 % Ciment	175	1,23	196	8,93	0,06

Tableau 2. 3: Résultats compression sèche et humide à 70 jours

Compression simple sèche à 70 jours de cure					
Désignation	Force Maximale (kN)	ECARTY sur la force	surface (cm2)	Résiste à la COMPRESSION (MPA)	ECARTY
10 % Chaux éteinte	98,50	1,50	196	5,03	0,08

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

15 % Chaux éteinte	155,00	5,00	196	7,91	0,26
20 % Chaux éteinte	132,50	2,50	196	6,76	0,13
10 % Ciment	212,50	0	196	10,84	0,00
Compression simple humide à 70 jours de cure					
10 % Chaux éteinte	57,50	2,52	196	2,93	0,13
15 % Chaux éteinte	77,50	2,50	196	3,95	0,13
20 % Chaux éteinte	62,50	2,50	196	3,19	0,13
10 % Ciment	175,00	0,00	196	8,93	0,00

2.9.1.2: b Analyse et Interprétation

Les résultats d'écrasement des BTC observé dans les tableaux 10, 11 et figures 14,15 à 45 et 75 jours de cure ont confirmé que la chaux éteinte est un bon stabilisant pour les BTC. À travers les figures ci-dessus on remarque que pour une stabilisation de 10%, 15% et 20% on a des résistances à la compression sèche à 75 jours (45 jours) respectives de 5.03 (4.17), 7.91 (5.02), 6.76 (4.25) MPA et pour la stabilisation de 10% de ciment on a 10.84 MPA. En ce qui concerne les résistances à la compression humides, elles ont été au moins égale à la moitié de la résistance à la compression sèche. Les résultats montrent que toutes les formulations ont abouti à une stabilisation efficace ($RC > 4\text{MPa}$). La valeur optimale de compression est

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

obtenue avec un dosage de 15% de chaux éteinte. Cependant, les résultats d'écrasement à 28 jours de cure des travaux effectués par d'autres étudiants (*B. SAKINE, 2012 et L. A. OUEDRAOGO, 2012*) étaient inférieurs à 4MPa pour toute stabilisation effectuée. À la vue de cela nous pouvons donc conclure que l'augmentation des résistances à la compression est fonction du temps de cure et du taux de dosage. Mais le dosage optimum pourrait se limiter à 15% de chaux éteinte.

2.10: Comportement mécanique à l'état sec (D'après les résultats de these Mr koffi kokole)

2.10.1: Résistance à la compression à l'état sec

Le Tableau IV-1 présente l'ensemble des résultats obtenus sur la résistance en compression sèche. Ces résultats concernent les deux types de sol (N et B), les trois types de liants (ciment, chaux et ovalbumine), les 3 dosages (0, 2 et 4%) et enfin, les deux types de masse volumique sèche (\square_d) : à l'optimum Proctor et à masse volumique constante et égale à celle de l'OPN du sol seul. Afin de mieux apprécier les effets de l'ajout de stabilisant sur les résistances en compression sèche, les résultats du Tableau IV-1 sont présentés sur la Figure IV-2 où ils ne sont plus exprimés en valeurs absolues mais en valeurs relatives : les gains (ou pertes) de résistances en compression des mélanges stabilisés sont divisés par la résistance en compression du sol non stabilisé.

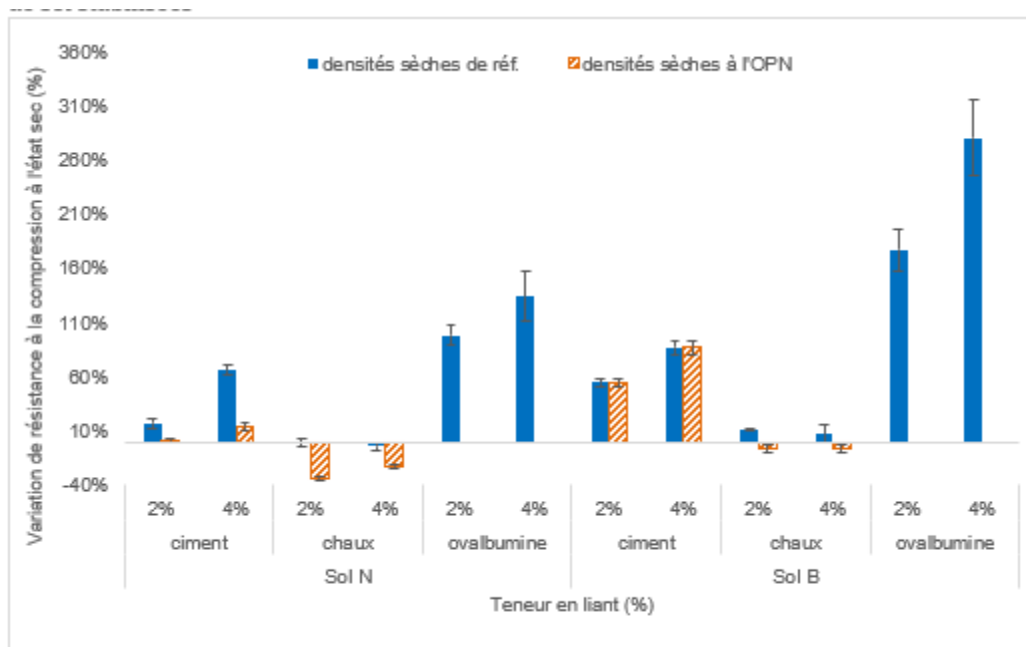


Figure : 2.14 : Variation de la résistance à la compression sèche des sols par ajout des liants et selon la densité de fabrication

Les résultats de la Figure IV-2 montrent que la densité de compactage joue un rôle important sur les valeurs de résistance en compression sèche. En effet, en travaillant à la même énergie de compactage, qui est une énergie arbitraire utilisée de manière standardisée dans l'essai Proctor pour les applications routières, les ajouts de ciment et de chaux induisent des diminutions de densité sèche à l'exception du sol B avec le ciment.

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

Ceci se traduit par une augmentation limitée des résistances en compression sèche dans le cas des ajouts de ciment mais on observe même une diminution des résistances (variation négative) pour cette énergie de compactage avec l'ajout de 2 et 4% de chaux. Ceci est observable pour les deux types de sol mais la diminution avec l'ajout de chaux est encore plus marquée avec le sol N. (Spence et Cook 1983) cités par (Ngowi, 1997) avaient également montré le rôle de la densité sur l'efficacité des stabilisations au ciment. Le choix de travailler à énergie de compactage constante (et égale à celle de l'OPN) est discutable car cette énergie ne correspond pas du tout aux énergies qui peuvent être utilisées pour fabriquer des BTC ni aux densités qui pourraient être obtenues par extrusion par exemple. A l'issue d'une étude beaucoup plus étoffée en faisant varier les énergies de compactage (pressions de fabrication) et bien d'autres paramètres, (Denis Olivier, 1994) était arrivé à la même conclusion. De plus, l'étude des résistances en compression d'éprouvettes fabriquées à l'OPN pose des problèmes d'interprétation car deux effets antagonistes de l'ajout des liants s'opposent : la réduction des résistances liées à la diminution de la densité sèche et l'augmentation des résistances attendues par les actions chimiques des liants (formation d'hydrates dans le cas du ciment, réactions POZZOLANIQUE et éventuellement carbonatation dans le cas de la chaux). Il apparaît donc plus cohérent de comparer les résistances en compression obtenues sur des éprouvettes ayant une densité constante et égale à celle de l'échantillon non stabilisé.

Dans ce cas, l'ajout de ciment augmente de manière importante la résistance en compression sèche. Ces augmentations sont observables sur les deux types de sol mais elles sont beaucoup moins marquées sur le sol N que sur le sol B. Ceci peut s'expliquer par les différences de nature minéralogique des deux sols. Le sol B est constitué de kaolinite qui ne va pas interagir avec le ciment lors de son hydratation alors que le sol N contient des chlorites et de la montmorillonite qui peuvent interagir avec le ciment lors de son hydratation. Les interactions chimiques qui se produisent entre la montmorillonite et le ciment sont complexes et dépendent du type de montmorillonite (notamment de la nature des cations INTERFOLIARES) mais des problèmes de prise et de durcissement du ciment en présence de montmorillonite sont fréquemment observés (TEMIMI, Ben AMOR, and Camps 1998 ; MOLARD,

CHAPITRE2 : Influences du pourcentage du ciment Sur la résistance et la durabilité

Du BTS et comprimé

Camps, and LAQUERBE 1987). De plus, même avec de telles densités, l'ajout de 2 et 4% de chaux a un effet très limité sur les résistances en compression sèches. Pour le sol N, on retrouve globalement les mêmes résistances avec ou sans ajout de chaux avec même, en moyenne, une légère diminution des résistances pour le mélange à 4% de chaux. Pour le sol B, comme dans le cas du ciment, les résultats sont un peu meilleurs qu'avec le sol N mais l'augmentation de résistance avec l'ajout de chaux reste très limitée (10% environ) et il n'y a pas de différence entre 2 et 4%.

2.11- Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques des différentes matières premières qui entrent dans la composition des blocs de terre comprimée fibrés développés dans cette étude. Il s'agit de la terre et de stabilisants : le sable de dune, le ciment, et chaux et les fibres. Les fibres utilisées dans cette étude sont (fibre d'acier) Les données présentées dans ce chapitre sont issues de la bibliographie ou des essais de caractérisation menés lors de notre étude.

Du BTS et comprimé

CHAPITRE 3

Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

Introduction

Depuis quelques années, on assiste à un ressaut intéressant de la recherche sur les matériaux dits traditionnels. On cherche des logements économiques suite à la rareté et au coût excessif des logements pour les pays en développement notamment l'Algérie où les architectes étaient convaincus que la solution était dans le passé. Néanmoins, le problème qui évoque certaines préoccupations est l'amélioration de sa durabilité lorsqu'il est soumis à des conditions climatiques délétères [65,66]. En effet, la nécessité d'obtenir un matériau de base durable dans les constructions des briques de terre comprimée était à l'origine un facteur favorisant les ouvrages ayant une durée de vie indéfiniment longue à l'exigence d'un minimum d'entretien, doit conduire à envisager un traitement qui, tout en assurant résistance mécanique suffisante, tend à augmenter son insensibilité à l'eau [66,67].

Dans le cadre de cette étude, nous avons entrepris de contribuer à l'étude du B.T.C destiné à la construction. Ce choix résulte à l'intérêt économique et thermique que revêt ce matériau. Trois facteurs essentiels interviennent pour augmenter la qualité des briques de terre comprimée sa composition, la teneur en liant et la compression de compactage. Cette amélioration du comportement du sol peut être obtenue de différentes manières granulométrique, addition du liant et compactage. La combinaison entre ces facteurs s'avère plus efficace [68]. Dans ce travail on a étudié la stabilisation par la correction granulométrique qui faite par deux types de sable concassée avec cinq teneurs : 0, 10, 20, 30, 40% du poids du sol

3.2 : Le sable

Le sable est un élément essentiel entrant dans la composition du béton. Son utilisation permet d'assurer une continuité granulaire nécessaire entre le ciment et le gravier pour une meilleure cohésion du béton. La demande sans cesse croissante sur les granulats a provoqué un épuisement rapide des sabliers et une exploitation anarchique des sables de mer causant ainsi un grave préjudice à l'équilibre de l'environnement à proximité des plages en ayant des répercussions directes sur les ressources naturelles, l'érosion des berges d'oued et l'avancée de mer [69].

Le terme sable est généralement utilisé pour désigner un mélange de grains meuble n'ayant aucune cohésion et dont la dimension des grains est généralement comprise entre 0,062 et 5.

Du point de vue géologique, le terme sable recouvre deux aspects : un aspect granulométrique (taille des grains) et un aspect minéralogique (nature minéralogique des grains). Une particule individuelle est appelée grain de sable.

Le sable peut avoir une origine naturelle ou artificielle ; d'origine naturelle, il provient de la désagrégation naturelle de roches au cours de leur processus d'érosion, artificiel, il est obtenu par broyage de roches massives après des opérations de concassage et de criblage, il est appelé aussi sable de carrière, il est caractérisé par des grains aux aspérités marquées. La composition du sable varie d'un endroit à l'autre selon la nature des roches. Dans l'industrie du verre, de la fonderie et d'autres domaines, le sable recherché est celui qui a une grande teneur en silice un bon classement et des grains arrondis ou subarrondis : sont appelés sable siliceux ou sables industriels

3.2.1 : Les différents constituants du sable

Le sable comporte différentes variétés de minéraux qui sont dérivés de l'élément de base le silicium (Si). Ces principaux minéraux sont classés comme suit : silice, silicates (famille la plus abondante dans

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

la nature, plus de 90 % du poids de l'écorce terrestre), argiles et carbonates. Ces dernières se trouvent généralement sous forme de trace dans le sable [69].

Le silicium

Le silicium est un corps pur de symbole chimique Si, de numéro atomique 14, de poids atomique 28,08 g/mol. Il ne se trouve jamais à l'état natif mais constitué sous forme de silice et de silicate. C'est l'élément le plus abondant de l'écorce terrestre (environ 27,2 %) après l'oxygène (environ 60%).

La silice (ou quartz SiO₂)

Le dioxyde de silicium ou silice occupe parmi les oxydes, une place exceptionnelle. Les nombreuses applications industrielles (optique, électronique, production de matériaux réfractaires, etc.).

Les silicates

Les silicates désignent une importante famille de minéraux dérivants de la silice (SiO₂) car ils constituent environ 97 % de la croûte terrestre. Ces minéraux dont le squelette est essentiellement formé par des tétraèdres de silicium [SiO₄] sont additionnés à d'autres éléments tels l'aluminium, le magnésium, le fer, le calcium, le potassium, le sodium etc.

Les argiles

Les argiles regroupent l'ensemble des matériaux dont les particules n'excèdent pas 2 mm de diamètre équivalent. Ils correspondent à des minéraux spécifiques que l'on ne rencontre jamais en particule plus grosse. Ces minéraux sont des silicates d'aluminium hydratés, ils appartiennent à la famille des phyllosilicates qui présentent une structure cristalline en feuillet

Les carbonates

Les minerais de carbonate rencontrés le plus souvent dans les sols sont la Calcite CaCO₃, la Dolomite [Ca Mg(CO₃)₂], la Nahcolite (NaHCO₃), la Trona [Na₃H(CO₃)₂ H₂O] et la Soda (Na₂CO₃ 10H₂O).

3.3. Classifications des sables

On peut classer les sables selon dont [70]:

3.3.1 : La granularité

Permet de séparer les sable en trois catégories sont:

Sables fins ; Sables moyens ; Sables grossiers

3.3.2 :La propreté et la teneur en fines

Elle est appréciée par la valeur de l'équivalent de sable.

3.3.3 : La nature minéralogique

En général, les sables peuvent être classés comme suit : Sables siliceux ; Sables silico-calcaires ; Sables calcaires.

3.3.3 : Leurs provenances

Selon leurs provenances [71], les sables peuvent être classés comme suit :

a) Sable de rivière : il est obtenu par dragage des lits des cours d'eau. Il doit être dur et propre pour qu'on puisse l'utiliser dans les bétons.

b) Sable de mer : il provient des côtes de la mer. Pour l'utiliser dans les bétons, il faut qu'il ne soit pas trop fin et qu'il soit lavé de son sel.

c) Sable de carrière : Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains et les empêche d'adhérer aux liants. Il est donc à proscrire.

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

d) Sable artificiel : il est obtenu par concassage des roches (calcaires durs, gré ...).

Il est souvent plein de filler. Pour qu'il soit utilisable dans les bétons, il faut limiter le pourcentage des fines.

e) Sable de dune : c'est une variété des sables de mer. Il est donc très fin. Les sables de dune se trouvent dans les régions sud du pays. Ils sont situés en zone présaharienne. Les sables retenus sont ceux issus des dunes continentales. Ces dunes sont constituées des nombreux amas de sables fins accumulés dans certaines régions spécifiques du Sahara.

f) Sable recyclé : Obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments

3.4 : Les ressources des sables en Algérie

Les pratiques de l'industrie du béton en Algérie sont conditionnées par les ressources locales et sont relativement routinières. Cependant, l'industrie du béton est confrontée ces dernières années à des changements importants : utilisation d'adjuvants de plus en plus performants, développement de nouveaux bétons (bétons à hautes performances, béton auto-compactant) [26]. Dans notre pays, s'ajoute un bouleversement supplémentaire : l'emploi d'un nouveau type de sable. Trois familles de sables se distinguent :

3.4.1 : Les sables rous siliceux

Dit ronds, sont issus d'un processus naturel d'érosion. En général, ils sont dragués dans les Oueds. Leur usage est courant depuis des années et est même recommandé. Cependant, les réserves disponibles sont proches de l'épuisement ou protégées par de nouvelles règles environnementales en matière de dragage des Oueds. Ce matériau est donc devenu moins intéressant économiquement.

3.4.2 : Les sable de concassage et calcaires

Sont le produit d'un processus industriel contrôlé de concassage, de lavage et de criblage appliqué à des roches calcaires exploitées en carrières, la contrainte du coût de revient élevé, le rends économiquement moins intéressant.

3.4.3 : Le sable de dune

Le sable de dune de l'erg occidental occupe 6% de la surface du Sahara Algérien. La figure I présente la situation géographique des ergs de l'Algérie

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

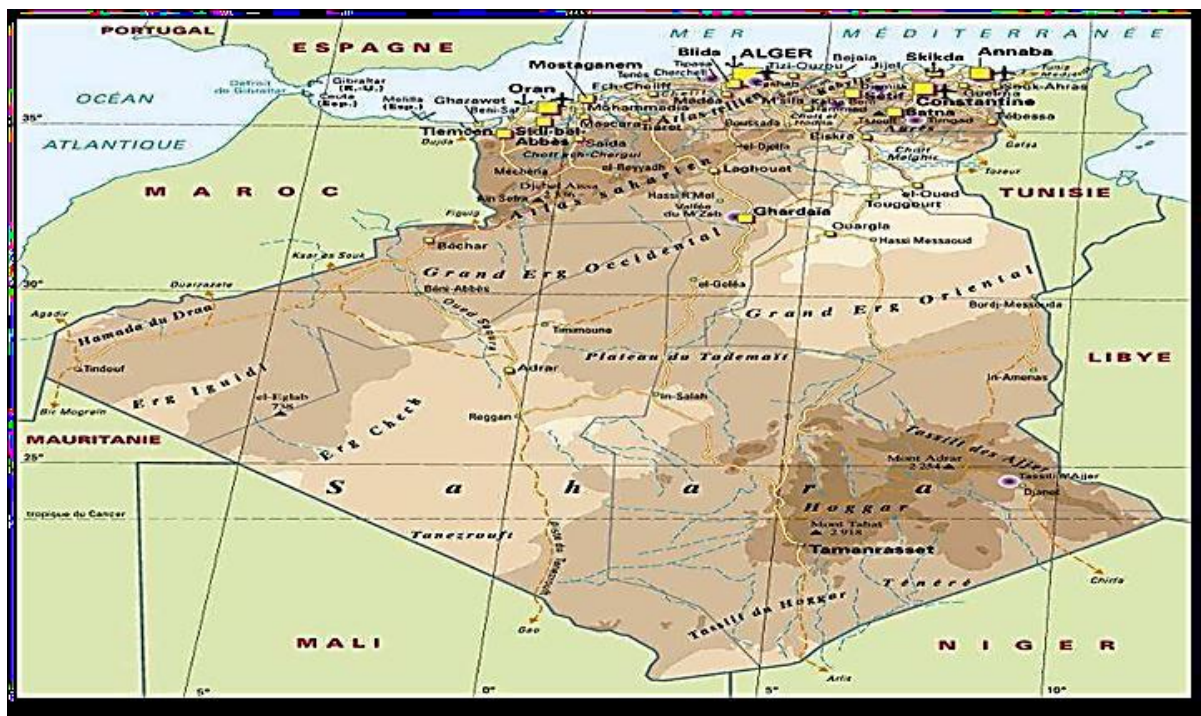


Figure 3.1 : Situation géographique des ergs de l'Algérie [72].

Ce type de sable spécialement est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter. L'utilisation de ce nouveau matériau dans le secteur de construction, peut soulager davantage le domaine d'habitat, et contribuer au développement des régions du sud algérien, très riches en sable de dune [73].

3.5: Utilisation de sable locale dans le béton en Algérie

En Algérie, la plupart des bétons courants sont actuellement fabriqués avec des granulats siliceux alluvionnaires. Face à une demande fort croissante, les ressources potentielles en alluvions, bien qu'importantes, sont épuisables et les gisements sont soumis à des contraintes environnementales de plus en plus rigides faisant croître leur coût d'exploitation déjà élevé [70].

Dans notre pays, malgré l'abondance de sable de dune dans le sud, ce matériau reste inconnu. Sa quantité se chiffre en milliards de m³. Il est disponible dans près de 60% du territoire.

De nombreux chercheurs, dans des thématiques scientifiques diverses, cherchent à exploiter ce type de sable, propre et présent à l'abondance. Son utilisation pourrait être liée à sa très forte teneur en silice, matériau à la base d'applications dans l'électronique et l'optique, ce sable présente aussi un grand intérêt économique et environnemental pour l'Algérie. En effet, la hausse de la demande du sable de construction en Algérie, l'incapacité des carrières algériennes à fournir du sable fin et l'arrêt programmé de l'utilisation du sable de plage, qui conduit à un grand problème écologique et touristique pour l'Algérie [72].

Après des études sur l'effet de la teneur en sable sur la durabilité des sols en béton Compact et stable (BTCS) D'après Guettala (Guettala, 2003)

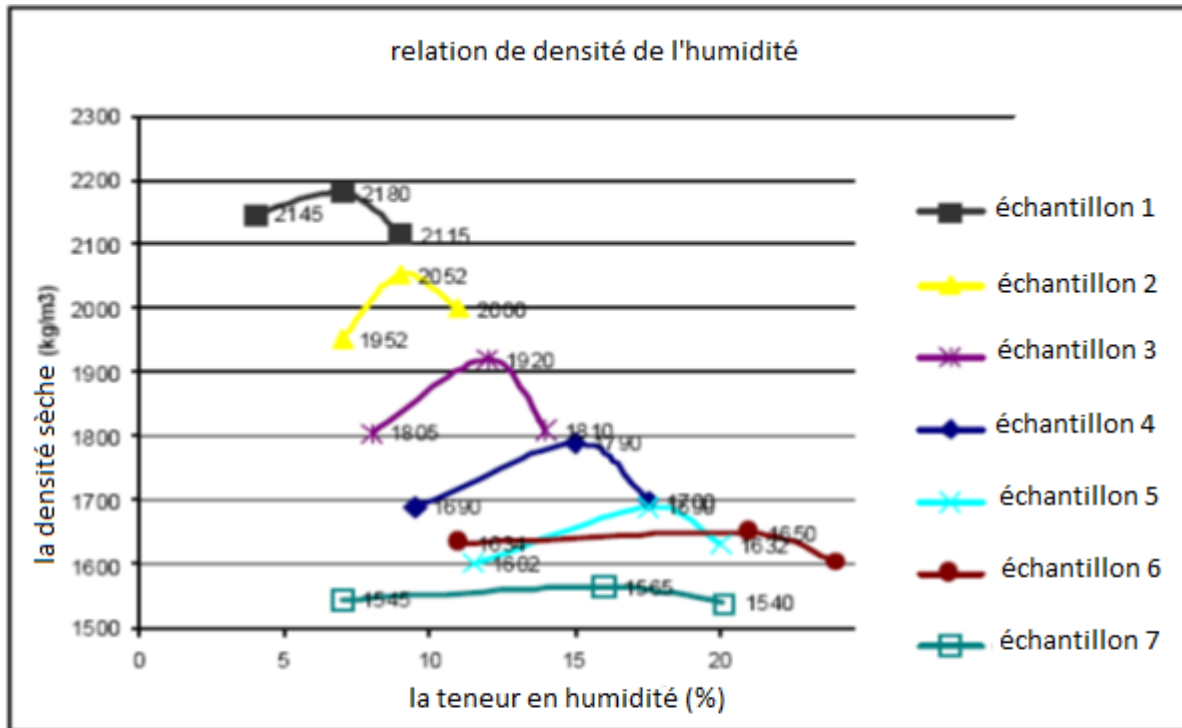
3.6: Influence de la granularité du sol :

Les granularités étroites ne permettent pas d'atteindre une forte compacité : la courbe de compactage est aplatie avec un maximum peu accentué (figure 1.18) (USAGE, 2000). Les granularités

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

étalées, caractéristiques de matériaux dont les grains ont des grosseurs variées, donnent par contre, des courbes de compactage à maximum accentué : la compacité obtenue est meilleure.

Un mélange d'éléments fins et grossiers devrait donc permettre l'obtention de produits compactés plus denses que ceux obtenus avec des sols exclusivement composés d'éléments fins (USAGE, 2000 ; Doat, 1979)[74 .75].



échantillonner No.	description	%	%	%	%
		sable	argile / silt	LL	PI
1	sable limoneux bien calibrés	88	12	16	NP
2	loam sableux bien calibrés	72	28	16	0
3	med-graduée loam sableux	73	27	22	4
4	maigre argilo-limoneux sableux	32	68	28	9
5	loessial silt	5	95	26	2
6	argile lourde	6	94	67	40
7	sable très mal classés	94	6	NP	

Figure3.2 relation de densité de l'humidité

3.7: Influence de l'ajout de sable sur l'optimum Proctor des FAC07

L'ajout de sable dans les FAC07 a deux effets

- La diminution de la teneur en eau optimale de compactage
- L'augmentation de la masse volumique sèche optimale

L'ajout de sable permettra d'avoir des briques plus massives. Dans l'étude bibliographique, nous avons pu voir que la résistance en compression des briques de terre comprimée était intimement liée à la masse volumique sèche de la brique. Dans notre cas, l'ajout d'un sable permettra d'obtenir des briques plus massives et potentiellement plus résistantes en compression. Dans la suite de cette partie, l'ajout du sable aux FAC07 sera étudié sur l'absorption d'eau et surtout sur la résistance à l'abrasion de la brique et le comportement de la brique lors du démoulage. [74.75].

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

3.8: Densification par gradation :

Pour obtenir la meilleure résistance d'une terre, tant aux sollicitations mécaniques qu'à l'action de l'eau, il faut réduire la proportion des vides et multiplier les contacts entre les grains (Houben, 2006). Les terres disponibles peuvent être améliorées par correction granulaire. Il est possible de corriger une teneur trop forte ou trop faible en graves, en sables ou en fines. Un sol trop plastique pourra ainsi être amélioré par un apport de sable, cependant qu'un sol trop peu plastique le sera par apport de fines.[76].

La figure 3. » présente les variations de plasticité (limites d'Atterberg) d'un mélange sable-argile pour différentes proportions de sable et d'argile (Doat, 1979).

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

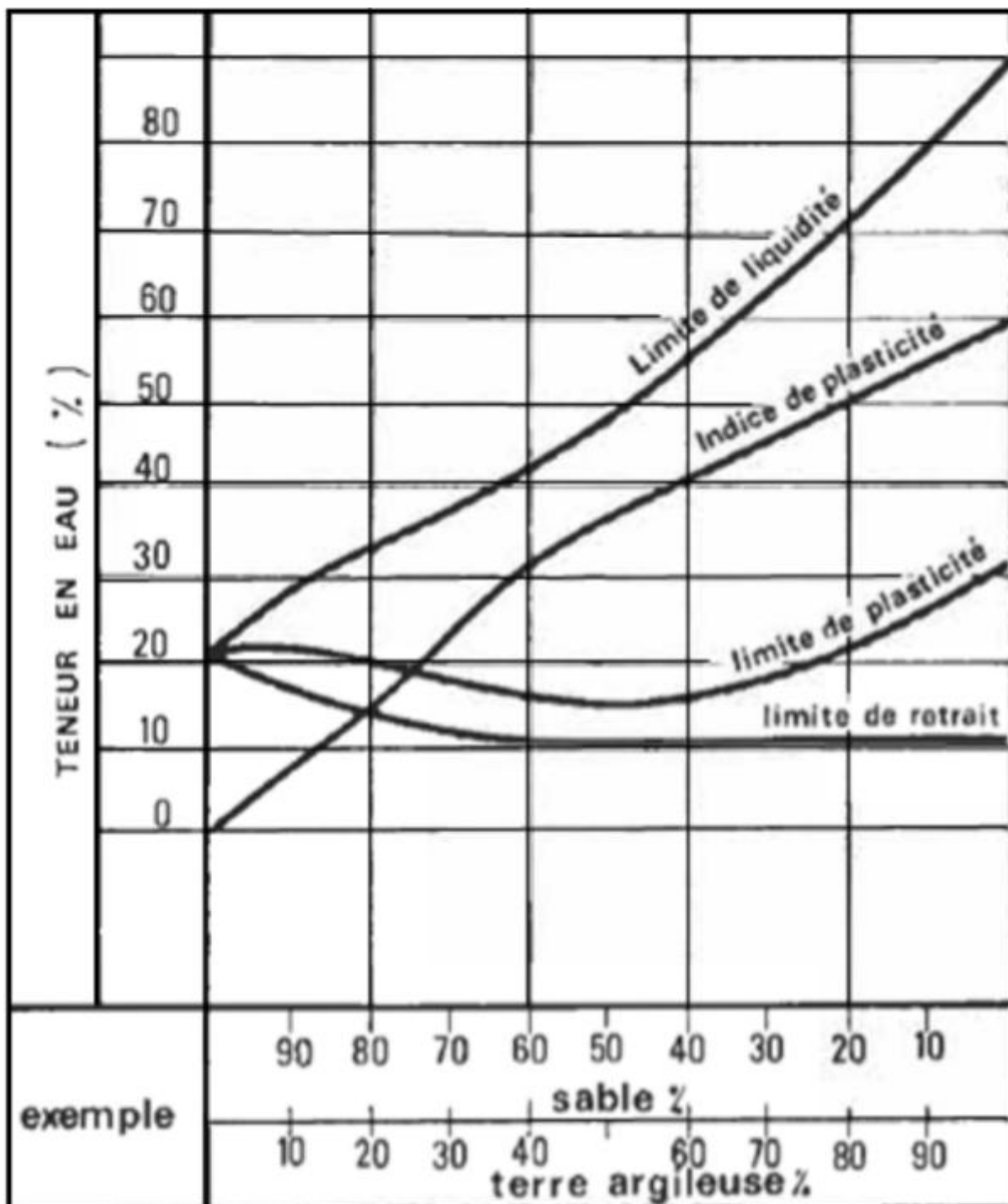


Figure : 3.3: Evolution des limites d'Atterberg avec la teneur en sable (Doat, 1979).

D'après Guettala (Guettala, 2003), les résistances à la compression à l'état sec et humide augmentent en fonction de la concentration en sable (figure 1.20). À titre d'exemple, pour 30 % de teneur en sable, la

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

la courbe montre qu'il y a une évolution de la résistance à l'état sec et à l'état humide de l'ordre de 24% et 28 % successivement.[77].

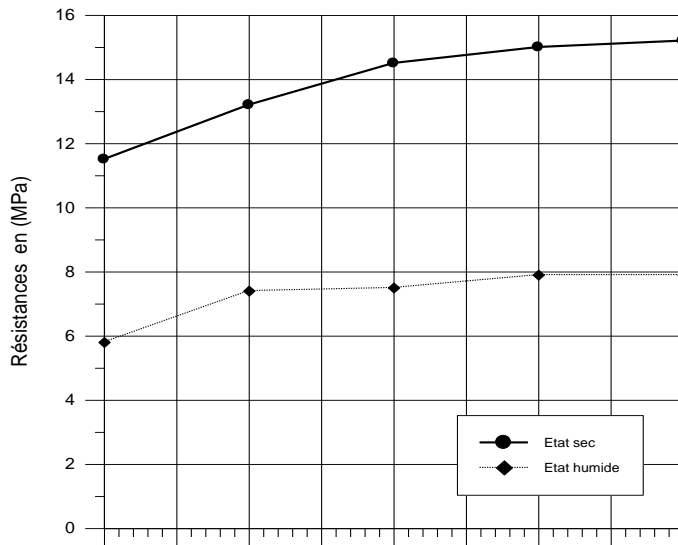


Figure : 3.4 : Influence de la teneur en sable sur les résistances mécaniques en compression du béton de terre stabilisée, avec 5% de ciment et une contrainte de compactage de 10 MPa (Guettala, 2003).

3.9 : Résistance mécanique à la compression

Les figures 3 et 4 montrent la résistance à la compression à l'état sec et à l'état humide. Pour les deux sables nous notons une augmentation de la résistance à la compression à l'état sec et à l'état humide. Plus nous rajoutons le sable au sol plus nous augmentons la qualité d'éléments résistants les résultats similaires aux résultats obtenues par [68].

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

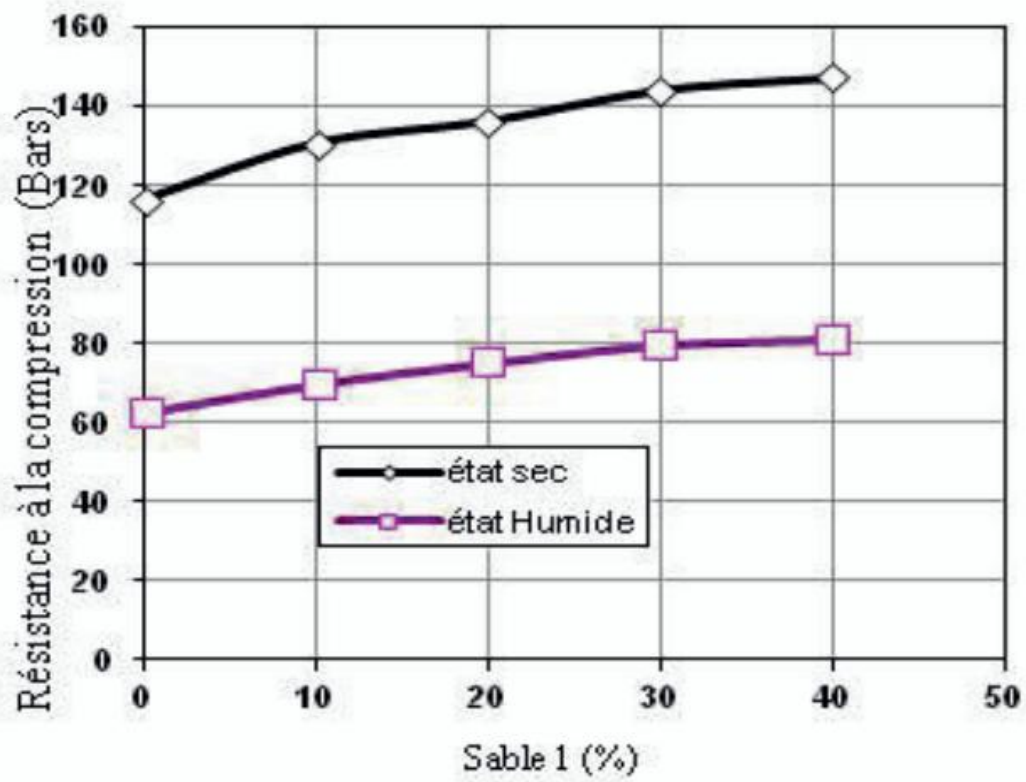


Figure :3.5 : Evolution de la résistance à compression à l'état sec à l'état humide en fonction de la teneur en sable 1

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

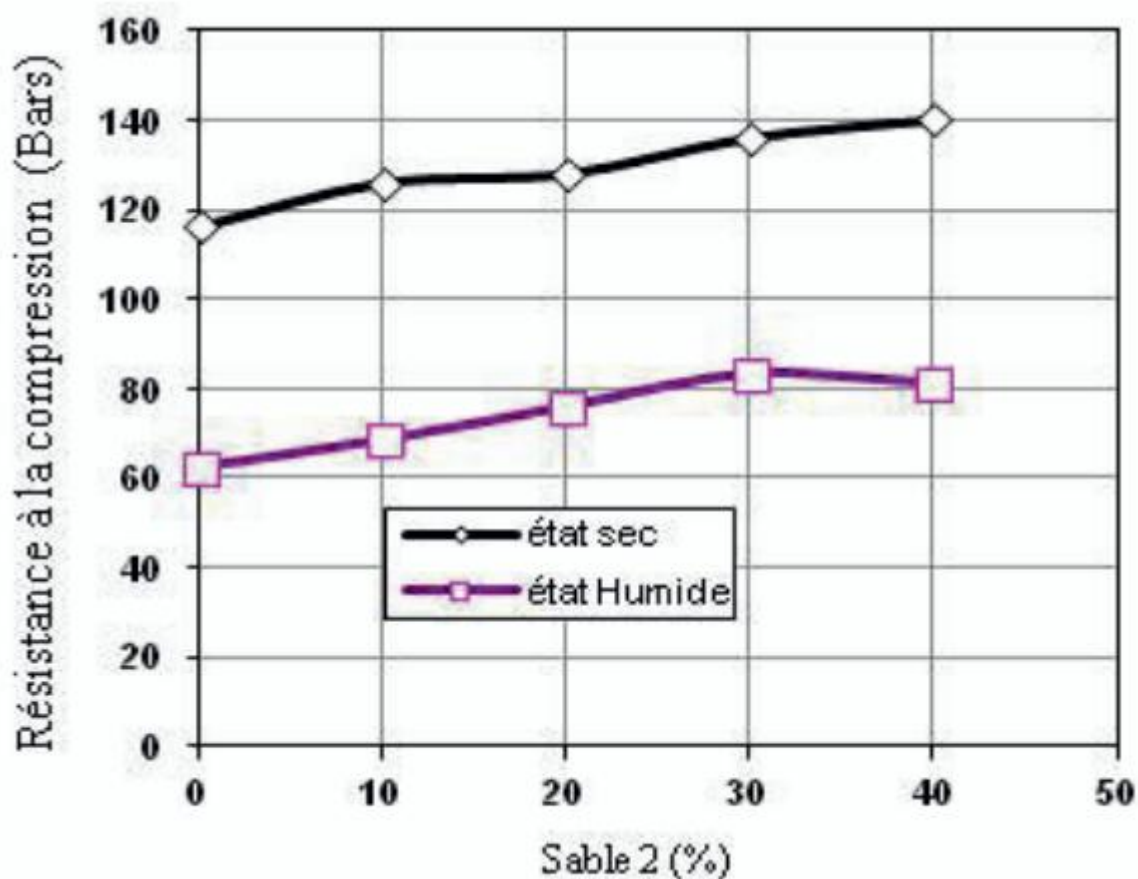
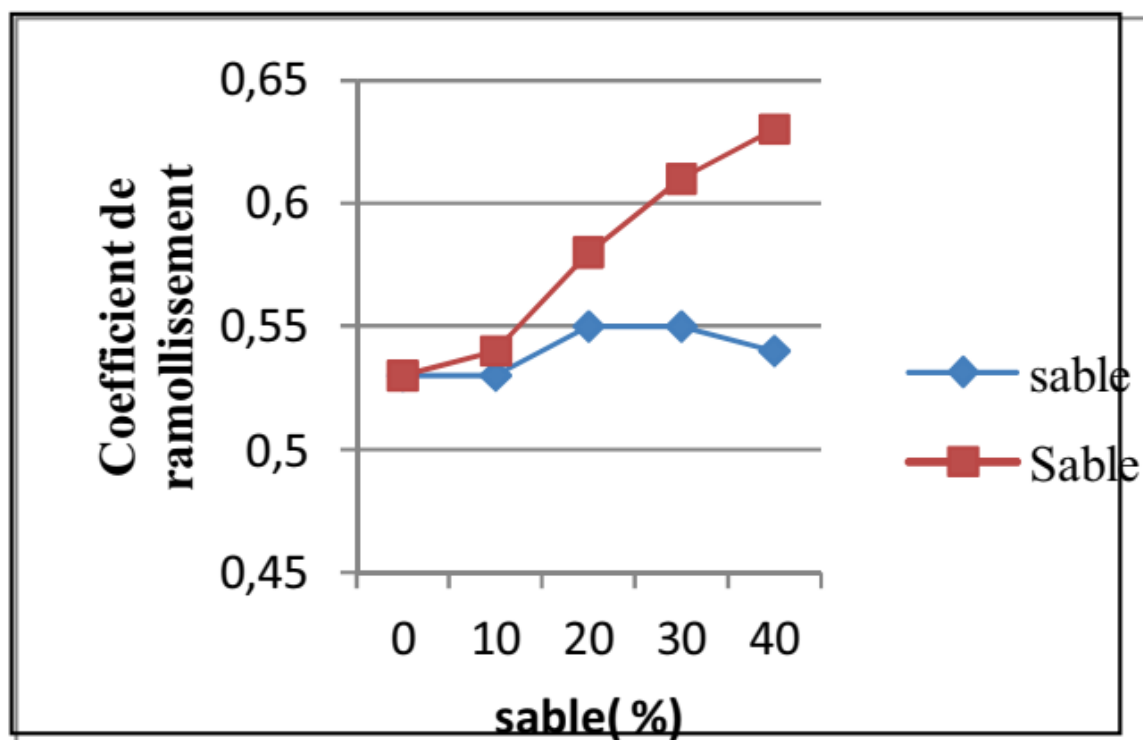


Figure :3.6 : Evolution de la résistance à compression à l'état sec à l'état humide en fonction de la teneur en sable 2

3.10 : coefficient de ramollissement

La figure 5 montre que la concentration de sable 1 n'influe pas énormément sur le coefficient de ramollissement. Ce coefficient varie de 0.53 à 0.55 quand la teneur en sable varie de 0 à 30%, par contre pour le sable 2 on constate une amélioration remarquable varie de 0.53 à 0.63

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé



. Absorption

L'analyse de la figure 6 nous concentration de sable ne présente pas d'écart important avec celles de la terre seule, mais cette concentration a une valeur optimale qui donne une absorption minimale, cette valeur optimale correspond à 30% pour les deux types de sable.

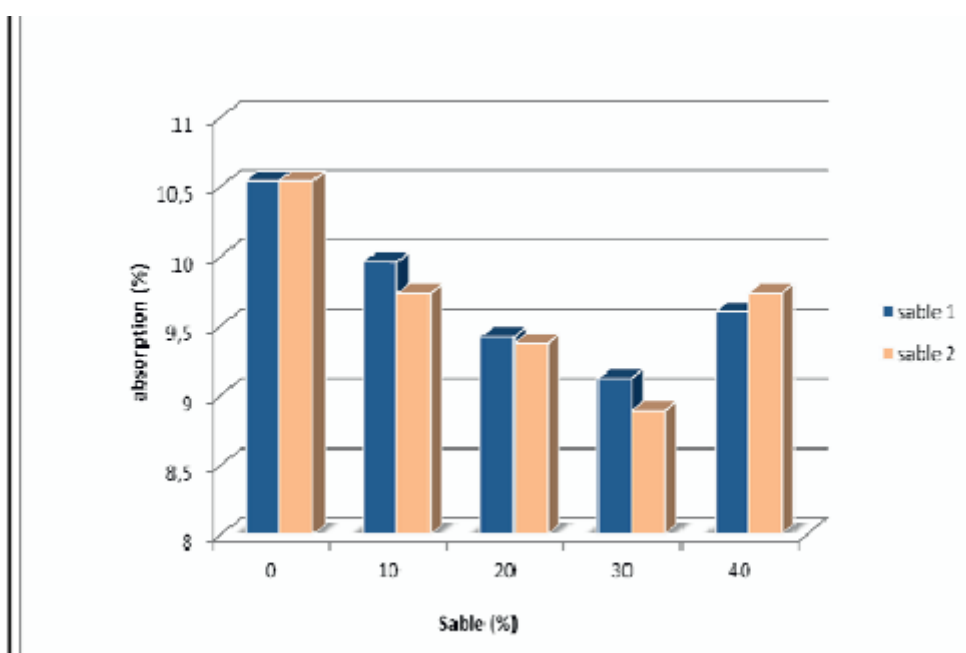


Figure :3.8 :.Absorption total en fonction de la teneur en sable

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

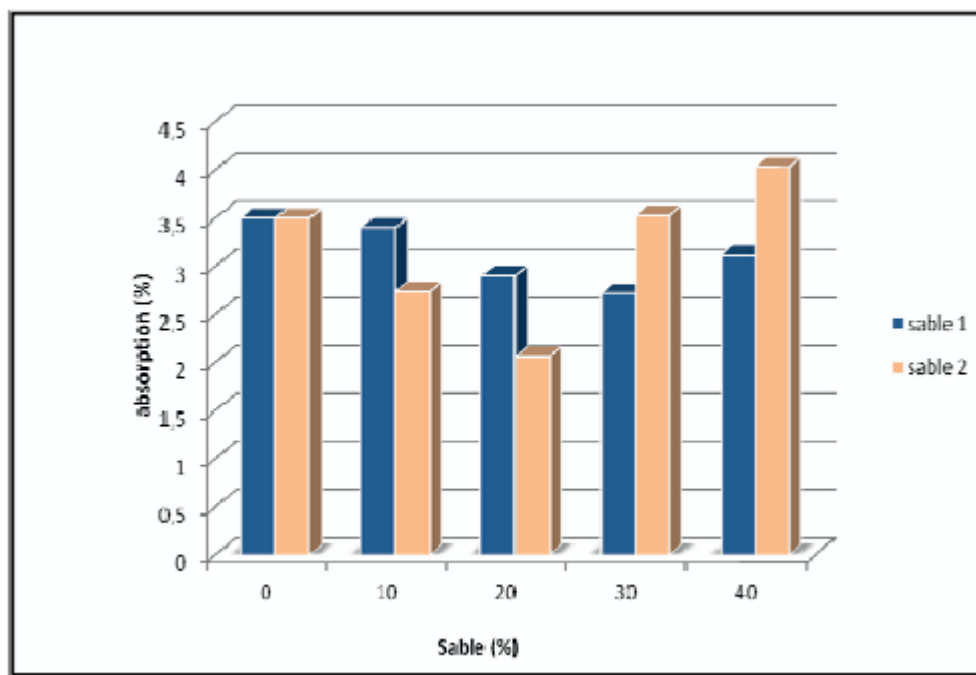


Figure3.9 : Absorption capillaire en fonction de la teneur en sable

3.11 : Durabilité (mouillage-séchage)

Selon les normes ASTM D 559-57 [77], il consiste à faire sécher les éprouvettes jusqu'à poids constant à une température de 60° à 70°C, les éprouvettes sont pesées après le séchage puis soumises à une série de cycles comprenant : - 5heures d'immersion au bout des quelles l'éprouvette est pesée.

- 42 heures de séchage à l'étuve à 71°C. La figure 8 montre que les pertes en poids après douze cycles de mouillage-séchage ne dépassent pas 5% ces pertes en poids diminuent quand la concentration en sable augmente, mais pour le sable 1, il apparaît qu'au-delà d'une concentration de 30% de sable 70% de terre, une augmentation de perte en poids et qui représente une valeur optimale, en revanche, les pertes en poids pour le sable 2 diminues avec un écart très important (de 4,30% avec la terre seul à 1.36 avec 10% de sable, alors une diminution de 3%)

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

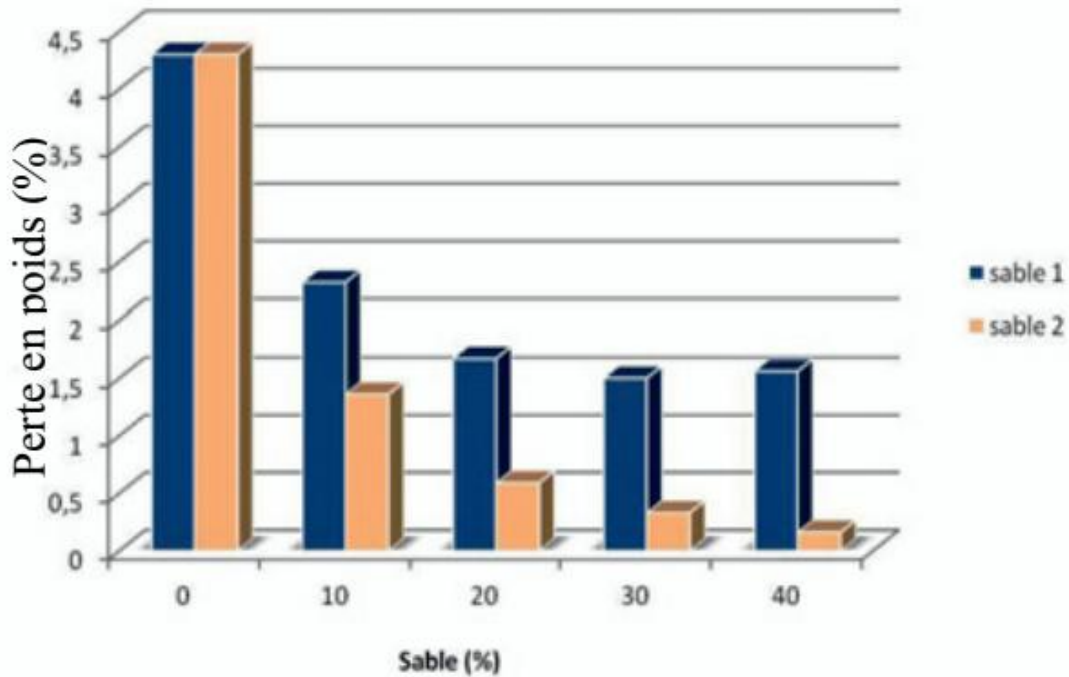


Figure :3.10 :. Pertes en poids en fonction de la teneur en sable stabilisé

D'après(Sehli et Ouldamer)

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

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

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

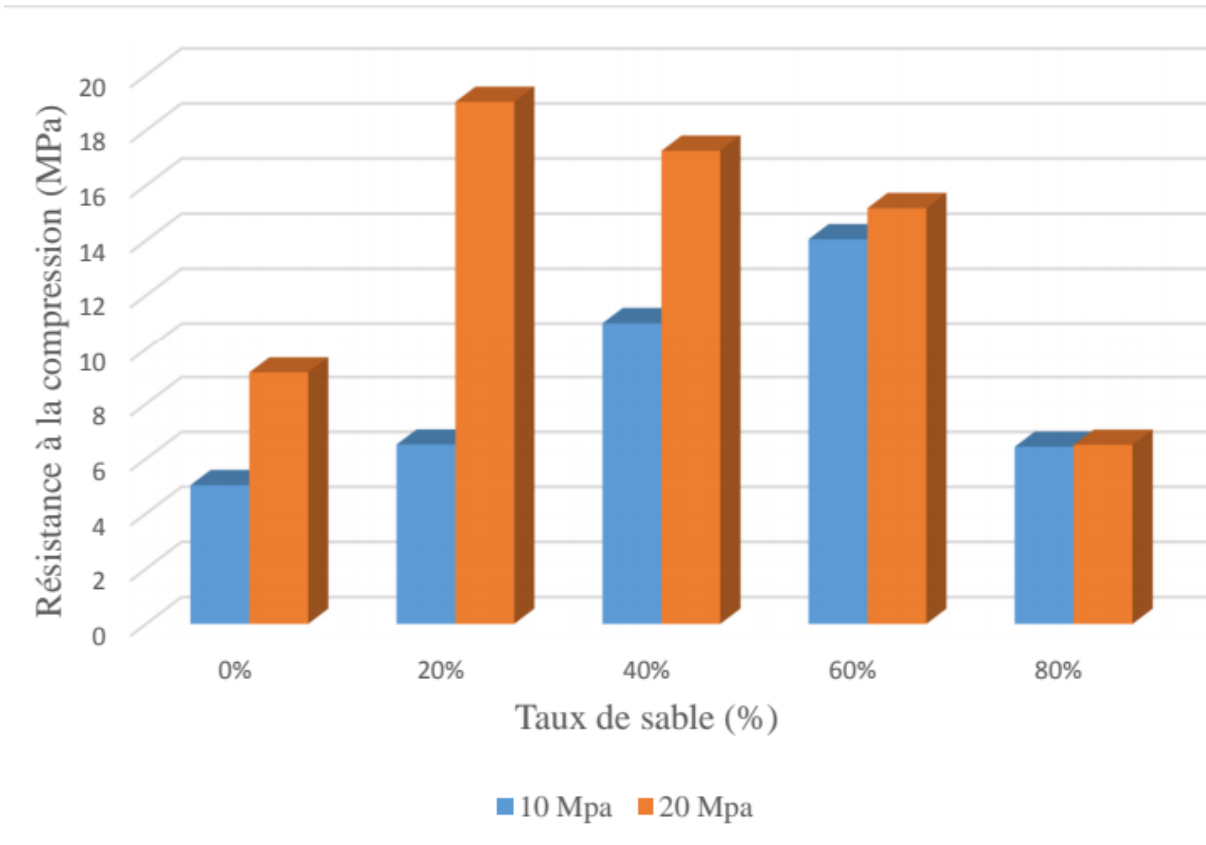


Figure 3.11 : Evolution de la résistance à la compression moyenne à l'état sec en fonction du taux de sable et de la contrainte de compactage

3.12: Porosité volumique

Gallé [78] indique que la porosimétrie à l'eau peut être une méthode plus réaliste que la porosimétrie par intrusion de mercure. En effet, la porosimétrie à l'eau prend en compte la micro-porosité capillaire (c-à-d. les pores dont le diamètre moyen est compris entre 0,8 et 2 μm) ainsi que la porosité des C-S-H (volume interfoliaire) car l'eau peut pénétrer dans des espaces d'une taille de 0,5 μm . A partir du volume de l'éprouvette, on peut alors calculer sa porosité volumique représentant le rapport de son volume poreux à son volume total. Sur une base expérimentale, soit par la pesée hydrostatique d'une éprouvette saturée, on détermine alors le volume total de l'éprouvette (fraction poreuse et solide) et on calcule ainsi sa porosité volumique, ϵ_{exp} à partir de la relation suivante :

$$\epsilon_{\text{exp}} (\%) = ((M_{\text{ss}} - M_{\text{séche}}) / (M_{\text{ss}} - M_{\text{eau}})) \times 100 \%$$

D'après (Sehli et Ouldamer)

3.13: Absorption totale

L'absorption totale de l'eau est une propriété importante qu'on peut utiliser pour le contrôle du volume total des vides dans les BTC [79]. L'absorption totale est obtenue après l'immersion de la brique dans un bac à eau pendant 5 heures.

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

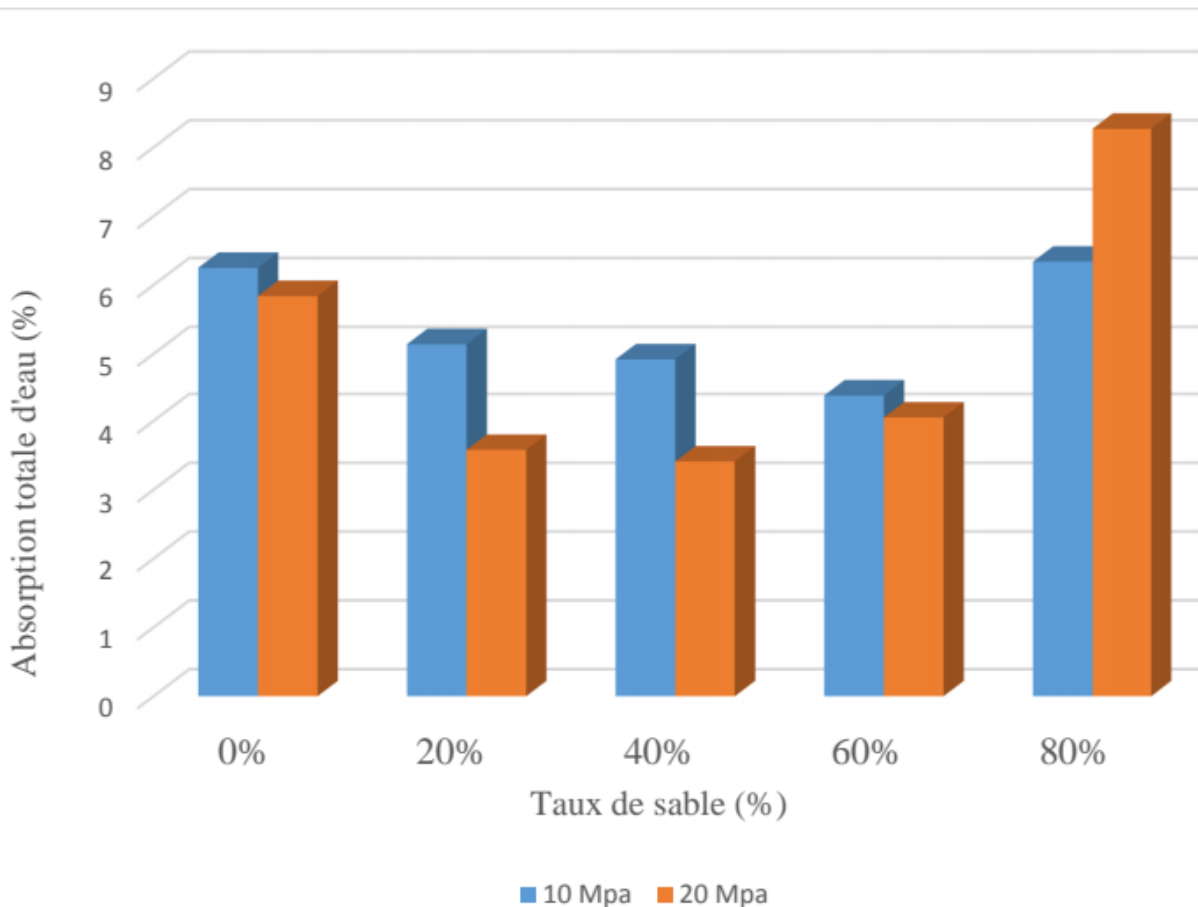


Figure : 3.12 : Effet du sable et de la contrainte de compactage sur l'absorption d'eau. Que l'absorption totale diminue avec l'augmentation du dosage du sable jusqu'à 60%, par contre, elle augmente pour un taux supérieur (80%).

Ce résultat est expliqué par la réaction pouzzolanique entre la silice SiO_2 de l'argile et la chaux hydratée du ciment Ca(OH)_2 qui forme des C-S-H rendant le béton plus compact ; l'augmentation du taux de sable à plus de 60% et par conséquent la diminution de la quantité d'argile entraînent la diminution des C-S-H et un béton plus perméable.

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

D'après : Cédric FLAMENT

3.14: Résistance en compression des BTC à base de FAC07 + sable

La fabrication des briques est réalisée suivant la méthode présentée dans la partie sur les FAC07. Tout comme pour les cylindres, deux masses volumiques sèches de référence sont choisies. La première basée sur l'optimum Proctor et la seconde basée sur une contrainte de compression adaptée à la presse (3 MPa). Les différents paramètres de fabrication des briques sont énumérés dans le tableau ci-dessous (**Tableau 3.1**)

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

	M	V	s	Teneur en Masse des constituants [g]		
	[kg/m ³]	eau [%]	FAC07	Sable	E	au
80F20S	1910	11,7	55,3	3,4	1388,5	812,4
80F20S sup	1980	11,7	57,5	6,7	1439,5	841
60F40S	2010	10,4	38,3	9,2	2922,1	730,5
60F40S	2100	10,4	57,9	8,3	3052,7	763,3

Tableau 3.1 Composition des briques à base de FAC07 et sable SS1006

La contrainte de compression de 3 MPa choisie pour obtenir une masse volumique maximale sur la presse à brique est adaptée pour les FAC07. La différence de masse volumique entre les cylindres et les briques est quasi-nulle. L'ajout de sable accroît les résistances mécaniques des BTC. A l'optimum Proctor, l'ajout de 20% de sable augmente légèrement la résistance. Une substitution de 40% de FAC07 par du sable permet d'augmenter la résistance de 20%. Pour une contrainte en compression de 3MPa, la résistance en compression la plus conséquente est obtenue avec l'ajout de 40% de sable avec une résistance proche des 6 MPa contre 5,5 MPa pour un ajout de sable à hauteur de 20%. L'ajout de sable permet de conserver suffisamment de cohésion malgré la diminution de la proportion d'argile en raison de la masse volumique sèche importante du matériau final (**Figure 3.13**).[80].

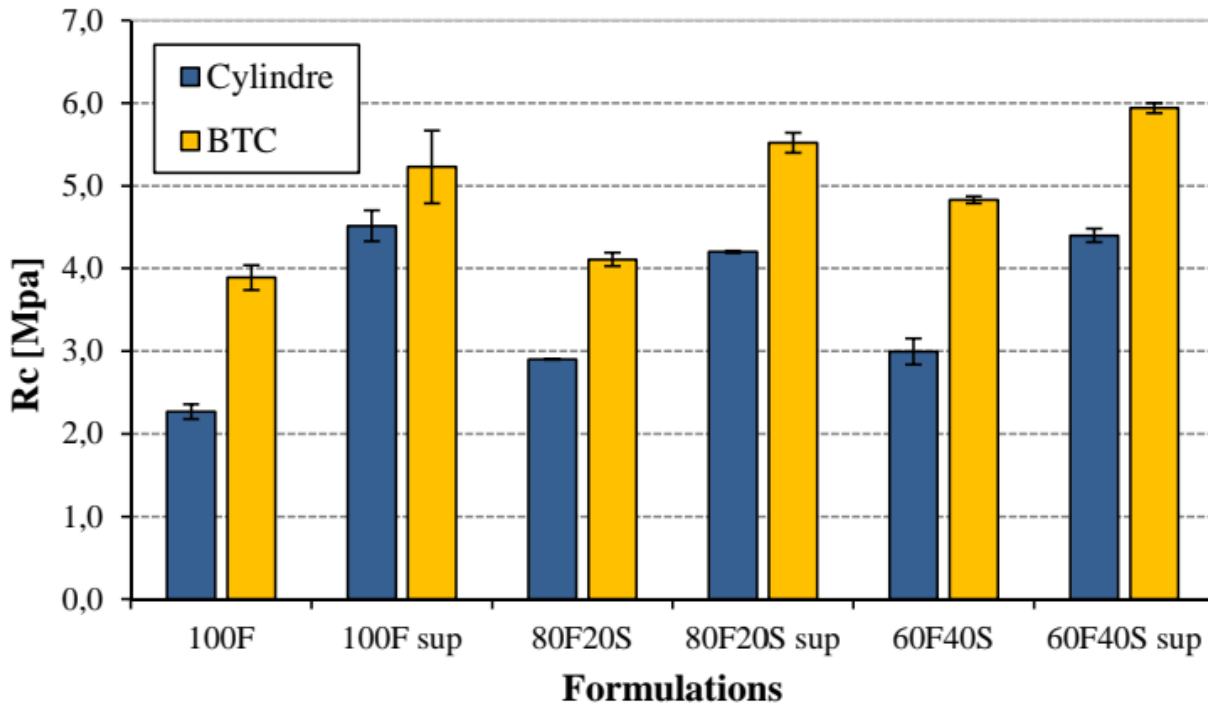


Figure : 3.13 : Résistance en compression des BTC à base de FAC07 et sable SS1006

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

Le rapport de conversion cylindre/brique diffère suivant la formulation et la masse volumique sèche de l'éprouvette. A l'optimum Proctor les rapports de conversion sont de 1,4 et 1,6 pour un ajout de sable de 20% et 40%. Pour une masse volumique plus conséquente ce rapport est identique quelle que soit la proportion de sable (rapport de 1,35).

3.15 : Résistance à l'abrasion des BTC à base de FAC07 + sable

L'ajout de sable permet d'accroître la résistance à l'abrasion des BTC pour les deux masses volumiques sèches. Cette augmentation est plus significative pour les briques fabriquées à l'optimum Proctor. La porosité de surface est plus importante pour cette valeur de masse volumique sèche. Les FAC07 étant de nature fine et poussiéreuse, l'ajout de sable permet de remplacer une partie de matière poussiéreuse par un granulats solide et peu abrasif et améliore la cohésion de surface. Les sillons provoqués par le passage de la brosse sont moins profonds pour des BTC sableuses (**Figure 3.14**).



Figure : 3.14 : Briques à base de FAC07 et sable après le test d'abrasion

Pour une brique comprimée à l'optimum Proctor, l'ajout de 20% et 40% de sable augmente respectivement de 65% et 100% la résistance à l'abrasion. Cette amélioration est moins significative pour les briques plus massives avec un passage de 5,3 cm²/g pour les briques composées en totalité de FAC07 à 6,21 et 6,1 cm²/g pour une ajout respectif de sable de 20% et 40% (**Figure :3.15**).

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

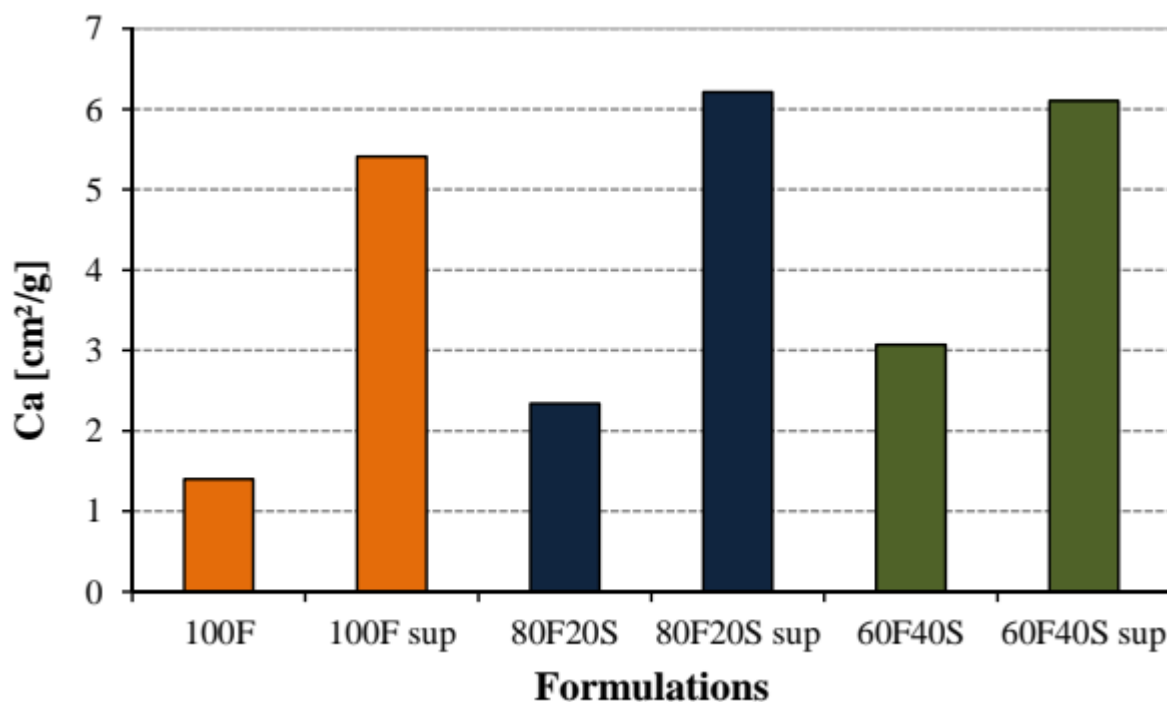


Figure :3.15: Coefficient d'abrasion des BTC à base de FAC07 et sable SS1006

3.16: Absorption d'eau par capillarité des cylindres de FAC07+ sable

L'ajout d'un sable aux fines de lavage n'influence pas le comportement des FAC07 à l'eau. Après 10 minutes d'immersion du cylindre, un dépôt de matière important se dépose dans l'eau d'immersion. L'ajout d'un sable ne diminue pas l'affinité à l'eau des argiles présentes dans les FAC07. En contact avec l'eau, les FAC07 absorbent l'eau par capillarité et se délitent. Le délitement de la matière et le format réduit des cylindres ne permettent pas de mesurer une valeur de résistance à l'absorption d'eau par capillarité (Figure 3 .16) [80].

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé



Figure:3.16 : Cylindres à base de 60% de FAC07 et 40% de sable SS1006 après le test d'absorption d'eau par capillarité

3.17 : Comparaison des résultats

Une différence dans le rapport de Contrainte de compactage a un rôle important plus la contrainte compactage de pression est élevée ; plus la résistance à la compression est élevée.

Tous les résultats précédents quantifient le pourcentage de sable qui donne la meilleure résistance à la compression entre (24% et 28 %) de sable

Même le type de sable a un rôle dans la force de pression. C'est ce que les résultats de Guettala ont montré (sable concassée. Sable concassée tamisé)

CHAPITRE 3 : Effet de la teneur en sable sur la résistance et la durabilité du BTS et comprimé

3.18 : Conclusions

Une fois que des études ont été menées avant de conclure qui :

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

L'absorption totale diminue avec l'augmentation du dosage du sable jusqu'à 60%. L'augmentation de la contrainte de compactage (de 10 à 20MPa) imperméabilise mieux le béton ce qui diminue son absorption d'eau.

CHAPITRE 4

**Influences des fibres et de la contrainte de
compactage sur les propriétés du BTS
comprimé**

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

4.1 Historique et perspective de l'utilisation des fibres

L'idée de l'utilisation des fibres est très ancienne. Les fibres ont été utilisées dans la fabrication des cordes et textiles. Comme élément de renforcement des matériaux de construction traditionnels, la première utilisation des fibres a été observée dans la fabrication des briques argileuses ou dans les mises en œuvre des plâtres, et spécialement par des fibres végétales. La naissance de la fibre industrielle, suite aux développements technologiques, a augmenté les champs d'applications des fibres dans plusieurs domaines. Utilisée dans le domaine des textiles depuis le XIX^e siècle sous forme de fibre de coton, et à partir de l'année 1935 la fibre de Nylon (plastique), et récemment la fibre de polypropylène prédomine depuis l'année 1950 la production des cordes et câbles utilise les fibres de verre et d'acier.[81]

4.2 Introduction

Les bétons de fibre sont de plus en plus utilisés dans le domaine de la construction, on appelle béton, le matériau constitué par le mélange, dans des proportions convenables, de ciment, de granulats (sables, gravier) et d'eau. Le béton armé, le matériau obtenu en enrobant dans du béton des aciers de manière à équilibrer les efforts auxquels le béton résiste mal par lui-même, c'est à dire les efforts de traction ou renforcer le béton pour résister aux efforts de compression s'il ne peut, à lui seul, remplir ce rôle, il est renforcé parfois par des fibres de différentes natures qui donnent des matériaux composites [81]

4.3 Les fibres

Les fibres sont caractérisées par une longueur au moins trois fois supérieure à leur diamètre. On peut dire que sous l'appellation " fibres" se cache une grande famille de matériaux qui a été introduite dans le commerce comme de nouvelles applications. Elles sont classées selon leur origine (naturelles, synthétiques et artificielles), leur forme (droite, Ondule, aiguille, ...et), leur dimension (macro ou microfibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour une application donnée, il faut tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et le mode de performance du composite.

4.4.1 Types des fibres utilisées dans le domaine de la construction

Plusieurs types des fibres sont utilisés dans la construction, parmi eux nous citons :

- a. Les fibres métalliques (acier, fonte) ;
- b. Les fibres organiques (polypropylènes, polyesters, polyamides et polystyrènes) ;
- c. Les fibres minérales (amiante, verre, carbone) ;
- d. Les fibres végétales (Jute, sisal, coir, bois, bambou, palmier) ;
- e. Les fibres animales (poil, laine, soie) Le tableau 1,2 ci-dessous donne quelques caractéristiques des différentes fibres utilisées.

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

Fibre	Diamètre en μm	Densité en (g/cm^3)	Module d'élasticité en GPa	Résistance à la traction en GPa	Allongement de rupture en %
Acier	5-500	7,8	200	1-3	3-4
Verre	5-20	2,6	80	1,5-3	2-3,5
Polypropylène	10,200	0,9	5-10	0,4-0,75	15-25
Amiante	0,02-20	2,5-3,4	200	3	2,3
Polyester	-	1,4	8	0,7-0,85	11-13
Carbone	5-9	1,7-2,0	250-400	2-3	0,5-1,5
Cellulose	14-45	1,5	20-40	0,15-0,5	8-12
Jute	18-2000	1,45	-	0,35	3-4
Sisal	10-50	1,5	15,2	0,8	3
Coir	20-700	1,08	2.8	0,17	37.7

Tableau 4 .1. Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres

D'après, DEBICKI a résumé sur le tableau (4.1) quelques propriétés de fibres industrielles. Il met en évidence la nature très variée de ces fibres [82]

4.4.2 Différents types de fibres

Plusieurs types des fibres sont utilisés dans la construction, elles peuvent être classées par famille :

a. Les fibres naturelles

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine (figure4.1)(Baley, 2013[83])

4 .5 : Les fibres végétales

L'utilisation des fibres naturelles d'origine végétale dans la construction remonte à la période où l'on fabrique des briques renforcées par la paille ou des roseaux. Dans le temps moderne (Depuis l'année 70), le premier composite liant avec les fibres végétales c'était le plâtre.

Plusieurs ouvrages sont réalisés avec du plâtre renforcé de fibres végétales [84] Actuellement le monde connaît de récents développement dans le domaine du renforcement de ciment et béton avec des fibres végétales. Suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, plusieurs recherches sont orientées vers la substitution de l'amiante par des fibres végétales.

4.5.1 : Classification des fibres végétales

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes (figure 4.1): les fibres de feuilles, de tiges, de bois et de surface

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

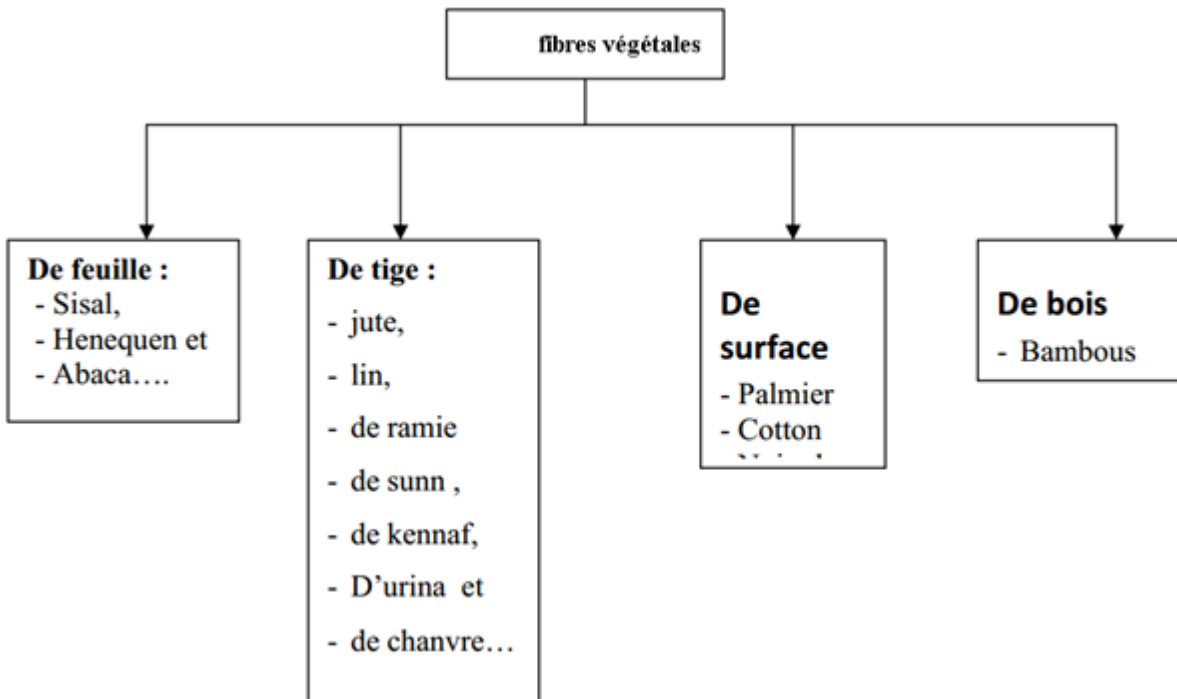


Figure 4.1. Les classes des fibres végétales

4.5.1.1 Fibre de coco

La fibre de coco est une fibre végétale naturelle qui entoure et protège la noix de coco (Figure 4.2). La longueur usuelle est de 50 à 350 mm La fibre se compose principalement de lignine, tanins, cellulose, pectine et d'autres substances solubles dans l'eau.



Figure 4.2 : La noix de coco (a) et les fibres de coco (b) (Sources Internet)[83]

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

La durée de vie de cette fibre est située entre 4 et 10 ans. Elle possède un fort coefficient d'absorption d'eau (entre 130 et 180 %) et son diamètre varie de 0,1 à 0,6 mm (Rowell M et al.2000). Sa résistance à la traction varie entre 108,26 et 251,90 MPa, son allongement est très élevé (de 13,70 à 41 %) (TolêdoFilho et al. 2000). Ces fibres conservent 80 % de leur résistance à la traction après 6 mois au sein d'une argile. Leurs propriétés permettent également de diminuer le gonflement du sol.[85]

4.5.1.2Fibre de sisal

Le sisal est une fibre lingo-cellulose dont le coefficient d'absorption d'eau est de 60 à 70% d'eau et le diamètre de 0,06 mm à 0,4 mm (Figure I-11). Les fibres sont extraites à partir de feuilles larges entre 6 et 10 cm et de longueur entre 50 et 250 cm (Mishra et al. 2004).

(Ghavami et al. 1999) a montré que l'ajout de 4 % de fibre de sisal ou de coco confère au souline ductilité et augmente lentement la résistance à compression,[86]

Prabakar et Sridhar, (2002) ont utilisé des ajouts de 0,25 % ; 0,5 % ; 0,75 % ; 1 % en poids de fibres de sisal avec 4 longueurs différentes (10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm) pour renforcer le sol. Les résultats montrent que la résistance au cisaillement est maximale (66 MPa) pour une longueur de 20 mm et pour une teneur de 0,75 % . [87]



a) Plante de sisal

b) Fibre de sisal

Figure 4.3 : Les plantes de sisal (a) et les fibres de sisal (b) (Sources Internet)[83]

4.5.1.3 Fibre de palmier



a) Palmier

b) Fibres de palmiers

Figure4.3 : La plante de palmier (a) et la fibre de palmier (b) (Sources Internet)[83]

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

Jamellondi et al. (2010) ont montré que les fibres de palmier inter-verrouillent les particules de sol et les groupent dans une matrice unitaire, donc les propriétés mécaniques du sol peuvent être augmentées. Une étude de (Ahmad et al. 2010) a rapporté que l'ajout de 0,5 % en poids de fibre de palme de 30 mm à un sable limoneux augmentait l'angle de frottement interne de 25 % et la cohésion de 30 % par rapport à un sol naturel.[88]

4.5.1.4 Fibre de jute

Le jute est cultivé dans les régions tropicales dont les principaux producteurs sont l'Inde et le Bangladesh (Figure 4-4). Les fibres de jute sont extraites de l'écorce de plantes de jute qui a 2,5 m de long et 2,5 cm de diamètre. Cette fibre est cultivée pour la production textile poreuse qui est majoritairement utilisée pour la filtration, le drainage et la stabilisation du sol.



Figure 4.4: Les plantes de jute (Sources Internet)[83]

Le jute semble être le plus efficace parmi les fibres sélectionnées (paille, chanvre et jute) puisque le jute améliore à la fois la ductilité et la ténacité du matériau adobe avec une diminution légèrement en résistance en compression. La teneur en jute optimal est de 2 % en masse et la longueur optimale est de 2 cm, (Islam et Iwashita, 2010).[94]

4.5.1.5 La paille

La paille de blé et d'orge est une plante à récolte bisannuelle largement cultivée dans le monde entier (Figure I-14). C'est la fibre la plus couramment utilisée dans la bauge (Hamard et al. 2016). Au cours du XIXe siècle, l'évolution des pratiques agricoles a généré un excès de paille qui a pu être utilisé dans la construction en bauge comme une source matériau locale (Petit jean, 2003 ; Weismann et Bryce, 2010).[92] [90]

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

Le rôle des fibres à l'intérieur des murs en bauge est de (Hamard et al. 2016) :[89]

- Faciliter de mélanger et de manipuler,
- Accélérer le processus de séchage,
- Distribuer des fissures de retrait dans toute la masse du mur,
- Améliorer la cohésion et la résistance au cisaillement du mur,
- Améliorer la résistance aux intempéries, renforcer les angles des parois.

Bouhicha et al. (2005) ont montré que l'ajout de paille d'orge dans la terre permettait de réduire le retrait et le temps de durcissement et d'améliorer les résistances à la compression, à la flexion et au cisaillement. Abtahi et al. (2010) ont montré que les fibres de paille d'orge permettaient d'obtenir une résistance au cisaillement du sol plus importante qu'avec les fibres

Kenaf. [91] [93]

4.5.2 Propriétés des composites à matrice cimentaire renforcés par des fibres végétales

Les études réalisées sur les matériaux composites à base de fibres végétales brutes mettent en évidence une modification du comportement mécanique du composite. Alors que la matrice cimentaire pure présente un comportement élastique linéaire fragile, les éprouvettes de composite fibré testées en flexion trois points conservent leur intégrité même au-delà de la charge maximale, et continuent à supporter une charge significative dans la partie post-pic (Aziz, 1984).

L'auteur (Sedan, 2007) distingue trois phases dans le comportement du composite fibré :

- phase I : comportement quasi-linéaire proche de celui de la pâte de ciment seule, dans cette phase les efforts sont majoritairement repris par la matrice ;
- phase II : à partir de F^* apparition de la première fissure de la matrice, puis reprise de la charge par les fibres, qui, d'après l'auteur, limitent la propagation de la fissure par un effet de pontage ;
- phase III : au-delà de f_{max} , diminution contrôlée de la charge contrairement à la pâte de ciment seule qui casse brutalement. L'auteur associe cette phase à une rupture progressive des interfaces fibres/matrice suivie d'un déchaussement des fibres.

L'incorporation de fibres végétales modifie peu la charge d'apparition de la première fissure, qui est liée principalement aux propriétés de la matrice, mais une fois la fissure apparue, les fibres limitent la propagation de la fissure (Aziz, 1984).

Le passage d'une matrice fragile à un composite fibre ductile présentant un comportement post-pic adoucissant est relevé par tous les auteurs. Cependant, cette modification du comportement ne va pas forcément de pair avec une amélioration de la résistance en flexion (Kriker, 2005), c'est pourquoi le paramètre prépondérant pour rendre compte de la contribution de fibres dans le comportement du composite est sa ténacité qui représente l'aptitude du matériau à absorber une certaine quantité d'énergie avant la rupture (ACI, 1996).

4.6. Les fibres animales :

La fibre la plus importante et la plus utilisée est la fibre de laine connue pour ses qualités de bon isolant thermique, son pouvoir absorbant élevé (16-18%) et son élasticité importante (45%) (Feughelman, 1997). Les fibres animales sont classées selon leur provenance, on note essentiellement :

- Poils : la laine (obtenue par la tonte de moutons), alpaga, angora, chameau, cachemire, ...
- Sécrétions : soie (Bombyx Mori), soie sauvage, fils d'araigne.

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

4.7. Les fibres de caoutchouc

Les fibres de caoutchouc sont extraites des roues des voitures et ce, pour une utilisation dans plusieurs domaines tels que la construction voir figure 4.5



Figure.4.5.Fibres des pneus de caoutchouc

Les fibres de caoutchouc utilisées dans cette étude ont été obtenues à partir de matériaux polymères ouest. La ferraille Fibre de caoutchouc. Ces fibres se reproduisent en éliminant les vieux pneus en bandes de 150 mm et plus petites, puis Broyé en ferraille. La longueur des fibres de caoutchouc utilisées était comprise entre 20 et 40 mm Leur L'épaisseur et la largeur étaient d'environ 0,25 mm et 0,35 mm respectivement **figure 4.5**. Les spécifications du produit de Les fibres polymères sont données dans le tableau (1.4) suivant :

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

Tableaux4.2. Propriétés physiques et techniques des fibres

Type de polymère

Longueur (mm) 20-40 mm

Section rectangulaire

Epaisseur (mm) 0,25 mm

Largeur (mm) 0,35 mm

Densité ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) 1,15

4.7.1 Le caoutchouc

La poudrette de caoutchouc est obtenue par broyage de pneus usagés non réutilisables (PUNR) ou de déchets de rechapage. (Figure 4.6)

Le broyage peut être mécanique ou cryogénique (fragilisation du caoutchouc à froid). S'il est cryogénique, la poudrette obtenue est de meilleure qualité mais présente un coût plus élevé.

La poudrette est utilisée dans la fabrication des revêtements de sols industriels et sportifs, la réalisation de matériaux d'isolation phonique, de membranes anti fissures à usage routier ou de membranes anti vibrations destinées aux plates-formes ferroviaires, de roulettes... Elle est également employée comme liant dans les bitumes. L'enrobé possède ainsi un pouvoir drainant important évitant le phénomène d'aquaplaning, le bruit de roulage s'en trouve réduit et le processus de vieillissement ralenti.



Figure4.6.: Aspect des poudrettes de caoutchouc

4.7.2 Poudrette de caoutchouc

Afin d'assimiler les termes utilisés dans l'industrie du pneu, voici un bref historique sur le développement des caoutchoucs naturels et synthétiques. Le caoutchouc naturel provient de plantes diverses, la source la plus importante étant l'arbre à gomme (Heveabrasiliensis). Le caoutchouc synthétique, quant à lui, est produit chimiquement à partir de produits pétrochimiques. Les matériaux bruts utilisés dans la fabrication des caoutchoucs synthétiques sont les suivants :

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

- Isobutylène.
- Isoprène.
- Styrène.
- Butadiène.

En 1994, au niveau mondial, la quantité de caoutchoucs utilisés pour les applications industrielles se situait autour de 12 800 kilotonnes, dont 35% étaient constitués de caoutchouc naturel, et 35% de caoutchouc synthétiques. Le 30% restant consiste en des composites destinés à des applications spécialisées, un sujet qui ne sera pas abordé dans ce document. La figure (4.7) illustre sommairement l'histoire du caoutchouc. Acrylonitrile

4.7.3 Les caractéristiques des granulats de caoutchouc

D'une manière générale, il est possible de caractériser un granulat de caoutchouc par un certain nombre de propriétés (voir figure (1.30) et tableau (1.5)):

- Taille de la particule.
- Distribution de taille des particules.
- Morphologie des particules.
- Composition chimique des particules.
- Energie de surface des particules



Granulés de 4 à 5mm Granulés de 2 à 4mm Granulés de 0.5 à 2mm Granulés inférieur à 0.5mm

**Figure 4.7. Les différents diamètres des granulats des pneus usés après broyage.
(Technique et procédés KAHL pour le recyclage des pneus usagés)**

Ø20 mm	4 à 6 mm~ 25%	2 à 4 mm~ 25%	0 à 2 mm~ 45% à 50%
Ø16 mm	4 à 6 mm~ 20%	2 à 4 mm~ 20%	0 à 2 mm~ 55% à 60%

Tableau 4.3 : Distribution granulométrique pour les trous de filière de Ø20 mm et Ø16 mm(Technique et procédés KAHL pour le recyclage des pneus usagés).

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

4.8. Fibres artificielles :

4.8.1 Les fibres de verre :

Le verre utilisé comme renfort dans les composites se présente généralement sous forme de fils (simples, tressés, tissés...). Bien que les fils de verre ainsi obtenus (verre textile) n'aient trouvé une application dans l'industrie textile qu'aux environs de 1930, c'est avec l'avènement des premières résines thermodurcissables que le verre textile trouve son domaine d'application privilégié. Il connaît dès lors d'incessants développements dans le vaste domaine des matériaux composites auxquels il apporte ses propriétés mécaniques, physiques, chimiques ou électriques différents. La composition des fibres de verre est constituée principalement de silice, de chaux et d'alumine.

4.9. L'effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des sols

La stabilisation des sols a été effectuée depuis l'antiquité. Par exemple, les Mésopotamiens et les Romains ont découvert séparément qu'il était possible d'améliorer la capacité portante des voies en mélangeant les sols faibles avec un agent stabilisant comme le calcaire ou le calcium sous forme de poudre.

Le principe de la stabilisation du sol est une action de la nature, on peut le voir à travers la présence des racines des plantes dans les sols. Les fibres qui forment ces racines pénètrent et s'orientent dans le sol de façon aléatoire. Ces fibres végétales améliorent la résistance du sol et la stabilité des pentes naturelles (Kaniraj, 2003). Par conséquent, le concept de stabilisation par des fibres a été reconnu il y a plus de 5000 ans. Par exemple, les civilisations anciennes mélangent la paille dans le matériau terre afin de créer des blocs de construction renforcés (Abtahi, 2009). Il existe plusieurs exemples de renforcement du sol comme la Grande Muraille de Chine (premier exemple de terre renforcée en utilisant des branches d'arbres comme éléments résistant à la traction (Rao, 1996).

Dans l'histoire moderne de la stabilisation des sols, le concept et le principe du renforcement des sols a été développée par Vidal (Vidal, 1969). Il a démontré que l'introduction d'éléments de renforcement dans le sol augmente sa résistance au cisaillement.

Par conséquent, les efforts pour utiliser des matériaux fibreux ont été lancés. Depuis l'invention par Vidal en 1969, près de 4000 structures ont été construites dans plus de 37 pays à ce jour en utilisant le concept de renforcement du matériau terre (Azeem, 1992).

Plusieurs recherches ont été effectuées sur la stabilisation des sols par des fibres naturelles ou synthétiques, on donne ci-après quelques détails sur deux types de fibres, le premier est naturel, il s'agit des fibres de palmier, et le deuxième est synthétique, c'est les fibres de polypropylènes.

4.10. Les fibres brutes de palmier dattier

D'après Swamy (Swamy, 1984), les fibres extraites des palmiers décomposés s'avèrent fragiles, elles ont une faible résistance à la traction, un faible module d'élasticité et une absorption d'eau très élevée.

Marandi et al, ont réalisé des essais de résistance à la compression non confiné, l'indice de portance californien et de compactage sur des échantillons de sol renforcés et non renforcés par des fibres de palmier. Ils ont constaté qu'avec la même longueur de fibre et avec l'augmentation de la teneur en fibres (de 0% à 1 %), les résistances maximums et résiduelles ont augmenté, tandis que la différence entre les résistances résiduelles et maximums a diminué (figures 4.8 et 4.9). Une tendance similaire a

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

été observée avec l'augmentation de la longueur de la fibre de palmier (de 20 mm à 40 mm) pour une teneur en fibres constante (Marandi, 2008).[95]

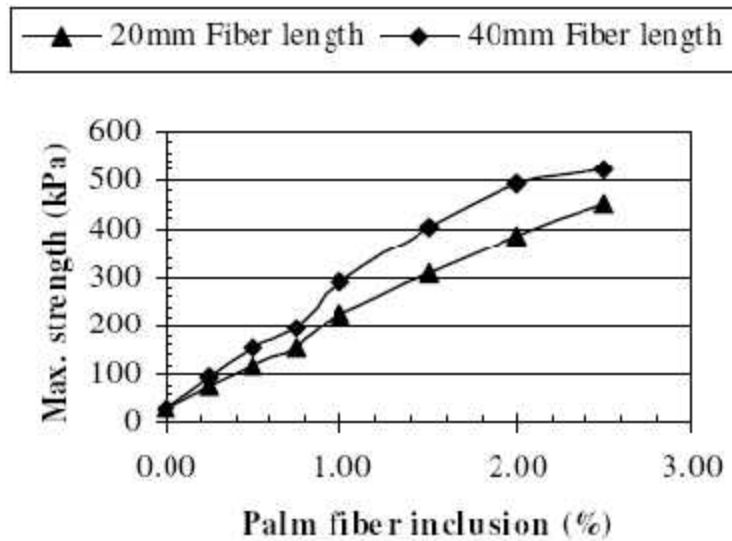


Figure. 4.8. : Les résistances à la compression maximales avec les teneurs en fibres de palmier dattier (Marandi, 2008)

fibres

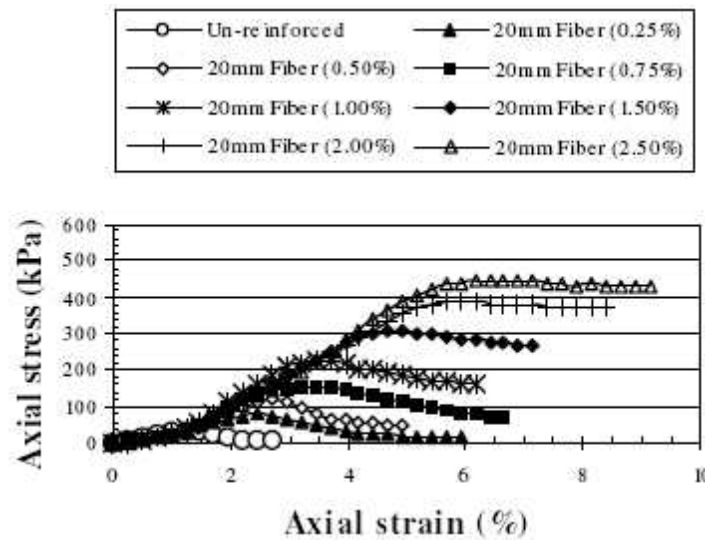


Figure. 4.9 : Les courbes contrainte-déformation des échantillons de sol renforcés et non renforcés par des fibres de palmier sous l'essai de compression non confiné (Marandi, 2008)

4.11 : D'après (LAYEB Abdelouhab et HALBAOUI Ahmed) Résistance à la compression R_{C28} de BTS

La résistance à la compression exprimée par la capacité de BTS, a résisté à la destruction sous l'action des contraintes dues à la charge de compression. Les résultats de l'essai de compression sont représentés dans la figure 3.1 et dans le tableau 3.1 par leurs moyennes

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

Taux de fibres	Fibres de caoutchouc		Fibres de verres	
	C h a u x	C i m e n t	C h a u x	C i m e n t
0	2 , 1 5	7 , 4	1 , 0 8	7 , 2 1
0 , 0 5	3 , 0 2	8 , 9 8	2 , 8 5	8 , 7 6
0 , 1	3 , 2 4	9 , 6	3 , 0 5	9 , 0 4
0 , 1 4	3 , 2 9	9 , 9 2	3 , 0 8	9 , 4 1
0 , 2	3 , 3 6	1 0 , 5 5	3 , 1 3	1 0 , 2 5
0 , 2 5	3 , 4 1	9 , 9 1	3 , 0 1	9 , 2 4
0 , 3	2 , 8	8 , 9 1	2 , 9	8 , 5 8

Tableau 4.4. Résistance à la compression à 28 jours en fonction du teneur des fibres

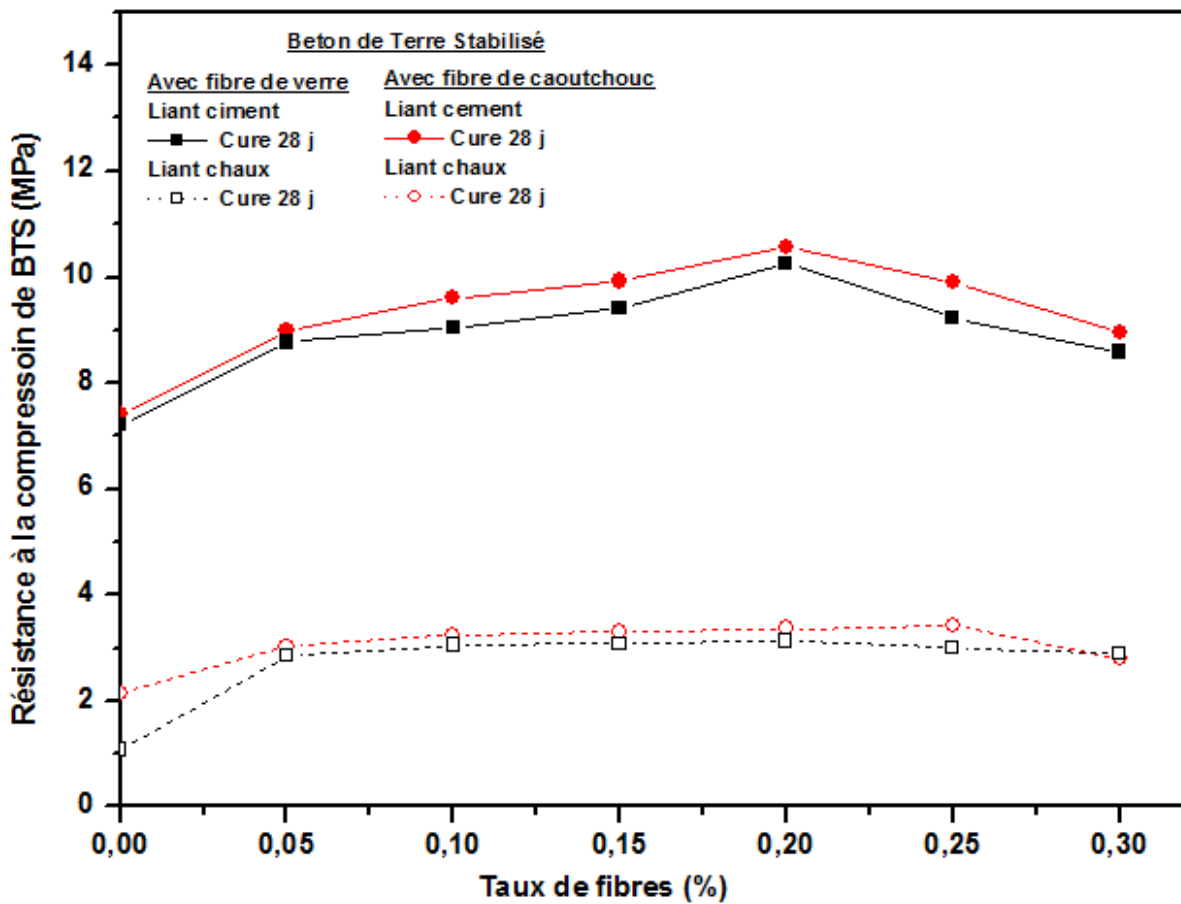


Figure. 4.10. L'effet de teneur des fibres (caoutchouc – verre) sur la résistance Al compression de BTS.

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

4.12 : L'effet de la variation de la teneur des fibres (caoutchouc - verre) sur la résistance à la compression à 28j de BTS

Les résultats représentés sur la figure 3.1 montrent que la résistance à la compression à 28 jours à différents liants hydrauliques (chaux et ciment) est augmenté en fonction de l'augmentation de la teneur des fibres de verre et caoutchouc jusqu'à 0.2 % et au-delà de ce seuil on observe une diminution jusqu'à 0.30 %. La Croissance est d'autant importante en allant du teneur des fibres de caoutchouc de 0 à 0.20% et la décroissance est d'autant importante en allant du teneur de 0.2 à 0.3%. Pour les deux types de fibres pour les différents liants hydrauliques est une fonction croissante jusqu'à 0.20% de teneur en fibre (optimum) et au-delà devient décroissante. Les recherches ont montré que les blocs de terre stabilisée à la chaux conservés à une température ambiante de 20 à 30°C, exigent une durée de cure très importante dépassant un mois pour assurer un développement satisfaisant de la résistance (Venkatarama, 2002) [96]

La présence des fibres dans le mélange sous une importance de contrainte qui rendent le mélange trop élastique après chargement surtout les fibres caoutchouc. Ceci entraîne une augmentation du réseau dans les blocs de terre stabilise, ce qui se répercute favorablement sur la résistance. Ainsi que le temps du cure et l'ajout de liants hydrauliques jouent un rôle important pour augmentes la résistance à la compression. Les liant hydraulique ici diminuer les pores internes entre les particules dans mélanges et renforcer les liaisons intergranulaires. Nous notons également que le ciment avec les fibres de caoutchouc est atteint de maximum résistance à la compression (10.55 MPa) pour 0.2 % fibres de caoutchouc. L'ajout des fibres et les liants hydrauliques a conduit d'améliorations les propriétés mécaniques du bloc de terre stabilise.

4.12.1 : Résistance à la traction de BTS à 28 jours

La résistance à la traction exprimée par la capacité de BTS, a résisté à la destruction sous l'action des contraintes dues à la traction. Les résultats de l'essai de traction sont représentés par leurs moyennes dans le tableau ci-dessous :

Taux de fibres	F i b r e s d e c a o u t c h o u c		F i b r e s d e v e r r e s	
	C h a u x	C i m e n t	C h a u x	C i m e n t
0	0 , 0 5	0 , 1 3 5	0 , 0 3	0 , 1 1
0 , 0 5	0 , 0 6	0 , 1 4 8	0 , 0 4 3	0 , 1 2
0 , 1	0 , 0 7	0 , 1 6 3	0 , 0 5 3	0 , 1 3 7
0 , 1 5	0 , 1 2 1	0 , 7 1	0 , 1	0 , 1 4 2
0 , 2	0 , 1 3 9	0 , 2 3 3	0 , 1 2	0 , 1 8 7
0 , 2 5	0 , 1 0 9	0 , 2 0 1	0 , 0 9 7	0 , 1 7 2
0 , 3	0 , 1	0 , 1 9 1	0 , 0 9 1	0 , 1 6

Tableau 4.5. Résistance à la traction à 28 jours en fonction du teneur des fibres.

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

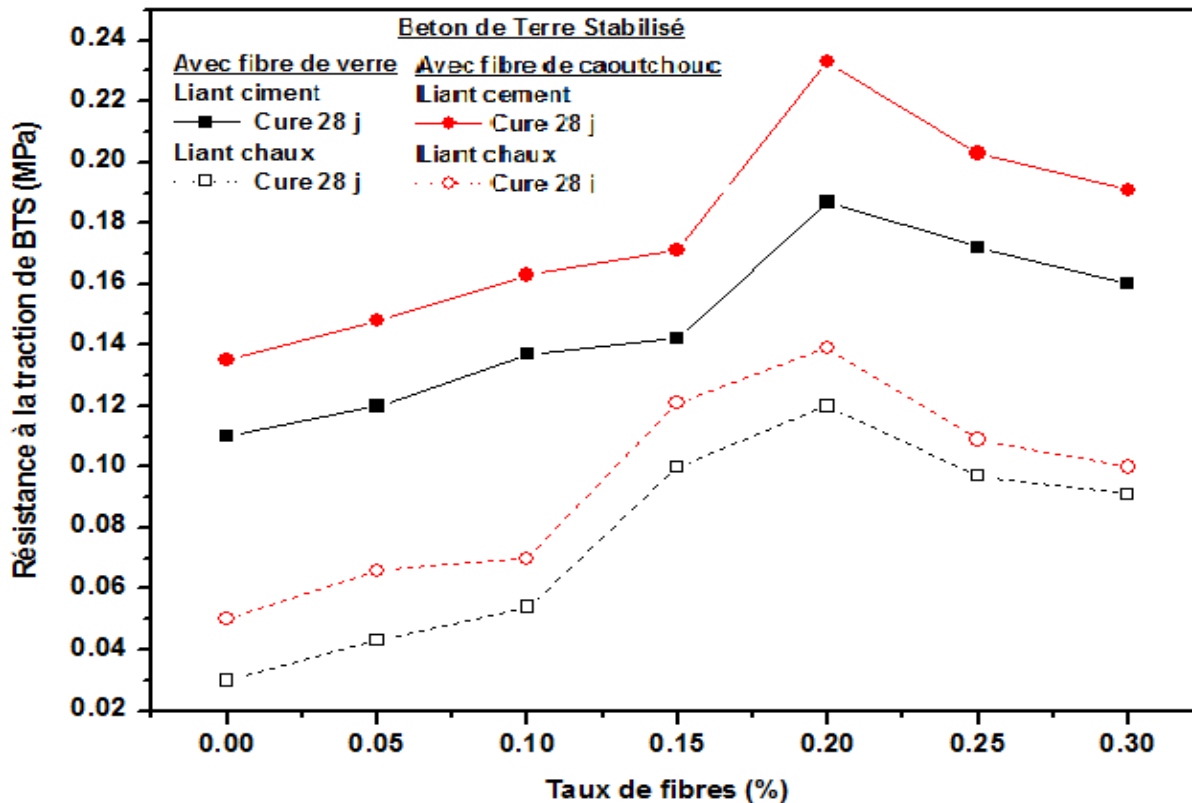


Figure 4.11. Effet du teneur des fibres de caoutchouc et des fibres de verre, type de liant (chaux et ciment) sur la résistance à la traction de BTS0

4.12.2 L'effet de la variation de la teneur de fibre de caoutchouc et de fibre de verre et type de liant sur la résistance à la traction de BTS

Les résultats représentés sur la figure 4.11 montrent que la résistance à la traction à 28 jours pour les deux types de fibres est une fonction croissante jusqu'à 0.20% de teneur en fibre (optimum) et au-delà devient décroissante pour les deux fibres (0.2-0.3%).

A titre d'exemple l'augmentation des fibres de caoutchouc de 0.15 à 0.20% pour des BTS conservés à l'air se passer une augmentation d'ordre de 12.95%. Par contre l'augmentation des fibres de 0.20 à 0.25% pour des BTS conservés à l'air se passer une diminution d'ordre de 21.58%.

De plus, on remarque que la résistance à la traction à 28 jours du BTS avec fibres de caoutchouc plus grande que le BTS avec fibres de verre. Par exemple l'augmentation de la résistance à la traction pour un BTS de cure 28j, fibre de caoutchouc 0.20% est de l'ordre 24.60% par rapport au BTS de cure 28j, fibre de verre 0.20% avec l'ajout de 10% ciment.

4.13 D'après (TAALLAH Bachir) Effet de la teneur en fibres de palmier dattier sur les propriétés du BTC

Dans cette partie l'étude s'est focalisée sur les BTC à base de ciment et de chaux avec une contrainte de compactage de 10 MPa.

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

4.13.1 La résistance à la compression sèche

4.13.1.1 Les BTC à base de ciment

L'effet de la variation de la teneur en fibres sur la résistance à la compression sèche du BCPD est présenté sur la figure 4.12.

À travers ces résultats, on remarque que l'ajout des fibres a conduit à une légère augmentation de la résistance pour 8 % de teneur en ciment. La plus grande valeur a été obtenue avec l'emploi de 0.05 % en fibres, et l'augmentation de RCS est de l'ordre de 6 % comparativement au BCSF. Mais pour le reste des cas, il y a une diminution de la résistance avec l'augmentation de la teneur en fibres. Pour les cas de 6.5% et 5%, une légère diminution de la résistance est enregistrée pour certaines teneurs en fibres, alors que pour d'autres, on n'a pas constaté de changement au niveau des résultats de la résistance.

La différence entre la plus faible valeur de la résistance et la plus élevée est de 4 %, 5% et 5.5 % pour une teneur en ciment respectivement de : 5%, 6.5% et 8 %. La figure 3.6 montre aussi que la RCS augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment. À titre d'exemple, les BCSF à base de 8 % en ciment ont des résistances de 60 % et 20 % plus élevées que celles des BCSF à base de 5% et 6.5% en ciment respectivement. Sur la base des résultats présentés sur la figure 3.6, on peut dire que pour les faibles teneurs en ciment (5% et 6,5 %), la diminution de la résistance à la compression du BCPD peut être attribué à la domination de l'effet des fibres sur celui de la teneur en ciment, puisque la quantité de produits d'hydratation est faible devant l'importance des vides créés dans le mélange suite à la présence des fibres dans le mélange sous une importante contrainte de compactage, qui rendent le mélange trop élastique après le déchargement. Ceci entraîne une augmentation du réseau poreux dans les blocs, ce qui se répercute défavorablement sur la résistance mécanique.

Alors que pour une importante teneur en ciment (8%), l'augmentation de RCS du BCPD est due à l'augmentation de la quantité des silicates de calcium (C2S et C3S) suite à l'augmentation de la teneur en ciment. L'augmentation de la quantité des silicates de calcium hydratés, les aluminates de calcium hydratés et les aluminosilicates de calcium hydratés qui dérivent de l'hydratation du ciment, aide à remplir d'avantage les pores de la matrice et améliore la rigidité de la structure en formant un grand nombre de liaisons rigides reliant les particules du mélange de sol (Bahar, 2004 ; Oti, 2009). Ces liaisons s'opposent à la décompression du mélange de sol après déchargement, provoquée par la présence des fibres, ce qui réduit la porosité du bloc, donnant par suite une résistance meilleure.

Ces résultats sont en concordance avec ceux de Namango (Namango, 2006), dans son étude sur les BTC à base de ciment et avec l'ajout des fibres de sisal. L'auteur a conclu que, la teneur en sisal en présence de ciment, semble ne pas avoir d'effet sur la résistance du BTC.

Les résultats sont également en accord avec les résultats de Khedari et al. (Khedari, 2005), qui ont trouvé que l'augmentation de la teneur en fibres de noix de coco a entraîné une diminution de la résistance des liaisons des spécimens, conduisant à une résistance à la compression plus faible. [97]
[98]

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

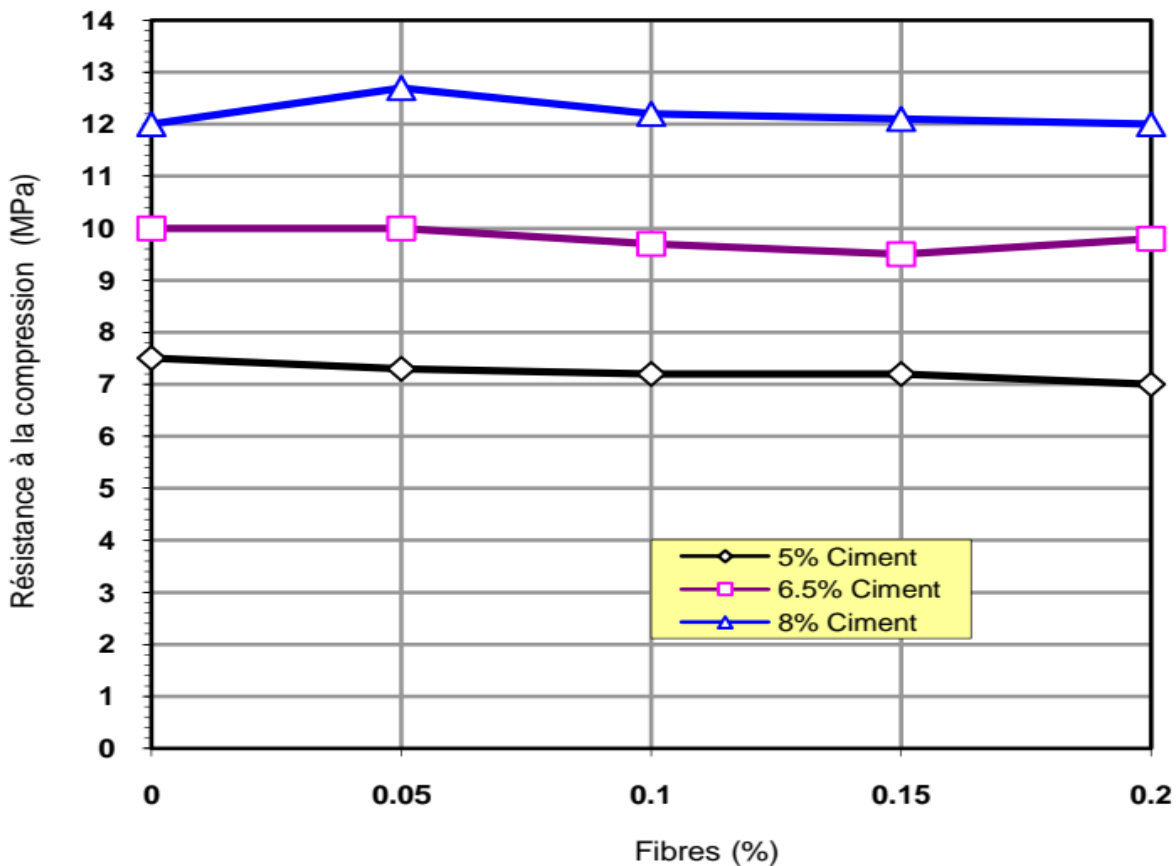


Figure. 4.12 : Résistance à la compression sèche du BCPD en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa)

4.14 : La résistance à la traction sèche

4.14.1 Les BTC à base de ciment

L'ajout des fibres naturelles est utilisé dans la fabrication de l'adobe et d'autres produits de terre afin de réduire la fissuration de retrait et d'améliorer la résistance à la traction (Ghavami, 1999 ; Estabragh, 2011), mais la situation n'est pas aussi claire pour le cas du bloc de terre comprimée. En analysant les résultats de la figure 3.13 présentant la variation de la résistance à la traction sèche RTS du BCPD en fonction de la teneur en fibres, on constate que la résistance à la traction est 700% de moins que la résistance à la compression sèche. C'est à cause, en grande partie, de la facilité avec laquelle les fissures peuvent se propager sous des charges de traction (Robert, 2012).[100]

Les résultats montrent aussi, que la RTS diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres, et la valeur la plus faible a été obtenue pour 0,2% en fibres pour les différentes teneurs en ciment utilisées dans cette étude. Pour ce cas, la diminution de la RTS par rapport à celle du BCSF est de 23,5 %, 18,5% et 14 % pour une teneur en ciment respectivement de 5%, 6.5% et 8 %. Contrairement aux résultats obtenus pour la résistance à la compression dans le cas de 0,05 % de fibres et 8 % en ciment, il n'y a aucune augmentation pour le cas de la RST. De la figure 3.13 on observe que l'augmentation de la teneur en ciment a causé une augmentation de la résistance à la traction.

Les diminutions de résistance à la traction obtenue dans cette étude ne concordent pas avec les résultats trouvés par Ziegler et al. (Ziegler, 1998) et Millogo et al. (Millogo, 2014), selon Ziegler et al,

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

l'emploi des fibres naturelles dans la fabrication des BTC, a réduit la taille des fissures de retrait et a amélioré la durabilité et la résistance à la traction. D'après Millogo et al. les valeurs de la résistance à la flexion des blocs fibrés sont plus élevées que celles des blocs non fibrés. Ils ont également indiqué que cette augmentation est due principalement à la résistance à la traction élevée des fibres d'Hibiscus canna binus et à la distribution homogène des fibres et leur adhérence avec la matrice argileuse.

La réduction de la résistance à la traction constatée dans notre étude, est attribuée à la faible adhérence entre la fibre et la matrice, provoquée par la décompression du bloc après déchargement, lors de sa fabrication. Par conséquent, il y a un faible transfert des efforts de la matrice aux fibres pendant le chargement, et un glissement des fibres par rapport à la matrice.

Le troisième effet est dû à la distribution non homogène des fibres de palmier dattier.

La faible adhérence dans l'interface fibres/matrice est due aussi à la mauvaise répartition des fibres dans le mélange, ce qui donne la possibilité de s'agglutiner avec moins de matériau de mélange, créant ainsi une porosité plus élevée, ce qui se traduit par la production de blocs plus faibles.

La diminution de RTS a été constatée dans quelques études, à la suite de l'ajout de paille hachée en vue de renforcer le matériau (Bouhicha, 2005 ; Piattoni, 2011). D'après Swamy (Swamy, 1984), les fibres extraites des palmiers sont fragiles et présentent une faible résistance à la traction.[91]

Nos résultats concordent vivement avec l'avis de Rigassi (Rigassi, 1995), qui a déclaré, sans donner d'arguments, que les fibres végétales sont incompatibles avec le mode de compactage des BTC, parce qu'elles rendent le mélange trop élastique.[101]

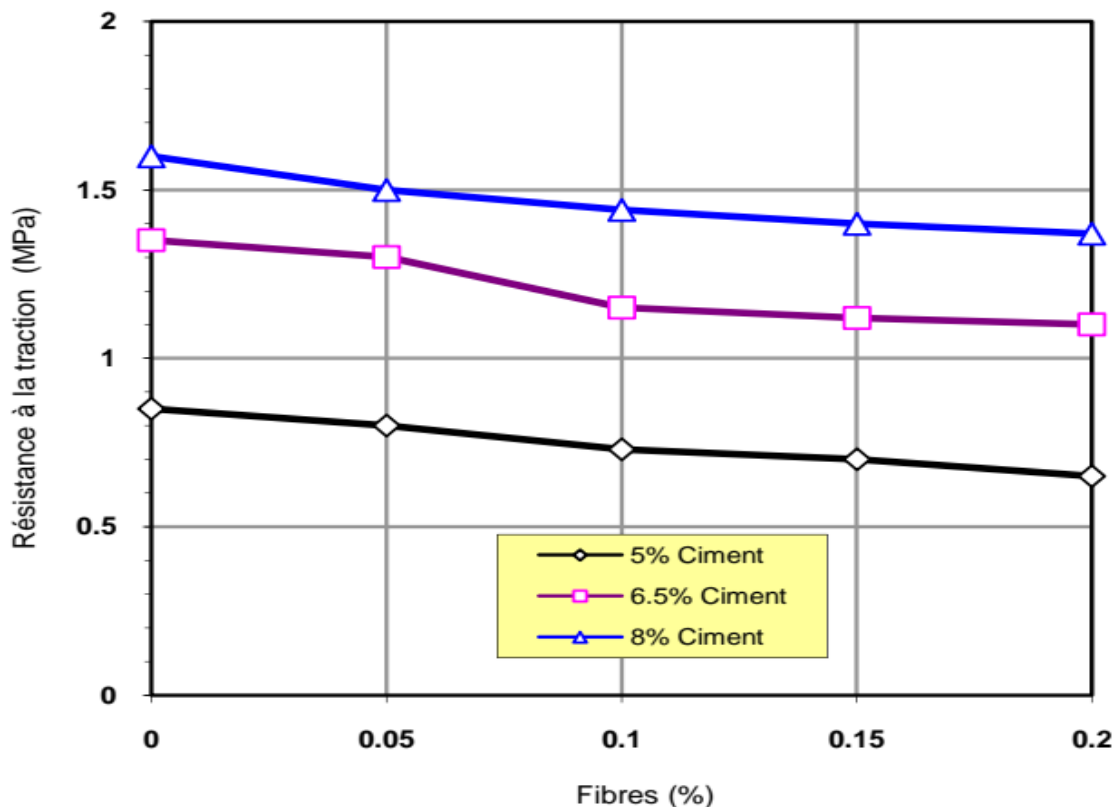


Figure. 4.13 : Résistance à la traction sèche du BCPD en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa)

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

4.15 : Effet de la contrainte de compactage sur les propriétés du BCPD

Dans cette partie, on a étudié les BTC à base de 5 % en ciment et avec l'application de trois contraintes de compactage 1.5 MPa, 5 MPa et 10 MPa.

4.15.1 La résistance à la compression sèche

La variation de la résistance à la compression sèche en fonction de la contrainte de compactage est présentée sur la Figure. 4.14

On constate à partir de Figure. 4.14 : que pour la même teneur en ciment, l'augmentation de la contrainte de compactage conduit à une augmentation de RCS des BCPD. La RCS du BCSF compacté avec 10 MPa dépasse celle de 1.5 MPa et 5 MPa de 158,6% et 19 % successivement. Pour les BCPD, on remarque une légère diminution de la résistance avec l'augmentation de la teneur en fibre pour les deux contraintes de compactage :5 MPa et 10 MPa. Cela montre que la présence de fibres dans les mélanges compactés a un effet négatif sur la résistance, ce qui est en accord avec l'avis de Rigassi (Rigassi, 1999). Alors que pour une contrainte de compactage de 1.5 MPa, on constate une augmentation de la résistance après 0.1 % en fibres mais sans dépasser celle du BTC sans fibres.[101]

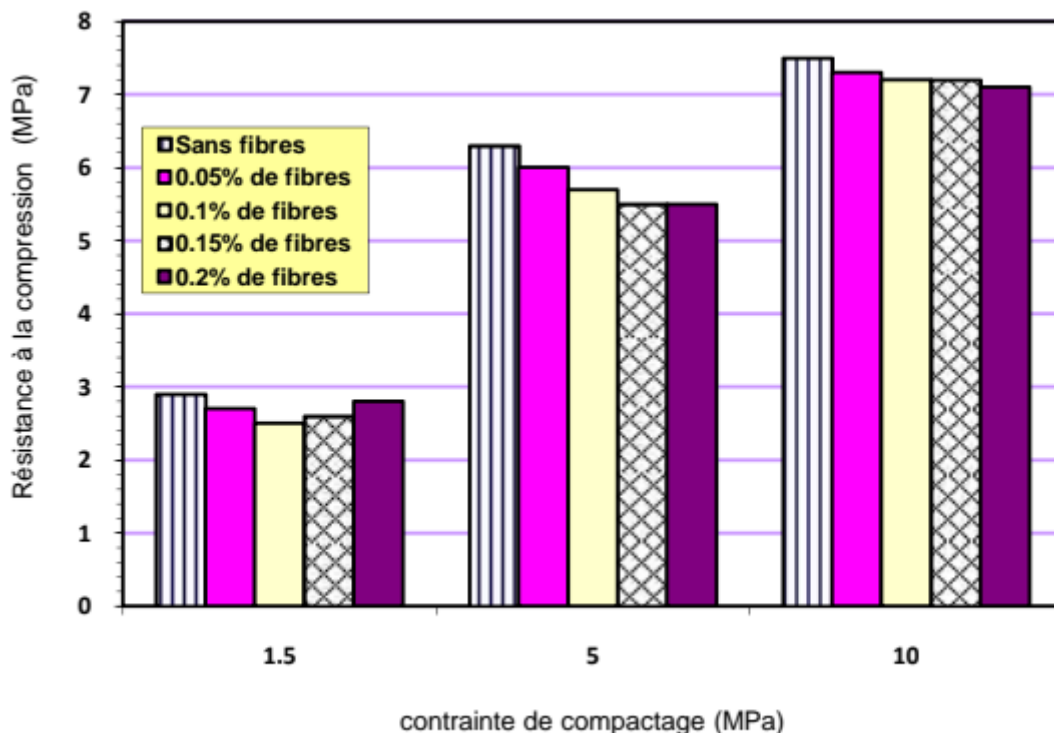


Figure. 4.14: Effet de la contrainte de compactage sur la résistance à la compression sèche du BCPD à base de 5% de ciment.

4.15.2 La résistance à la compression humide

Les résultats illustrés dans la figure 3.24 mettent en évidence une augmentation de la résistance à la compression humide avec l'augmentation de la contrainte de compactage. Ce résultat confirme celui de Kerali (Kerali, 2001).[102]

Pour les blocs fibrés, on constate à partir de la figure 4.15 qu'il existe une légère diminution de la RCH avec l'augmentation de la teneur en fibres pour les deux cas de contraintes de compactage : 5 MPa et 10 MPa. Cela montre que la présence de fibres dans les mélanges sous pression de compactage a un

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

effet défavorable sur la RCH. Les mêmes remarques avec le cas de 1,5 MPa, mais ici la plus petite valeur de RCH coïncide avec 0,1 et 0,15% en fibres, et non avec 0,2% comme il a été obtenu pour les deux autres cas. Ce résultat montre que les blocs stabilisés à hautes teneurs en fibres, faibles contraintes de compactage et faibles teneurs en ciment possèdent une meilleure résistance.

La figure 3. 25 montre la variation du rapport de la résistance à la compression sèche sur la résistance à la compression humide (RCS / RCH) avec la contrainte de compactage. Pour tous les BTC testés, on a constaté une diminution du rapport RCS / RCH avec l'augmentation de la contrainte de compactage de 1,5 MPa à 10 MPa a donné lieu à une diminution de la proportion à sec et par voie humide de résistance à la compression comprise entre 10% et 28,29%. Ce résultat montre l'importance de l'effet de la contrainte de compactage sur la résistance du BTC fibré à l'état sec et à l'état sec humide.

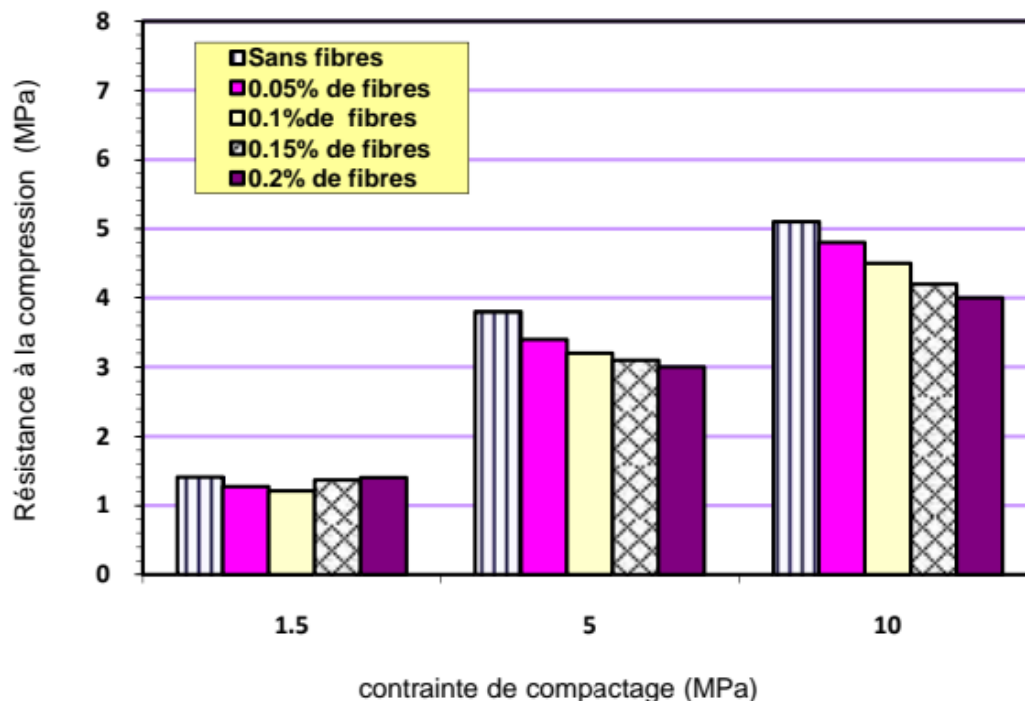


Figure. 4. 15: Effet de la contrainte de compactage sur la résistance à la compression humide du BCPD.

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

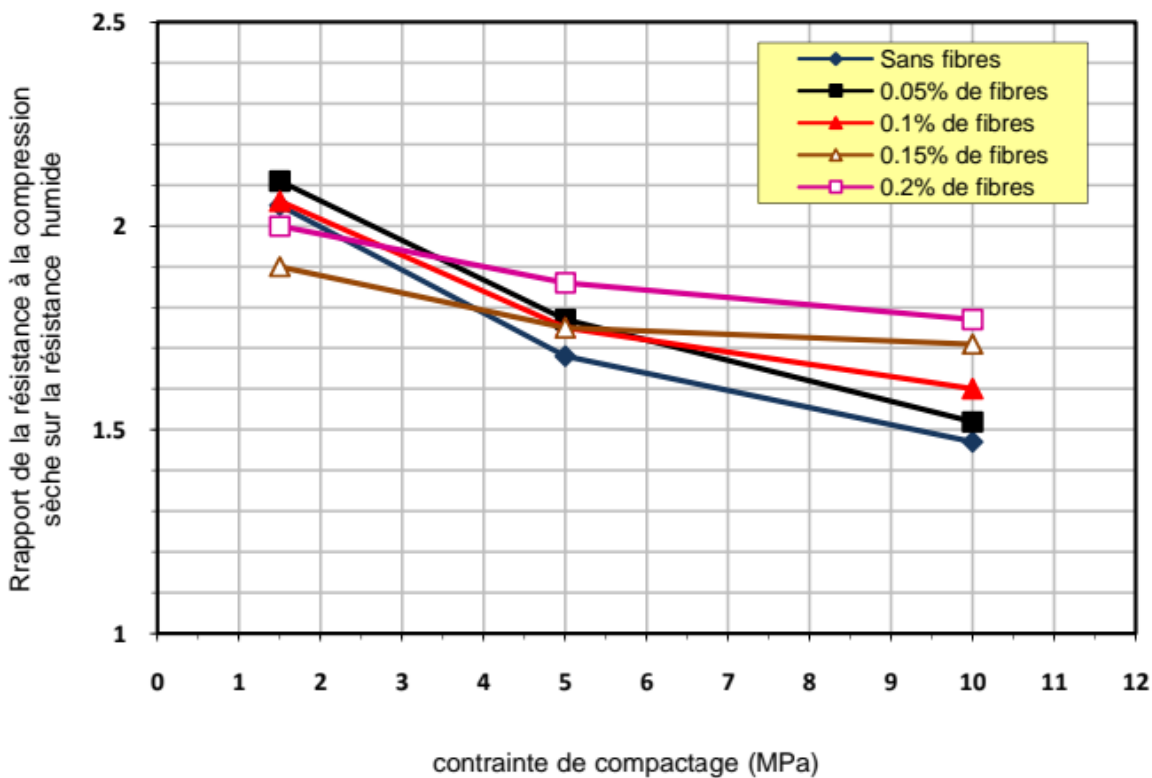


Figure. 4.16 : Effet de la contrainte de compactage sur le rapport de la résistance à la compression sèche sur la résistance humide du BCPD à base de 5% de ciment.

4.16 : La résistance à la traction sèche

L'effet de la contrainte de compactage sur la résistance à la traction sèche du BTC fibré est illustré sur la figure 3.26. Il faut signaler qu'on a étudié ici seulement deux contraintes de compactage, à savoir 5 MPa et 10 MPa.

Les résultats montrent que l'augmentation des contraintes de compactage conduit à une augmentation de RTS. En analysant les résultats, on remarque qu'en variant la contrainte de compactage de 5 MPa à 10 MPa (100 %), la résistance à la traction augmente par les taux suivants : 13.33 %, 14.28 %, 11.66 %, 16.66 % et 12.06 % pour une teneur en fibres successivement de : 0.05 %, 0.1 %, 0.15 % et 0.2 %.

On remarque que les BCPD ont subi des augmentations peu différentes avec la variation des teneurs en fibres, ce qui explique la dominance de l'effet du compactage sur la résistance du bloc. L'augmentation de la résistance est expliquée par l'augmentation de la compacité du mélange, donc une densité plus élevée du matériau, et les liaisons formées par les produits d'hydratation sont plus résistantes.

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

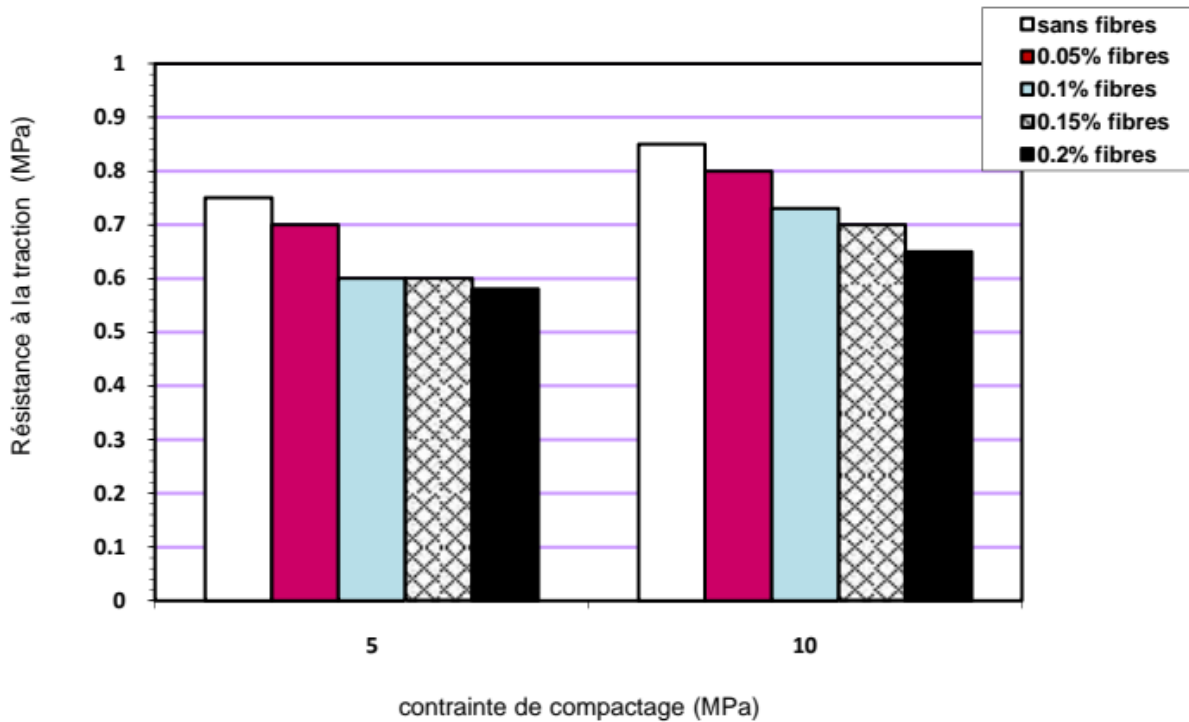


Figure. 4. 17: Effet de la contrainte de compactage sur la résistance à la traction sèche du BCPD à base de 5% de ciment.

4.17 : D'après (TAALLAH Bachir)

4 .17.1 La résistance à la compression des bétons étudiés

La résistance a la compression simple est un indicateur de référence utilise couramment pour la conception des bâtiments et permet d'évaluer l'intégrité physique du matériau solide. Généralement, la résistance en compression des matériaux de construction à base de terre est une propriété qui continue a augmenter plusieurs années après la production du béton. Le choix de réaliser le test a l'âge de 7 jours, 28 jours et 180 jours permet d'évaluer cette évolution avec le temps.

Trois éprouvettes ont été testées pour chaque formulation de béton et la valeur moyenne et l'écart-type ont été calculés. La résistance a la compression simple des éprouvettes testées, avec une expansion latérale libre, est définie comme étant égale au rapport de la force axiale maximale à la section transversale. La résistance à la compression est fortement dépendante des conditions hygrométriques. Pour cela deux conditions de cure ont été considérées (1) a 60% d'HR et (2) a 90% d'HR sous une température constante de 20°C.

4.17.1.1 Résistance à la compression des éprouvettes conservées à 60% d'HR

Les résultats montrent que la résistance a la compression a 7 jours varie légèrement en fonction du pourcentage des fibres quand le pourcentage de sol argileux est de 0%. Par contre, la résistance à la compression diminue avec l'ajout de 0,6% et 1,2% de fibres lorsque le pourcentage de sol argileux varie entre 20% et 40% (figure 3.6).

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

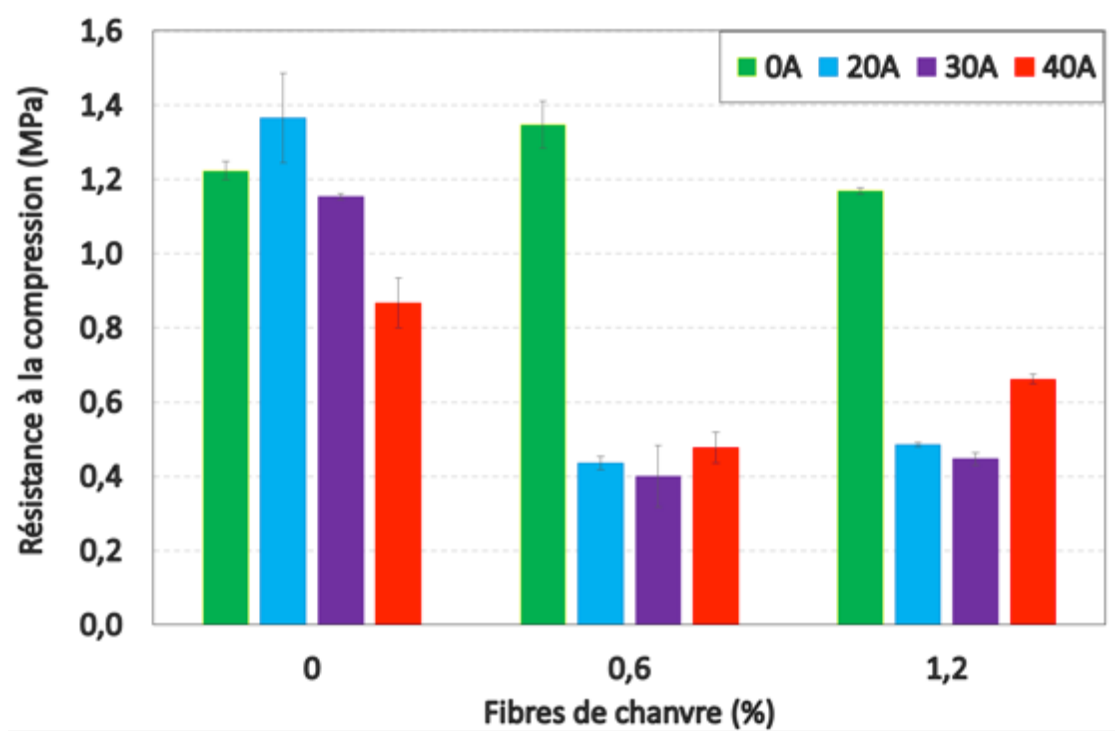


Figure 4. 18 : Effet du sol argileux et des fibres sur la résistance a la compression a 7 jours.

A 28 jours, la résistance a la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres. Elle varie entre 1,6 MPa et 2,2 MPa pour le béton avec 0% de sol argileux (figure 4.19). Cependant, l'effet de la proportion de fibres sur la résistance a la compression est faible (moins de 0,2 MPa) lorsque la fraction du sol argileux varie de 30 à 40%. L'augmentation de la proportion de sol argileux réduit la résistance a 7 jours et 28 jours. Cela est en relation avec la faible résistance des fines argileuses par rapport à celle du sableux. D'autre part la granulométrie du sol sableux est plus étendue ce qui augmente la compacité du matériau. Un autre effet non négligeable est l'effet de l'eau de gâchage, en effet, les formulations avec sol argileux demandent plus d'eau pour acquérir la maniabilité visée ce qui conduit à un rapport eau/liant plus élevée et donc une résistance plus faible. Notons que la résistance se stabilise à partir de 30% d'augmentation de la proportion du sol argileux.

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

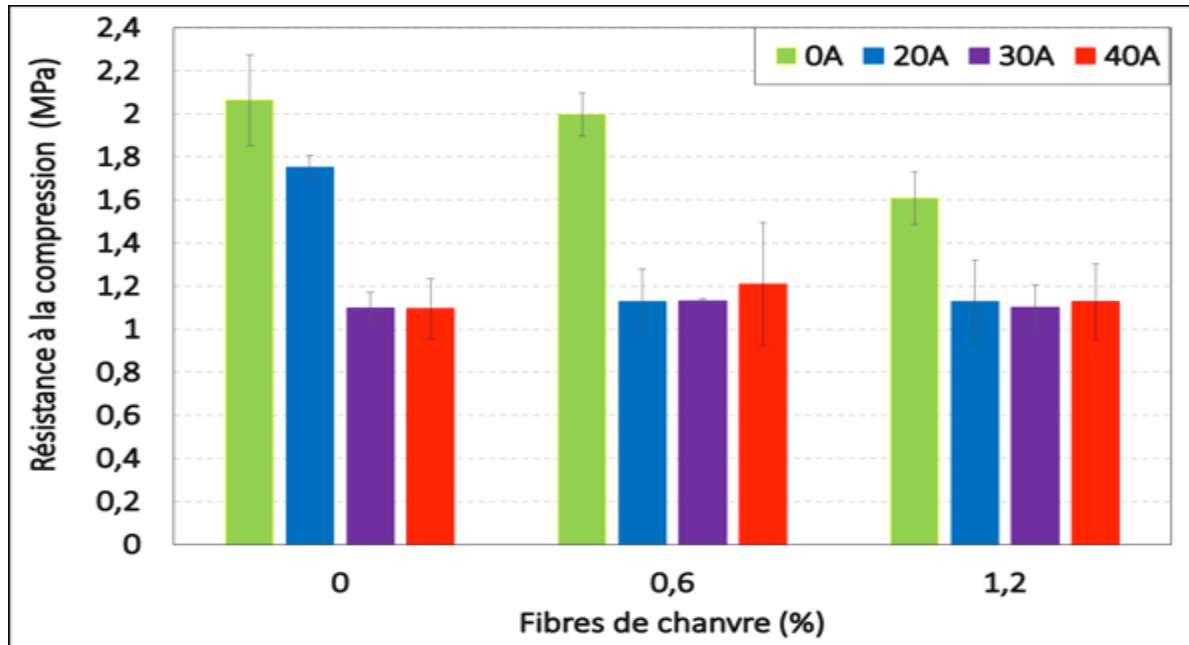


Figure 4. 19 : Effet du sol argileux et des fibres sur la résistance a la compression a 28 jours.

4.17.1.2 Résistance à la compression des éprouvettes conservées à 90% d'HR

Les figures de 4.20 à 4.21 montrent l'effet du sol argileux et des fibres de chanvre sur la résistance a la compression a 7, 28 et 180 jours lorsque les échantillons ont été conservés sous une humidité relative contrôlée (90-100% HR a 20C°). L'écart-type des résultats est inférieur a 0,025 MPa, soit environ 4% a 7 jours. Cette variabilité est due à l'hétérogénéité du sol sableux et argileux ainsi qu'à la structure poreuse multi échelle en fonction de la proportion de chaque constituant [Collet et al. 2008].[103]

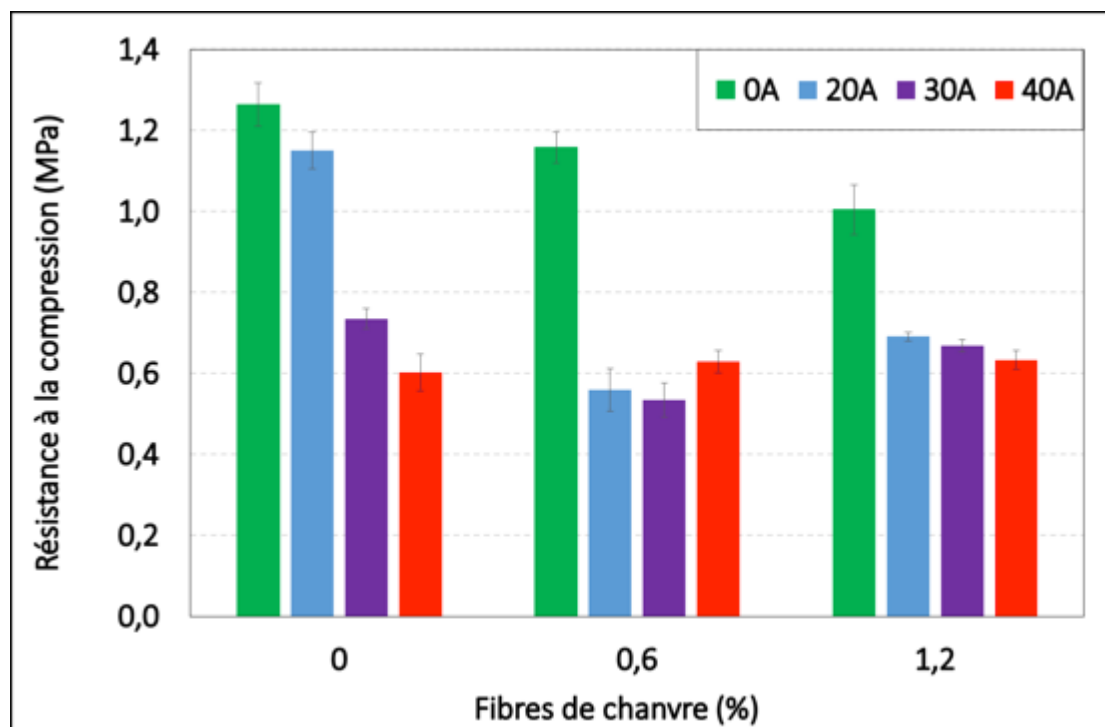


Figure4. 20 : Effet du sol argileux et des fibres sur la résistance a la compression a 7 jours.

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

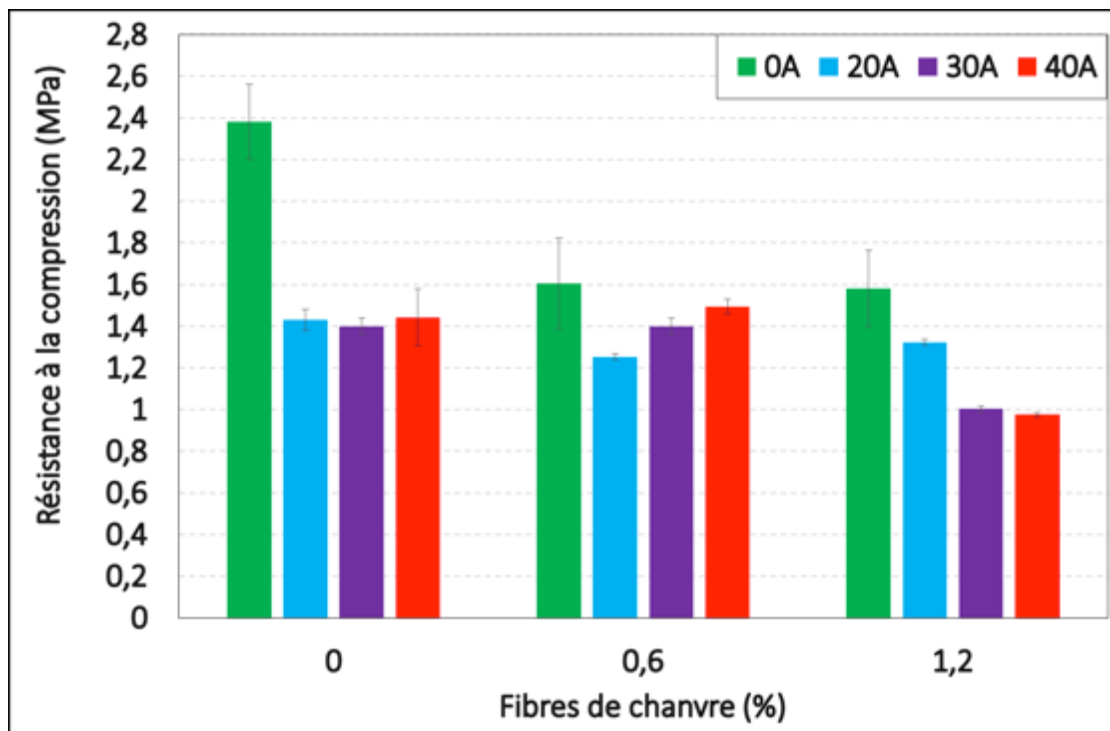


Figure 4. 21 : Effet du sol argileux et des fibres sur la résistance a la compression a 28 jours.

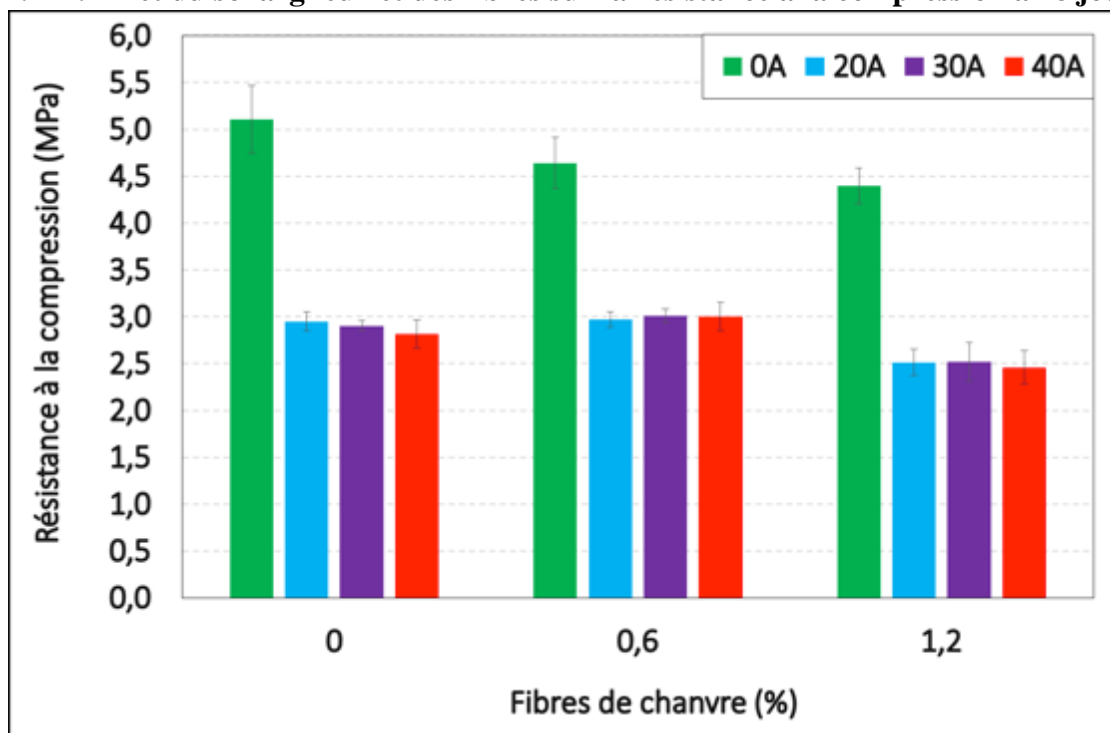


Figure 4. 21 : Effet du sol argileux et des fibres sur la résistance a la compression a 180 jours.

Les résultats montrent que la résistance a la compression diminue avec l'addition du sol argileux a 7 jours et varie entre 0,6 et 1,3 MPa (figure 4.19). Cependant, l'effet de la proportion d'argile sur la

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

résistance a la compression est faible (moins de 0,3 MPa) lorsque la fraction du sol argileux varie de 20 a 40%. Cet effet n'est pas significatif lorsque la résistance a la compression est stabilisée a 180 jours. La résistance a la compression varie entre 1 et 2,4 MPa a 28 jours et entre 2,5 et 5 MPa a 180 jours (figure 4.20 et 4.21).

L'ajout des fibres dans le béton avec 0% de sol argileux diminue la résistance a la compression a 7, 28 et 180 jours. Cet effet est plus significatif a 28 et 180 jours (environ 0,8 MPa de variation). Cependant, avec l'addition du sol argileux, l'effet des fibres présente de faibles variations. Un effet significatif ne peut être observe que pour 1,2% de fibres a 28 et 180 jours ou la résistance a la compression diminue d'environ 0,5MPa. Cet effet négatif des fibres sur la résistance a la compression peut être du a la densité plus faible et a la modification de la structure du béton, du sol et de la distribution des pores en introduisant des vides et des discontinuités. Une mauvaise liaison entre les fibres et la matrice peut également augmenter les microfissurations dans la zone de transition fibre-matrice.

4.18: Comparaison des deux conditions de cure des éprouvettes

Les figures 3.11 et 3.12 montrent la comparaison entre l'évolution de la résistance a la compression dans des conditions ambiantes a 60% d'HR a 7 et 28 jours. Une légère influence sur la résistance a la compression a été observée dans les conditions ou le séchage est plus important. A 7 jours, la résistance à la compression est plus petite pour les échantillons de béton humide avec 0% et 20% de sol argileux compte tenu des différents pourcentages des fibres. Si Ho et al. [Si Ho et al. 2017] ont montré que la résistance à la compression des éprouvettes sous condition de séchage est supérieure à celle à l'état humide en raison de l'hydratation et de l'évaporation. En effet, la résistance à la compression dépend des forces d'attraction entre les particules du sol et les molécules d'eau. Cependant, la résistance à la compression du béton a

60% d'HR est plus petite pour les éprouvettes avec 30% et 40% de sol argileux. Cela peut être dû au taux élevé de retrait lorsque la quantité du sol argileux est importante et aux microfissurations liées aux contraintes de traction induites par le retrait empêche.

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

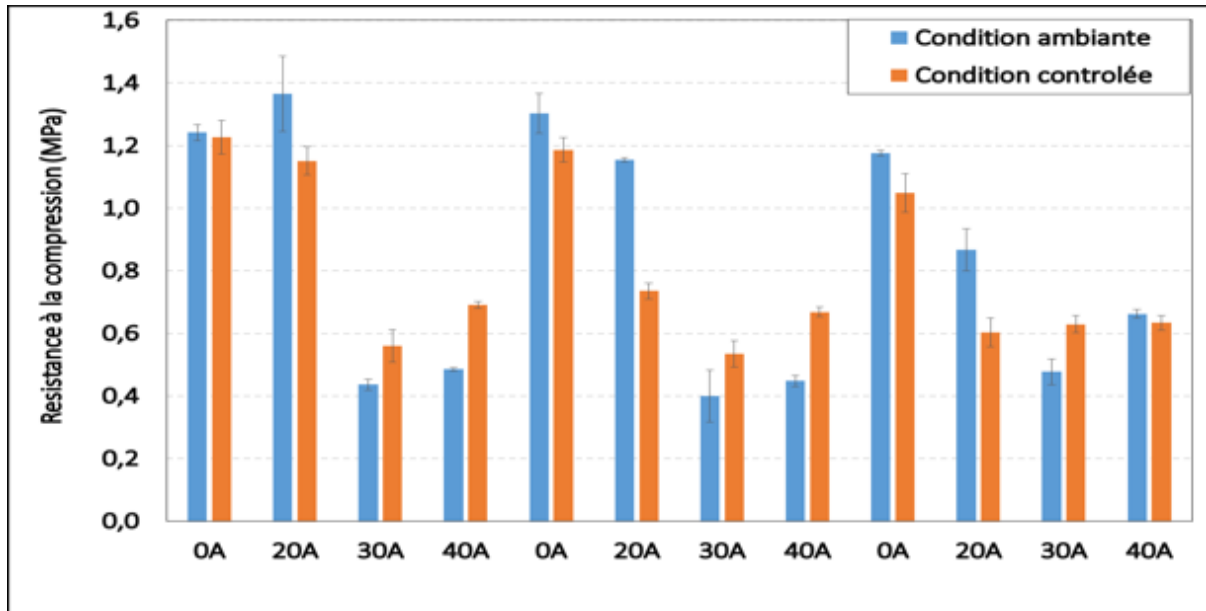


Figure 4.22 : Resistance a la compression des éprouvettes durcies a 60% et 90% d'HR a 7 jours.

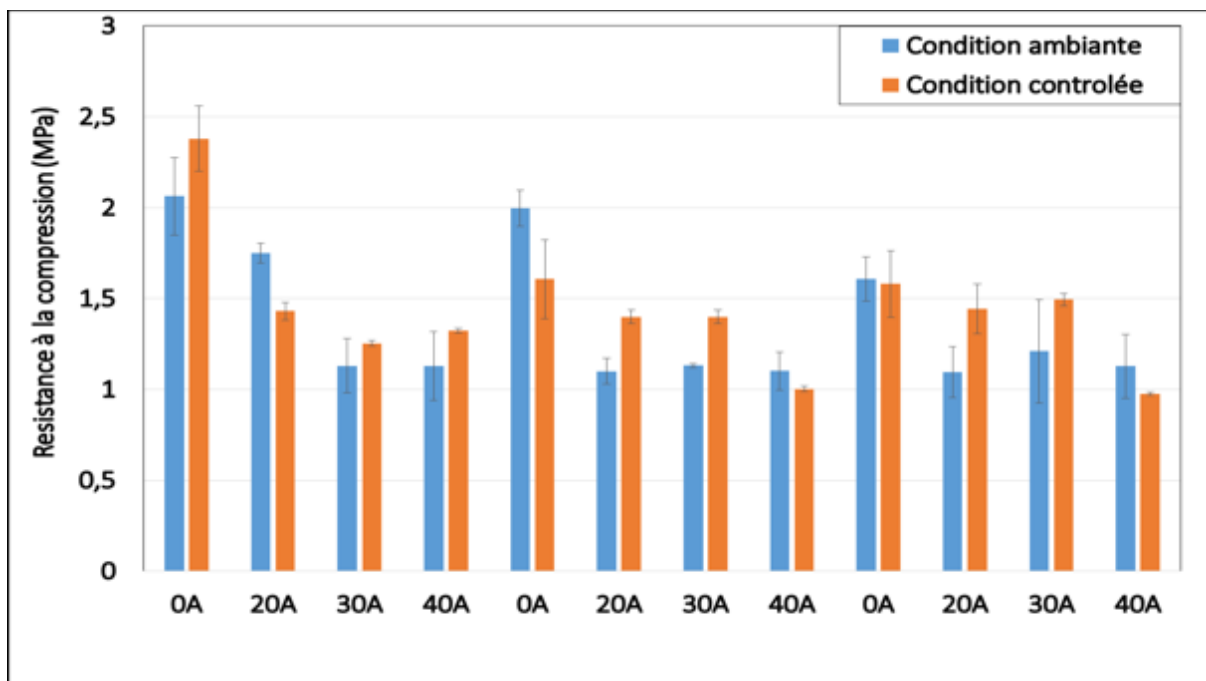


Figure 4. 23 : Resistance a la compression des éprouvettes durcies a 60% et 90% d'HR a 28 jours.

L'effet du temps de durcissement du béton de terre sur la résistance à la compression a également été étudié. La figure 3.13 montre l'évolution de la résistance à la compression pour les différentes compositions à 7, 28 et 180 jours à 90% d'HR. Les résultats montrent que la résistance à la compression augmente même après un mois.

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

C'est une propriété importante de ce béton par rapport au béton traditionnel. La résistance à la compression à court terme est principalement associée à l'hydratation du ciment, tandis que la résistance à la compression à long terme est dû aux réactions d'hydratation, aux réactions pouzzolaniques entre les minéraux d'argile et l'hydroxyde de calcium formes par l'hydratation du ciment et de la chaux [Si Ho et al. 2017].[104]

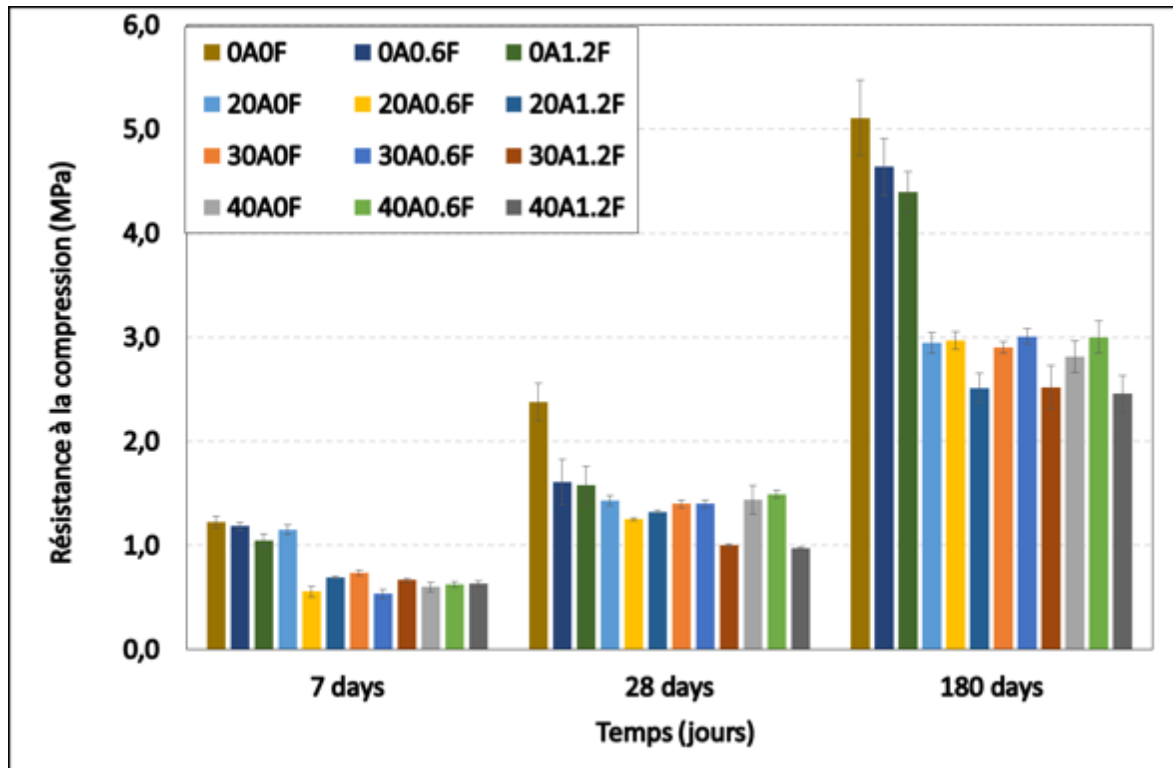


Figure4. 24 : Resistance a la compression a 7, 28, et 180 jours

La résistance à la compression mesurée du béton de terre est faible (de 1 à 2,4 MPa à 28 jours et de 2,5 à 5 MPa à 180j) par rapport au béton ordinaire. Cependant, ces valeurs sont acceptables pour l'utilisation de ce type de béton en tant que béton de remplissage et non pas pour assurer une capacité de résistance à un chargement élevé (par exemple : murs, blocs, plancher, etc.). Cela s'explique par le très faible pourcentage de ciment et des granulats et la plus grande porosité du béton de terre constitué d'argile ainsi que la teneur en eau plus élevée requise pour obtenir une bonne maniabilité. Cependant, les propriétés acoustiques et thermiques pourraient être meilleures que le béton traditionnel en raison de la plus faible densité liée à l'utilisation du sol argileux et des fibres de chanvre.

4.19 Comparaison des résultats

4.19.1 : La résistance à la compression

Les résultats précédents montrent que le type de fibre ne donne pas beaucoup de différence : La résistance à la compression (10.55 MPa) pour 0.2 % fibres de caoutchouc et fibres de verres La différence par rapport aux résultats précédents est due au pourcentage de ciment

4.19.2 : Comparaison des résultats Résistance à la traction

De plus, on remarque que la résistance à la traction à 28 jours du BTS avec fibres de caoutchouc plus grande que le BTS avec fibres de verre.

CHAPITRE 4 :Influences des fibres et de la contrainte de compactage sur les propriétés du BTS comprimé

Les résultats ont montré le rôle du pourcentage de ciment, plus le pourcentage est élevé, meilleurs sont les résultats.

4.19.3 : La contrainte de compactage sur les propriétés du BCPD

4.19.3.1 :La résistance à la compression sèche

On remarque une légère diminution de la résistance avec l'augmentation de la teneur en fibre pour les deux contraintes de compactage : 5 MPa et 10 MPa

Alors que pour une contrainte de compactage de 1.5 MPa, on constate une augmentation de la résistance après 0.1 % en fibres mais sans dépasser celle du BTC sans fibres.

4.19.4.2La résistance à la compression humide

A l'état humide, on remarque l'inverse du premier état. Plus e la contrainte de compactage est élevée, moins il y a de La résistance

4.20 : Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre la possibilité d'améliorer les propriétés physicomécaniques, et inclure différents types d'intérêt de fibres (naturelles et synthétiques), mais la vue grandiose de la fibre, de (caoutchouc et verre) spécifiquement. Pour tirer le meilleur parti de la stabilité BTS, et l'utilisation du programme d'installation chimique (chaux et ciment). Pour la stabilité, car il se caractérise par une pouzzolanique de réaction lente, une étude de temps et de mode de cure a été élaborée, en vue de réduire le temps de conservation des BTS à base de chaux et ciment en attendant qu'ils atteignent une résistance acceptable pour la construction des murs en terre.

Les résultats montrent que, la résistance a la compression simple du béton à base de terre augmente même après un mois, cette valeur a 180 jours est deux fois plus à 28 jours. C'est une propriété importante de ce béton par rapport au béton traditionnel. D'autre part on trouve une légère différence de l'effet des conditions de cure des éprouvettes (60% d'HR et a 90% d'HR sous une température de 20°C) sur la résistance a la compression du béton à base de terre. Les résultats montrent une augmentation de la résistance a la compression en fonction de l'augmentation de la densité sèche. Autrement dit que, la résistance a la compression et le module de Young diminuent avec l'augmentation de quantité de sol argileux et de fibres.

Conclusions générales et perspectives

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

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

Les résultats obtenus montrent que :

- La résistance à la compression atteint un maximum pour un taux de sable de 60 % et une contrainte de compactage de 10MPa et elle est encore bien meilleure pour un taux de sable de 20% et une contrainte de compactage de 20MPa. La résistance à la compression pour un taux de sable de 60% et une contrainte de compactage de 20MPa, elle est aussi très acceptable (plus de 15MPa).
- L'absorption totale diminue avec l'augmentation du dosage du sable jusqu'à 60%.

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

- La perte de masse diminue à chaque fois que le taux de sable augmente. Elle passe de 13% à 2% pour des taux de sable de 0% 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 intergranulaires. La perte de masse diminue de plus de 50% quand la contrainte de compactage passe de 10 à 20MPa.

En perspectives, trois domaines méritent d'être approfondis

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

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Thèse présentée à l'université de HAVRE par AKLI HIBOUCHE (Sols traités aux liants performances hydromécaniques et hydro-thermique application en BTP en 2013
- [2] Fiche technique QUALIREMO « La terre crue », « [www. tkTerreCrue.html](http://www.tkTerreCrue.html). » Avril 2008 [3] RICHARD P., « Adobe » mémoire Maître en environnement Université de Sherbrooke Canada, Octobre 2010.
- [4] MAKRI M., « Projet GE12 Construction en terre » Technologie compiègne 2010
- [5] CRA Terre EAG « Bloc de terre comprimée volume I » Manuel de production
- [6] DJOUHRI M., « Confection d'une brique à base de sable de dune » mémoire magister Université de Ouargla, 2007.
- [7] CORPUS « Mur de briques en terre crue » Architecteur traditionnelle méditerranéenne, 2006.
- [8] RHONE A « Le pisé » [www Agade orge](http://www.Agade.org) Edition Décembre 2010.
- [9] CRA Terre « Blocs de terre comprimée normes » Série Technologies.
- [10] LIVERT S., « Bâtir un mur en briques de terre compressée », Février 2011 HIBOUCHE A. (2013). *Sols traités aux liants. Performances hydro mécaniques et hygrothermiques. Applications en BTP* (Thèse de doctorat). Université du Havre.
- [11] HOUBEN, H, V. Rigas se, et P. Gémier. (1996). *Blocs de terre comprimée: Equipements de production*. Belgique: CDI ; CRA Terre-EAG.
- [12] HOUBEN, Hugo et H. Guillaud. (1994). *Earth Construction: A Comprehensive Guide*. London:
- [13] ROHLEN, U., C Ziegert et A. Mochel. (2013). *Construire en terre crue: construction, rénovation, finitions*. Paris: Éd. "Le Moniteur.
- [14] Cabane N. Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de St Etienne, Université Jean Monet, 182 p, 2004
- [15] IZEMMOUREN O « Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée » Thèse doctorat, Université Mohamed Khider, 2016.
- [16] Caillère S., Henin S. et Rautureau M., 1982. Minéralogie des argiles : Classification et nomenclature (Tome 2), vol. 2, Paris : Masson
- [17] Gautier M., 2008. Interactions entre argile ammoniée et molécules organiques dans le contexte du stockage des déchets. Cas de molécules à courtes chaînes. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans.

- [18] **Jiménez Delgado MC, Guerrero IC.** The selection of soils for un stabilised earth building: A normative review *Construction and Building Materials* vol 21 (2007) 237–251
- [19] MVENUAT Produits Silico calcaire "Techniques de l'Ingénieur"1994.
- [20] Réunion D'ingénieurs Matériaux de Construction, Edition Eyrolles 1979.
- [21]CNERIB, Règles de Conception Et de Calcul des Maçonnerie DTR (C2-45)
Edition CNERIB 1997
- [22]**Valadez-Gonzalez A, Cervantes UC JM Olayo R, Herrera Franco P J.** Effect of fiber surface treatment on the fiber matrix bond strength of natural fibers reinforced composites *Composites Part B*, 309-320 1999.
- [23]**Vaevsud D.** Performance studies on rigid pavement sections built on stabilized sulfate soils Mscthes is University of Texas at Arlington; 2007.
- [24] **Baron J OLIVIE r J.P et. Weiss JC, 1996 :** Chapitre 1A : Les ciments courants, Les bétons Bases et données pour leur formulation, sous la direction de Jacques .BARON, Jean-Pierre OLIVIER, Ed Eyrolles.
- [25] **Z.SALIM.**Influence des caractéristiques du gravier sur la qualité de béton Université de M' sila1995
- [26] COLLECTION TECHNIQUE CI M BÉTON FICHES TECHNIQUES, Le ciment et ses applications Nouvelle édition 2001. « Comparative study of the cementitious of différent fly ashe », pp 91-114 – 1994.....
- [27]**Venuat M** Le traitement des sols à la chaux et au ciment. Publié par l'auteur, 66 av. C. Perrière, 92320 Châtillon sous-Bagneux, 459 p, 1980.
- [28]**TRAN N T.** Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière. Thèse de doctorat de l'Université d'Artois, France, 2009
- [29]**United Nations** EARTH Construction Technology. United Nations Centre For Human Settlements Nairobi Kenya 200 p, 1992.
- [30]**Bell FG** Methods of treatment of unstable ground. NewnesButterworth, London, 1975.
- [31]**Walker P and Stace T** Properties of Some Cement Stabilised Compressed Earth Blocks and Mortars, *Materials and Structures* Vol 30, pp 545 – 551, 1997.
- [32]**Walker P** Specifications for Stabilized Pressed Earth Blocks. *Masonry International* 10, (1)p p 1 6, 1996.
- [34]**Walker, P.** Strength, Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilized Soil Blocks *Cement & Concrete Composites*, 17, 4, pp 301 310 1995.
- [35]**Webb DJT** Stabilized soil and the built environment. *Renewable Energy*, Vol. 5, No. 5-8,1066-1080, 1994.

- [36] **Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F.** Construire enterre. Editions Alternatives et Parallèles, collection Architecture, Paris, France, 265p, 1979.
- [37] **Heathcote, K, and Piper R.** Strength of Cement Stabilized Pressed Earth Blocks with Low Cement Contents. J Proc Roy Soc New South Wales, vol. 127, pp. 33-37, 1994.
- [38] **Akpokodje EG.** The stabilization of some arid zone soils with cement and lime Quarterly Journal of Engineering Geology London, Vol. 18, 173-180 1985.
- [39] **Croft JB** The problem in predicting the suitability of soils for cementitious stabilization. Engineering Geology Vol. 2(6) 397-424, 1968.
- [40] **Bahar R, Benazzoug M, Kenai S.** Performance of compacted cement stabilized soil. Cement and Concrete Composites Elsevier Applied Science Publishers, U.K., Vol. 25, No 6, pp 633
- [41] **Venkatrama Reddy BV, Gupta A.** Characteristics of soil cement blocks using highly sandy soils Journal of Materials and Structures, 38, 651-658, 2005.
- [42] **Meukam P, Jannot Y, Noumowe A, Kofane TC.** Thermo physical characteristics of economical building materials. Construction and Building Materials, Volume 18, issue 6, pp. 437-443, 2004
- [43] **Jarrige JF.** Chronology of the Earlier Periods of the Greater Indus as seen from Mehrgarh Pakistan pp. 21-28 in South Asian Archaeology ed. B. Alichin Cambridge University Press 1989.
- [44] **Le Roux A.** Contribution à l'étude du traitement à la chaux des matériaux argileux. Thèse de doctorat Université des Sciences d'Orsay ; 106 p, 1969.
- [45] **Le Roux A.** Détermination de l'altérabilité des marnes. Congrès de géologie, Madrid, 4-7 sept Asoc. Espanola de geología-aplicada à la ingeniería, session II, vol. 1, pp. 84-90, 1978.
- [46] **Le Roux A.** Traitement des sols argileux par la chaux. Bull. liaison Labo P. et ch. Sept.-oct., n° 40, pp 59-96, 1969.
- [47] **Moore, R.K.** Lime Stabilization Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C. State of the art report 5. 59 p 1987
- [48] **Locat J, Bérubé MA, Choquette M.** Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development Revue canadienne de géotechnique. Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ont. Volume 27 number 3 10 p, 1990
- [49] **Rogers CDF, Glendenning S, Dixon N.** Lime Stabilisation. Proceedings of the seminar held at Loughborough University Civil & Building Engineering Department 25 September, 1996. Thomas Telford London England 18p 1996 b
- [50] **Rogers CDF, Glendenning S** Modification of Clay Soils Using Lime. pp. 99-114. Dans Rogers CDF., Glendenning S, Dixon N. (éditeurs). Proceedings of the seminar on Lime Stabilization held at Loughborough University Civil & Building Engineering Department. 25

Septembre 1996 Thomas Telford London England 183 1996a.

[51] **Chouquette M.** La stabilisation à la chaux des sols argileux du Québec. These de Ph.D

[52] **Kézdi A.** Stabilized Earth Roads Developments in geotechnical engineering 19 Elsevier Scientific Publishing Company New York NY 327 1979

[53] **Prusinski JR, Bhattacharja S.** Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. pp 215-227 Présenté au Seventh International Conference on Low-Volume

[54] **Holtz RD.** Introduction à la géotechnique. Edition de l'école Polytechniques de Montréal, Canada, 808 p, 1991

[55] **Bergado DT, Anderson LR, Miura N Balasubramaniam AS.** Soft Ground Improvement in lowland and other Environment ASCE Press New York 1996

[56] **Little D N** Fundamentals of the stabilization of soil/ with lime. National Association Arlington Virginia Bulletin 332 20p 1987 Lime

[57] **Broms BB.** Stabilization of Soil with Lime Columns Foundation Engineering Handbook, 2nd Edition Ed. Hsai Yang Fang Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 833-855, 1991.

[58] **Symons WG.** Properties of Australian soils stabilized with cementitious binders. Structural Materials and Assemblies Group, University of South Australia The Levels, South Australia, 1999.

[59] **Millogo Y, Hajjaji M, Ouedraogo R.** Microstructure and physical properties of lime clay adobe bricks Construction and Building Materials, 2386-2392 Volume 22 2008

[60] **TESORIERE G. et al.** "Studio sperimentale sulla terra. Calce cemento" Analisi del comportamento Meccanico Industriale italiana del cemento (ITA), 1981, 5, n°6, pp. 435-444.

[61] **GUETTALA A.** Béton de terre stabilisé: amélioration de sa durabilité à l'heure de doctorat, Université de Biskra, 203 p, 2003.

[62] **KERALIAG.** Durability of Compressed and Cement-Stabilized Building Blocks. Ph.D. Thesis, Development Technology Unit, Warwick University, 2001.

[63] **Ausroads.** Guide to stabilization in roadwork. Ausroads Research Group, Sydney, 1998.

[64] **Swamy RN.** Vegetable fiber reinforced cement composite A false dream or a potential reality. In: Sobral H.S, editor. Proceedings of the second international RILEM symposium, vegetable plants and their fibers as building materials, Salor, Bahia (Brazil), Chapman and Hall; p. 139-49, 1990.

[65] **Hammond, A.A.,** prolongation de la durée de vie des constructions en terre sous les tropiques.

[66] **Guetkala. A** (Amélioration du béton de terre stabilisée vis à vis de l'eau) thèse de doctorat à l'université (Biskra 2003).

- [67]Ghoumari F., Matériau en terre crue compactée : amélioration de sa durabilité à l'eau thèse de doctorat, (Inass de Lyon, France 1989)
- [68]Guettala. A. et Mezghiche, B., vibro-compactage du matériau terre pour l'élaboration des blocs à bâtir tome 3, p(117-125),(décembre 1996).
- [69]LAZAR KHALED, Mémoire de magister «caractérisation et valorisation du sable du grand erg oriental »,u.s.t.h.b. Alger, Algérie, 2012.
- [70]Azzouz Hocine, Mémoire de Magister « étude des bétons à base des sables de dune », Université Mohamed kheider, Biskra, Algérie, 2009.
- [71]REZIG Salima, Mémoire de Master «Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux», Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2012.
- [72]Tafraoui Ahmed, thèse de doctorat « contribution à la valorisation du sable de dune de l'erg occidental, (Algérie). application aux nouveaux bétons », Université de Toulouse, France, 2009.
- 73Benchaa Benabed1 et al, « Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes », Université Amar Telidji de Laghouat, Algérie, Chambéry, Savoie, 6 a 8 juin 2012.
- [74]USACE.Soilengineering and stabilization. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, 2000.
- [75]Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. Construire en terre. Editions Alternatives et Parallèles, collection AnArchitecture, Paris, France, 265p, 1979.
- [76]Houben H, Guillaud H. Traité de construction en terre. CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, 355 p, 2006.
- [77]American Society for Testing and materials. Annual Book of Astmstandards,(V. 04.01,Philadelphia).
- [78]Touré, P. M., V. Sambou, M. Faye, A. Thiam, M. Adj, et D. Azilidon. (2017). Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB). Journal of Building Engineering 13, 266-271.
- 79Kerali AG. Durability of compressed and cement-stabilized building blocks. Ph.D Thesis. UK: University of Warwick, school of Engineering, September 2001.
- [80]Venkatarama Reddy B V., Gupta A. Characteristics of soil-cement blocks using highly sandy soils. *Materials and Structures* [Internet]. 2005 Mar 9 [cited 2013 Jun 3];38(280):651–8. Available from: <https://www.rilem.net/boutique/fiche.php?cat=journal&reference=1765>
- [81]LAYEBAbdelouhab et HALBAOUI Ahmed : Mémoire : *Caractérisations physico-mécaniques d'un bloc de terre stabilisé avec la chaux à base des fibres (déchet de pneu usés - Verre)*107/2017
- [82]G. Debicki : Les relations contrainte- déformation des *fibres* de renforcement) 1987

[83] **Baley** : différentes fibres végétales Une fibre végétale est assimilable, **2013**

[84] CRA Terre « Blocs de terre comprimée normes » Série Technologies

[85] TolêdoFilho, R. D., K. Scrivener, G. L. England, et K. Ghavami. (2000). Durability of alkalisensitivesisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement and Concrete*

[86] Mishra, S., A. K. Mohanty, L. T. Drzal, M. Misra, et G. Hinrichsen. (2004). A Review on Pineapple Leaf Fibers, Sisal Fibers and Their Biocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering* 289, 955-974. *Composites* 22, 127-143.

[87] Prabakar, J. et R. .Sridhar. (2002). Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. *Construction and Building Materials* 16, 123-131.

[88] Jamellodin, Z., Z. Talib, R. Kolop, et N. Noor. (2010). The effect of oil palm fibre on strength behaviour of soil. Présenté à 3rd SANREM conf, kotakinabalu, Malaysia

[89] Hamard, E., B. Cazacliu, A. Razakamanantsoa, et J.-C. Morel. (2016). Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building. *Building and Environment* 106, 103-119.

[90] Bryce.. (2010). *Construire en terre facilement - La technique du cob*. La Plage. *Environment* 106, 103-119.

[91] Bouhicha, M., F. Aouissi, et S. Kenai. (2005). Performance of composite soil reinforced with barley straw. *Cement and Concrete Composites* 27, 617-621.

[92] Weismann, A. et K. Bryce. (2010). *Construire en terre facilement - La technique du cob*. La Plage.

[93] Abtahi, S. M., M. Sheikhzadeh, et S. M. Hejazi. (2010). Fiber-reinforced asphalt-concrete – A review. *Construction and Building Materials* 24, 871-877.

[94] Islam, M. S. et K. Iwashita. (2010). Earthquake Resistance of Adobe Reinforced by Low Cost Traditional Materials. *Journal of Natural Disaster Science* 32, 1-21.

[95] **Marandi M, Bagheripour H, Rahgozar R, Zare H**. Strength and ductility of randomly distributed palm fibers reinforced silty-sand soils. *Am J ApplSci*;5:209–20, 2008.

[96] **Venkatarama Reddy BV, and Hubli SR**. Properties of lime stabilised steam-cured blocks for masonry. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol. 35, pp 293-300, 2002.

- [97] **Namango SS.** Development of cost-effective earthen building material for housing wall construction. In: Investigations into the properties of compressed earth blocks stabilized with sisal vegetable fibres. cassava powder and cement compositions. A doctoral dissertation. Brandenburg Technical University; Cottbus ,Germany, 2006.
- [98]**Khedari J, Watsanasathaporn P, Hirunlabh J.** Development of fibre-based soilcement block with low thermal conductivity. *CemConcr Compos*; 27(1):111–116, 2005.
- [99]**Ghavami K, Filho RDT, Barbosa NP.** Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *CemConcr Compos*; 21(1):39–48, 1999.
- [100]**Robert ME, Engelbert DO, Thierry YN, Lezin SM.** Potential of salvaged steel fibers for reinforcement of unfired earth blocks. *ConstrBuildMater*;35(10):340–6, 2012.
- [101] **Rigassi V.** Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRATerre-EAG, Friedrich Vieweg&Sohn, Braunschweig, Allemagne,104 p, 1995
- [102] **KeraliAG.**Durability of Compressed and Cement-Stabilised Building Blocks. Ph.D. Thesis, DevelopmentTechnology Unit, Warwick University, 2001..
- [103] **Collet et al. 2008**].Articles universitaire correspondante aux termes]
- [104] SI HO et a . 2017 : Articles universitaire correspondante aux termes] SI HO et a . 2017

