



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED KHIDER - BISKRA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL ET D'HYDRAULIQUE

Ref :.....

Thèse de Doctorat en Sciences
Spécialité : Génie Civil

Présentée par :

TAALLAH Bachir

**ETUDE DU COMPORTEMENT PHYSICO-MECANIQUE
DU BLOC DE TERRE COMPRIMÉE AVEC FIBRES**

Soutenu publiquement le : 14/12/2014

Devant le jury :

MELLAS Mekki	Président	Professeur	Université de Biskra
GUETTALA Abdelhamid	Rapporteur	Professeur	Université de Biskra
MEZGHICHE Bouzidi	Examineur	Maître de Conférences 'A'	Université de Biskra
CHABIL Hocine	Examineur	Professeur	Université de Constantine
ZEGHICHI Leila	Examineur	Professeur	Université de M'Sila
BOUDCHICHA Abdelaziz	Examineur	Professeur	Université d'Oum El-Bouaghi

REMERCIEMENTS

D'abord, je voudrais remercier ma famille pour leur soutien et leurs encouragements pour poursuivre la thèse.

Je voudrais exprimer ma gratitude au Professeur GUETTALA Abdelhamid, mon directeur de thèse, pour m'avoir confié ce travail. Je lui suis très reconnaissant pour la qualité des nombreux conseils, son attention, et bien évidemment pour les connaissances et son expérience de la recherche qu'il a su me transmettre, et qui j'en suis sûre me seront bénéfiques dans les années futures.

J'exprime mes vifs remerciements au Professeur MELLAS Mekki, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance, je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres de jury pour l'honneur qu'il me faisait en participant à ce jury et de bien vouloir juger ce travail :

- Pr. CHABIL Hocine ;
- Dr. MEZGHICHE Bouzidi ;
- Pr. ZEGHICHI Leila ;
- Pr. BOUDCHICHA Abdelaziz.

Merci à Monsieur le chef de département, le professeur BOUZIANE Toufik pour son aide et ses encouragements.

J'exprime ma profonde gratitude au Pr. KRIKER Abdelouahed, Dr. ZATAR Abdallah et Dr. GUETTALA Salim, pour leur encouragement et leur aide dans l'accomplissement de cette thèse.

Je tiens aussi à remercier tous les membres du laboratoire de génie civil pour leurs conseils, leur soutien et leur aide précieuse pendant la durée de mes travaux.

Enfin un remerciement particulier et personnel à l'ensemble de mes enseignants qui ont contribué à ma formation, à tous mes amis et collègues de travail qui ont grandement contribué à faire de mon passage au doctorat une belle expérience.

المخلص

قصد تثمين المواد المحلية و المساهمة في التقليل من تكاليف البناء و الطاقة المستهلكة في التدفئة و التكييف ، تم استخدام الألياف السطحية لنخلة التمر (الليف) لتثبيت لبنات التربة المضغوطة .

الهدف الرئيس لهذا العمل هو دراسة تأثير استخدام الألياف النباتية، وبشكل خاص ألياف نخلة التمر على الخصائص الميكانيكية والسلوك الميكانيكي للبنات التربة المضغوطة، وقد انصب البحث كذلك على درجة تأثر الكتل بالماء من خلال درجة الامتصاص الكلية للماء و كذا الانتفاخ. إن استخدام قش الشعير و ألياف البوليبروبيلان في هذه الدراسة هو بهدف المقارنة فقط. في هذا الإطار قمنا باستخدام ثلاث نسب من الاسمنت (5 % و 6.5 % و 8 %) و ثلاث نسب من الجير الحي (8 % و 10 % و 12 %) و أربع نسب من الألياف (0.05 % و 0.1 % و 0.15 % و 0.2 %) و هذا بالنسبة لوزن الخليط الجاف و كذلك ثلاث اجهادات للرص (1.5 MPa و 5 MPa و 10 MPa).

النتائج بينت وجود تحسن طفيف في مقاومة الضغط للبنات في الحالة الجافة و هذا عند نسبة ألياف 0.05 % ونسبة اسمنت 8 % و 10 MPa كإجهاد رص، بينما في حالة الجير الحي فإن التحسن مس مقاومة الشد للبنات في الحالة الجافة عند 0.05 % كنسبة ألياف و 8 % و 12 % جير. أما بالنسبة لباقي الحالات المدروسة فإن إضافة الألياف سواء كانت خامة أو معالجة في محلول الصودا له تأثير سلبي على خصائص لبنة التربة المضغوطة. في المقابل فإن وجود الألياف له تأثير إيجابي على السلوك الميكانيكي للمادة المركبة، وذلك بزيادة ليونتها بالمقارنة مع السلوك المتميز بالقابلية للانكسار بالنسبة للمادة الخالية من الألياف. بينت هذه الدراسة كذلك أن زيادة إجهاد الرص له تأثير إيجابي على مختلف الخصائص المدروسة. كما توضح النتائج انخفاض عام في درجة الامتصاص الكلية للماء و كذا انتفاخ البنات مع زيادة نسبة المادة الرابطة و نقصان نسبة ألياف نخلة التمر. كما تبين كذلك أن مقاومة الضغط في الحالة الجافة للبنات التربة المضغوطة و المثبتة بالجير الحي تزداد بزيادة زمن المعالجة في المجفف. البنات المعالجة في المجفف أعطت مقاومة أفضل من تلك المحصل عليها في حالة المعالجة في المخبر أو بالبخر الطبيعي، مع الإشارة أن هذه الأخيرة لها ميزة عدم استهلاكها للطاقة.

الكلمات المفاتيح: لبنات التربة المضغوطة، ألياف نخلة التمر، المقاومة، الامتصاص الكلي للماء، الانتفاخ، السلوك الميكانيكي.

RESUME

Afin de valoriser les matériaux locaux et de contribuer à la réduction des coûts de construction et de l'énergie consommée pour le chauffage ou la climatisation, des fibres de surface de palmier dattier ont été utilisées pour stabiliser les blocs de terre comprimée (BTC). L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de l'utilisation des fibres végétales, notamment les fibres de palmier dattier sur les propriétés mécaniques et sur le comportement mécanique du BTC. L'étude s'est focalisée aussi sur sa sensibilité à l'eau, à travers son absorption totale et son gonflement. L'utilisation de la paille d'orge hachée et des fibres de polypropylène dans cette étude est seulement à titre de comparaison. Dans ce cadre, on a utilisé trois teneurs en ciments (5, 6.5 et 8 %), trois teneurs en chaux vive (8, 10 et 12 %), quatre teneurs en fibres (0.05, 0.1, 0.15 et 0.2 %) du poids du mélange sec et trois contraintes de compactage (1.5, 5 et 10 MPa). Les résultats indiquent qu'il y a une légère amélioration de la résistance à la compression sèche des blocs avec 0,05% en fibres, 8 % en ciment et une contrainte de compactage de 10 MPa. Alors que pour le cas de la chaux vive, l'amélioration a touché la résistance à la traction sèche des blocs avec 0,05% en fibres et pour 8 % et 12 % en chaux. Mais pour le reste des cas étudiés, l'ajout des fibres brutes ou traitées à la solution de soude a un effet négatif sur les propriétés du BTC. En revanche, la présence des fibres a un effet positif sur le comportement mécanique du composite, en augmentant sa ductilité par rapport au comportement fragile de la matrice seule. Cette étude a montré aussi que l'augmentation de la contrainte de compactage a un effet bénéfique sur l'ensemble des propriétés étudiées. Les résultats montrent aussi une baisse générale de l'absorption totale d'eau et du gonflement des blocs avec l'augmentation de la teneur en liant et avec la diminution de la teneur en fibres de palmier dattier. La résistance à la compression sèche des BTC à base de chaux augmente avec le temps de cure à l'étuve. Les blocs curés à l'étuve ont donné une résistance meilleure que celle des BTC curés au laboratoire ou avec de la vapeur naturelle, tout en signalant que ce dernier type de cure présente l'avantage d'absence de dépense énergétique.

Mots Clés : bloc de terre comprimée; fibres de palmier dattier ; résistance ; absorption totale d'eau; gonflement, comportement mécanique.

ABSTRACT

In order to valorize local materials, to contribute to the reduction of construction costs and energy consumption for heating or cooling, the surface fibers of dates palm were used to stabilize the compressed earth blocks (CEB). The main objective of this work is to study the effect of the use of vegetable fibers, such as date palm fibers on the mechanical properties and the mechanical behavior of the BTC. The study has also focused on its sensitivity to water, through its swelling and total absorption. The use of chopped barley straw and polypropylene fibers in this study is just for comparison. In this context, three cement content (5 , 6.5 and 8 %) , three quicklime content (8, 10 and 12 %) , four fiber content (0.05, 0.1 , 0.15 and 0.2 %) by weight dry mixing and three compaction pressure (1.5, 5 and 10 MPa) were used. The results indicate that there is a slight improvement in the dry compressive strength of the blocks with 0.05 % fibers, 8 % cement and 10 MPa of compaction pressure. While in case of the quicklime, the improvement concerned the dry tensile strength of the blocks with 0.05% fibers and 8% and 12% lime content. But for the rest of the cases studied, the addition of raw fibers or treated fibers with sodium hydroxide solution has a negative effect on the properties of CEB. However, the presence of the fibers has a positive effect on the mechanical behavior of the composite by increasing its ductility compared to the brittle behavior of the matrix alone. This study also showed that the increase in the compaction pressure has a beneficial effect on all the properties studied. The results also show an overall decrease in total water absorption and swelling of the blocks with increasing binder content and with decreasing date palm fiber content. The dry compressive strength of CEB with lime increases with curing time in the oven. The cured blocks in the oven gave better strength than cured CEB in laboratory conditions or in natural steam, while noting that the latter type of cure has the advantage of absence of energy expenditure.

Keywords: Compressed earth block; Date palm fibers; strength; total water absorption; swelling, mechanical behavior.

Table des matières

Remerciements	i
الملخص.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des figures.....	x
Liste des tableaux.....	xvii
Liste des abréviations.....	xviii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
PREMIÈRE PARTIE :	
CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	5
1.1 Introduction.....	6
1.2 Techniques de construction en terre.....	6
1.3 Blocs de terre comprimé (BTC).....	7
1.4 Diversités des produits de blocs de terre comprimée.....	8
1.5 La construction en bloc de terre comprimée dans le monde.....	9
1.6 La terre, un matériau de construction.....	11
1.6.1 Définition.....	11
1.6.2 Composition.....	11
1.6.3 Rappel sur Les argiles.....	11
1.6.3.1 Définition.....	12
1.6.3.2 Structure.....	12
1.6.3.3 Classification des argiles.....	13
1.6.3.4 Principaux types d'argiles.....	14
1.7 Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de la terre.....	17
1.7.1 Texture ou Granularité.....	18
1.7.2 La plasticité.....	19
1.7.3 La compressibilité.....	19
1.7.4 La cohésion.....	20
1.8 Stabilisation.....	20
1.8.1 Définition.....	20
1.8.2 Objectifs.....	21
1.8.3 Procédés.....	21
1.6.3.1 Stabilisation mécanique.....	21
1.6.3.2 Stabilisation physique.....	21
1.6.3.3 Stabilisation chimique.....	21

1.8.4	Moyens de la stabilisation.....	22
1.8.5	Densification par compression.....	23
1.8.5.1	Méthodes de compression.....	24
1.8.5.2	Influence de la teneur en eau sur la densité.....	24
1.8.5.3	Influence de l'énergie de compactage.....	26
1.8.5.4	Influence de la granularité du sol.....	27
1.8.6	Densification par gradation.....	29
1.8.7	Stabilisation au ciment.....	30
1.8.7.1	Généralités.....	30
1.8.7.2	Mécanisme de stabilisation.....	31
1.8.7.3	Efficacité et dosage.....	33
1.8.7.4	Effets sur les propriétés du matériau stabilisé.....	34
1.8.8	Stabilisation à la chaux.....	37
1.8.8.1	Généralités.....	37
1.8.8.2	Mécanismes.....	38
1.8.8.3	Efficacité et dosage.....	42
1.8.8.4	Effet sur la résistance mécanique du matériau stabilisé.....	42
1.8.8	Stabilisation mixte chaux-ciment.....	45
1.8.9	Stabilisation par fibres.....	47
1.9	Les fibres.....	47
1.9.1	Différents types de fibres.....	47
1.9.2	Les fibres végétales.....	50
1.9.2.1	Le palmier dattier.....	50
1.9.2.2	Les fibres de palmier dattier.....	53
1.9.2.3	Caractéristiques générales des fibres lignocellulosiques.....	55
1.10	Propriétés des composites à matrice cimentaire renforcés par des fibres.....	59
1.11	L'effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des sols.....	65
1.11.1	Les fibres de palmier dattier.....	62
1.11.2	Les fibres de polypropylène.....	63
1.12	L'effet de la stabilisation par les fibres naturelles sur les propriétés des adobes.....	65
1.13	L'effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des blocs de terre comprimée.....	66
1.13.1	Effet des fibres sur les propriétés mécaniques.....	67
1.13.2	Effet des fibres sur l'absorption d'eau.....	74
1.13.3	Effet des fibres sur les propriétés thermiques.....	74
1.14	Effet du traitement des fibres végétales sur les propriétés des composites.....	75
1.15	Durabilité des fibres végétales en milieu alcalin.....	77
1.16	Méthodes d'amélioration de la durabilité des composites renforcés par des fibres végétales.....	80
1.17	Conclusion.....	82

DEUXIÈME PARTIE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.....	83
CHAPITRE 2 : MATERIAUX DE L'ETUDE ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES.....	84
2.1 Introduction.....	85
2.2 Matériaux utilisés.....	85
2.2.1 Sol.....	85
2.2.1.1 Origine du sol.....	85
2.2.1.2 Caractéristiques physiques du sol.....	85
2.2.1.3 Analyse chimique et minéralogique.....	88
2.2.1.4 Matière organique.....	89
2.2.1.5 Analyse physico-chimique.....	89
2.2.2 Sable concassé.....	90
2.2.3 Ciment.....	91
2.2.4 Chaux.....	92
2.2.5 L'eau.....	92
2.2.6 Fibres.....	92
2.2.6.1 Fibres de palmier dattier.....	92
2.2.6.2 La paille d'orge hachée.....	94
2.2.6.3 Les fibres de polypropylène.....	95
2.3 Confection des blocs.....	96
2.3.1 Matériel spécifique.....	96
2.3.2 Mélanges.....	96
2.3.3 Codification des mélanges.....	99
2.3.4 Préparation des mélanges.....	99
2.3.5 Optimisation de la teneur en eau.....	100
2.3.6 Compactage des mélanges.....	101
2.4 La cure des blocs.....	102
2.4.1 Conservation au laboratoire.....	103
2.4.2 Cure à l'étuve.....	103
2.4.3 Cure à vapeur naturelle.....	104
2.5 Propriétés mécaniques.....	104
2.5.1 Essai de compression simple.....	105
2.5.1.1 Résistance à la compression sèche.....	105
2.5.1.2 Résistance en compression à l'état humide.....	106
2.5.2 Essai de traction par fendage.....	106
2.6 Absorption totale.....	107
2.7 Gonflement.....	107
2.8 Comportement mécanique.....	108
2.9 Conclusion.....	109

CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	110
3.1	Introduction..... 111
3.2	Influence du mode et de temps de cure sur la résistance mécanique du BTC fibré 111
3.2.1	Effet du mode de cure..... 112
3.2.2	Effet du temps de cure 114
3.3	Effet de la teneur en fibres de palmier dattier sur la masse volumique apparente du BTC..... 115
3.4	Effet de la teneur en fibres de palmier dattier sur les propriétés du BTC..... 117
3.4.1	La résistance à la compression sèche..... 117
3.4.1.1	Les BTC à base de ciment..... 117
3.4.1.2	Les BTC à base de chaux..... 119
3.4.2	La résistance à la compression humide..... 121
3.4.2.1	Les BTC à base de ciment..... 121
3.4.2.2	Les BTC à base de chaux..... 123
3.4.3	la résistance à la traction sèche..... 124
3.4.3.1	Les BTC à base de ciment..... 124
3.4.3.2	Les BTC à base de chaux..... 126
3.4.4	L'absorption totale..... 127
3.4.4.1	Les BTC à base de ciment..... 127
3.4.4.2	Les BTC à base de chaux..... 131
3.4.5	Le gonflement..... 133
3.4.5.1	Les BTC à base de ciment..... 133
3.4.5.2	Les BTC à base de chaux..... 133
3.5	Effet de la teneur en fibres de polypropylène sur les propriétés mécaniques du BTC..... 135
3.5.1	La résistance à la compression sèche..... 135
3.5.2	La résistance à la traction sèche..... 135
3.6	Effet de la contrainte de compactage sur les propriétés du BCPD..... 137
3.6.1	La résistance à la compression sèche..... 137
3.6.2	La résistance à la compression humide..... 138
3.6.3	La résistance à la traction sèche..... 139
3.6.4	L'absorption totale..... 140
3.6.5	Le gonflement..... 141
3.7	Effet du traitement chimique des fibres de palmier dattier sur les propriétés du BTC..... 141
3.7.1	La résistance à la compression sèche..... 142
3.7.2	La résistance à la compression humide..... 143
3.7.3	La résistance à la traction sèche..... 144

3.8	Comportement mécanique du BTC fibré.....	145
3.8.1	Fibres de palmier dattier.....	145
3.8.1.1	Fibres brutes.....	145
3.8.1.2	Fibres traitées.....	146
3.8.2	Fibres de polypropylène.....	149
3.9	Effet du type de fibres sur les propriétés mécaniques du BTC à base de chaux....	150
3.9.1	La résistance à la compression sèche.....	150
3.9.2	La résistance à la traction sèche.....	151
3.10	Conclusion.....	153
	Conclusion générale.....	156
	Recommandations.....	162
	Perspectives.....	164
	Références bibliographiques.....	166
	Annexes.....	179
	Liste des publications et communications issues de la thèse.....	182

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 :	Schéma des différentes techniques de construction en terre établi par le groupe CRATERRE en 1986.....	7
Figure 1.2 :	Différents produits de blocs de terre comprimée.....	9
Figure 1.3 :	Maison palmier à Marrakech, Maroc.....	10
Figure 1.4 :	Domaine de la terre, l'Isle d'Abeau, France.....	10
Figure 1.5 :	Atelier électronique, Ecole, Auroville, Inde.....	10
Figure 1.6 :	Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicate 2:1.....	13
Figure 1.7 :	Schéma de la structure de la kaolinite.....	15
Figure 1.8 :	Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite.....	15
Figure 1.9 :	Schéma de la structure de la montmorillonite.....	16
Figure 1.10 :	Structure de la montmorillonite.....	16
Figure 1.11 :	Schéma de la structure de l'illite.....	17
Figure 1.12 :	Photographie au microscope à balayage électronique d'une illite de Fithian, Illinois.....	17
Figure 1.13 :	Effet du compactage sur les vides des sols.....	23
Figure 1.14 :	Courbe type de dureté (résistance à la compression et densité).....	24
Figure 1.15 :	Relation typique entre la teneur en eau- densité.....	25
Figure 1.16 :	Effets du compactage, en fonction de l'énergie de compactage, sur la structure du sol.....	26
Figure 1.17 :	La variation de la résistance en fonction de la teneur en ciment et la contrainte de compactage.....	27
Figure 1.18 :	Influence de la contrainte de compactage et de la teneur en ciment sur les résistances mécaniques en compression.....	27
Figure 1.19 :	La relation entre la teneur en la densité sèche pour 7 types de sol.....	28
Figure 1.20 :	Evolution des limites d'Atterberg avec la teneur en sable.....	29
Figure 1.21 :	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.....	30
Figure 1.22 :	Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la compression du bloc de terre comprimée stabilisée au ciment.....	31

Figure 1.23 :	Effet de la teneur en ciment et la contrainte de compactage sur la densité sèche du bloc de terre comprimée.....	34
Figure 1.24 :	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.....	35
Figure 1.25 :	Variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en ciment pour 3 types de sols en zone aride australienne.....	36
Figure 1.26 :	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.....	36
Figure 1.27 :	Variation du taux d'absorption d'eau dans le temps du bloc de terre comprimée stabilisée avec différentes teneurs en ciment.....	37
Figure 1.28 :	Variation des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage de chaux par poids.....	39
Figure 1.29 :	Déplacement de la courbe Proctor suite à une stabilisation à la chaux.....	41
Figure 1.30 :	Variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux pour 3 types de sols en zone aride australienne.....	43
Figure 1.31 :	Evolution de la résistance à la compression des briques d'adobe en fonction de la teneur en chaux.....	43
Figure 1.32 :	La variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et le temps.....	44
Figure 1.33 :	Influence de la contrainte de compactage et de la teneur en chaux sur les résistances mécaniques.....	44
Figure 1.34 :	Résistance à la compression (Rc) en fonction du temps.....	46
Figure 1.35 :	Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine.....	48
Figure 1.36 :	Photo des palmiers dattiers.....	51
Figure 1.37 :	Structure générale d'un palmier dattier.....	53
Figure 1.38 :	Photo d'une section du tronc du palmier dattier.....	54
Figure 1.39 :	Photo du lif autour du tronc du palmier dattier.....	54
Figure 1.40 :	Observation sous MEB des fibres de palmier dattier mâle de surface : (a) coupe transversale typique ; (b) coupe longitudinale typique ; (c) vue longitudinale de la fibre.....	55
Figure 1.41 :	Structure des fibres de bois (observations multi échelles: d'après Harrington.....	58

Figure 1.42 :	Structure tridimensionnelle de la paroi primaire.....	59
Figure 1.43 :	Courbes du comportement typique d'un échantillon de ciment pur (1) et d'un composite ciment/fibres de chanvre (2) en flexion 3 points.....	60
Figure 1.44 :	Les résistances à la compression maximales avec les teneurs en fibres de palmier dattier.....	62
Figure 1.45 :	Les courbes contrainte-déformation des échantillons de sol renforcés et non renforcés par des fibres de palmier sous l'essai de compression non confiné.....	63
Figure 1.46 :	La relation entre la résistance à la compression non confinée et la teneur en fibres.....	64
Figure 1.47 :	Effet de la teneur en fibres sur le gonflement des échantillons d'un sol traité à la chaux et renforcé par des fibres de polypropylène après 7 jours de cure.....	64
Figure 1.48 :	Influence de 4% de fibres sur la relation contrainte-déformation du sol.....	65
Figure 1.49 :	Les courbes de la résistance à la compression en fonction de la teneur et la longueur des fibres.....	68
Figure 1.50 :	Les courbes de la résistance à la flexion en fonction de la teneur et la longueur des fibres.....	68
Figure 1.51 :	Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en fibres de sisal.....	69
Figure 1.52 :	Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en fibres de sisal.....	69
Figure 1.53:	L'influence de la teneur en fibres sur la résistance à la compression.....	70
Figure 1.54:	Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en paille d'orge hachée.....	71
Figure 1.55 :	Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en paille d'orge hachée.....	72
Figure 1.56 :	Variation retrait linéaire en fonction de la teneur en paille d'orge hachée.....	72
Figure 1.57:	Effet de la teneur en fibres d'acier sur la résistance à la traction pour des blocs de terre comprimée stabilisée à 6% de ciment.....	73

Figure 1.58 :	Le comportement à la traction du bloc de terre comprimée renforcée par des fibres naturelles.....	73
Figure 1.59 :	L'influence de la teneur en fibres de coco sur la conductivité thermique.....	75
Figure 1.60 :	L'influence de la teneur et la longueur des fibres d'hibiscus cannabinus sur la conductivité thermique du bloc de terre comprimée.....	75
Figure 1.61 :	Représentation schématique de la décomposition des fibres de sisal en milieu alcalin.....	79
Figure 2.1 :	La courbe granulométrique du sol.....	86
Figure 2.2 :	Diagramme de plasticité (la norme XP P 13-901).....	87
Figure 2.3 :	La courbe granulométrique du sable concassé.....	91
Figure 2.4 :	Le lif après son arrachement du palmier dattier.....	93
Figure 2.5 :	Les fibres résultant de la décomposition du lif.....	93
Figure 2.6 :	Les fibres découpées en morceaux.....	93
Figure 2.7 :	La paille hachée d'orge.....	95
Figure 2.8 :	Les fibres de polypropylène.....	96
Figure 2.9 :	Le schéma du moule utilisé pour la fabrication des BTC.....	96
Figure 2.10 :	Combinaison des mélanges des blocs.....	97
Figure 2.11 :	Optimisation de la teneur en eau.....	101
Figure 2.12 :	Conservation des blocs au laboratoire.....	103
Figure 2.13 :	Cure à l'étuve des BTC.....	103
Figure 2.14 :	Enceinte métallique pour l'étuvage naturel des BTC, selon la procédure de Benammar et al.....	104
Figure 2.15 :	Coupe du bloc en deux demi-blocs et superposition de ces derniers (norme XP 13-901).....	105
Figure 2.16 :	Le bloc après écrasement.....	105
Figure 2.17 :	l'essai de traction par fendage.....	106
Figure 2.18 :	Blocs pour mesure du gonflement (norme XP 13-901).....	107
Figure 2.19 :	L'immersion des blocs pour mesurer le gonflement (norme XP 13-901...)	108
Figure 2.20 :	Schéma de principe du dispositif de mesure des déformations.....	108
Figure 3.1 :	Résistances à la compression sèche et humide du BXPB à base de 10% en chaux et 0.1% de fibres en fonction du mode de cure.....	113

Figure 3.2 :	La résistance à la traction sèche du BXPD à base de 10% en chaux et 0.1% de fibres en fonction du mode de cure.....	113
Figure 3.3 :	La résistance à la compression sèche du BXPD à base de 10% en chaux et 0.1% de fibres en fonction du temps de cure.....	115
Figure 3.4 :	La résistance à la traction sèche du BXPD à base de 10% en chaux et 0.1% de fibres en fonction du temps de cure.....	115
Figure 3.5 :	La masse volumique apparente du BTC à base de 10 % de chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	116
Figure 3.6 :	Résistance à la compression sèche du BCPD en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	118
Figure 3.7 :	Résistance à la compression sèche du BTC à base de chaux sans fibres curé 28 jours au laboratoire en fonction de la teneur en chaux (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	120
Figure 3.8 :	Résistance à la compression sèche du BXPD curé 28 jours au laboratoire en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	121
Figure 3.9 :	Résistance à la compression humide du BCPD en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	122
Figure 3.10 :	Rapport de la résistance à la compression sèche sur la résistance humide (RCS/RCH) du BCPD en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	122
Figure 3.11 :	Résistance à la compression humide du BXPD curé 28 jours au laboratoire en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	123
Figure 3.12 :	Rapport de la résistance à la compression sèche sur la résistance humide (RCS/RCH) du BXPD en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	124
Figure 3.13 :	Résistance à la traction sèche du BCPD en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	126
Figure 3.14 :	Résistance à la traction sèche du BXPD curé 28 jours au laboratoire en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	127

Figure 3.15 :	La variation de l'absorption totale du BCPD en fonction de la teneur en ciment et la teneur en fibres après un jour d'immersion dans l'eau (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	128
Figure 3.16 :	Effet de la teneur en fibres sur l'absorption totale d'eau du BCPD (pour une contrainte de compactage de 10 MPa) : (a) 5% en ciment ; (b) 6,5% en ciment ; (c) 8% en ciment ;.....	130
Figure 3.17 :	La variation de l'absorption totale du BCPD curé 28 jours au laboratoire en fonction de la teneur en ciment et la teneur en fibres après un jour d'immersion dans l'eau (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	131
Figure 3.18 :	Effet de la teneur en fibres sur l'absorption totale d'eau du BCPD à base de ciment curé 28 jours au laboratoire (pour une contrainte de compactage de 10 MPa) : (a) 8 % en ciment ; (b) 10 % en ciment ; (c) 12 % en ciment ;.....	132
Figure 3.19:	Le gonflement du BCPD par immersion à l'eau en fonction de la teneur en fibres pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	134
Figure 3.20 :	Le gonflement par immersion à l'eau du BCPD curé 28 jours au laboratoire en fonction de la teneur en fibres pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	134
Figure 3.21 :	Résistance à la compression sèche du BCPD à base de 8 % en ciment en fonction de la teneur en fibres de polypropylène (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	136
Figure 3.22 :	Résistance à la traction sèche du BCPD à base de 8 % en ciment en fonction de la teneur en fibres de polypropylène (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	136
Figure 3.23 :	Effet de la contrainte de compactage sur la résistance à la compression sèche du BCPD à base de 5% de ciment.....	137
Figure 3.24 :	Effet de la contrainte de compactage sur la résistance à la compression humide du BCPD.....	138
Figure 3.25 :	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.....	139
Figure 3.26 :	Effet de la contrainte de compactage sur la résistance à la traction sèche du BCPD à base de 5% de ciment.....	140

Figure 3.27 :	Effet de la contrainte de compactage sur l'absorption totale du BCPD à base de 5% de ciment après un jour d'immersion dans l'eau.....	140
Figure 3.28:	Effet de la contrainte de compactage sur le gonflement par immersion à l'eau du BCPD à base de 5% de ciment.....	141
Figure 3.29 :	Résistance à la compression sèche du BXPD à base de 10 % en chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibres de palmier dattier brutes et traitées (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	142
Figure 3.30 :	Résistance à la compression humide du BXPD à base de 10 % en chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibres de palmier dattier brutes et traitées (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	143
Figure 3.31 :	Résistance à la traction sèche du BTC à base de 10 % en chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibres de palmier dattier brutes et traitées (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	144
Figure 3.32 :	Diagramme contrainte- déformation du BCPD à base de 8% en ciment renforcé avec fibres brutes.....	147
Figure 3.33 :	Variation du module d'élasticité longitudinale du BCPD à base de 8% en ciment et fonction de la teneur en fibres de palmier dattier brutes....	147
Figure 3.34:	Diagramme contrainte- déformation du BXPD à base de 10 % en chaux renforcé avec 0.1 % de fibres de palmier dattier brutes et traitées.....	148
Figure 3.35:	Variation du module d'élasticité longitudinale du BXPD à base de 10 % en chaux en fonction de la teneur en fibres de palmier dattier brutes et traitées.....	148
Figure 3.36 :	Diagramme contrainte- déformation du BCPP à base de 8% en ciment renforcé avec des fibres de polypropylène.....	149
Figure 3.37 :	Variation du module d'élasticité longitudinale du BCPP à base de 8% en ciment en fonction de la teneur en fibres de polypropylène.....	150
Figure 3.38 :	Résistance à la compression sèche du BTC à base de 10 % en chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de différent type et teneurs en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	151
Figure 3.39 :	Résistance à la traction sèche du BTC à base de 10 % en chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).....	152

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 :	Classification des phyllosilicates , d’après (Caillère, 1959), complété par (Mitchell, 1993).....	14
Tableau 1.2 :	Moyens de stabilisation des terres remaniées.....	22
Tableau 1.3 :	Les proportions des constituants.....	46
Tableau 1.4 :	Composition chimique de quelques fibres naturelles.....	56
Tableau 2.1 :	Les masses volumiques du sol.....	86
Tableau 2.2 :	Les limites d’Atterberg du sol.....	87
Tableau 2.3 :	Granularité du sol.....	87
Tableau 2.4 :	La composition chimique du sol.....	88
Tableau 2.5 :	La composition minéralogique du sol.....	88
Tableau 2.6 :	Valeur du bleu de méthylène.....	90
Tableau 2.7 :	Les caractéristiques physiques du sable concassé.....	90
Tableau 2.8 :	La composition chimique du clinker (%).....	91
Tableau 2.9 :	La composition minéralogique du clinker (%).....	91
Tableau 2.10 :	Les Masses volumiques du ciment utilisé.....	92
Tableau 2.11 :	La composition chimique de la chaux vive (selon la fiche technique élaborée par l’unité de production)	92
Tableau 2.12 :	Analyse chimique de la poudre des fibres calcinées à 400 °C.....	93
Tableau 2.13 :	Les propriétés physiques des fibres FSPDM.....	93
Tableau 2.14 :	Les propriétés mécaniques des fibres FSPDM.....	93
Tableau 2.15 :	Caractéristiques physiques de la paille d’orge hachée.....	95
Tableau 2.16 :	Les caractéristiques générales des fibres de polypropylène (d’après la fiche technique de GANITEX).....	95
Tableau 2.17 :	Composition des différents mélanges employés dans cette étude.....	98
Tableau 2.18 :	Codification des mélanges.....	99
Tableau 2.19 :	Optimisation de la teneur en eau.....	101
Tableau 2.20 :	La contrainte de compactage des mélanges.....	102

LISTE DES ABRÉVIATIONS

- A.S.T.M** : American Society for Testing and Materials
- AFNOR** : Association française de normalisation
- ATE** : Absorption totale à l'eau
- BCPD** : Bloc de terre comprimée à base de ciment avec fibres de palmier dattier
- BCPP** : Bloc de terre comprimée à base de ciment avec fibres de polypropylène
- BCSF** : Bloc de terre comprimée à base de ciment sans fibres
- BCSF** : Bloc de terre comprimée à base de ciment sans fibres
- BTC** : Bloc de terre comprimée
- BXPD** : Bloc de terre comprimée à base de chaux avec fibres de palmier dattier
- BXPDPO** : Bloc de terre comprimée à base de chaux avec fibres de palmier dattier et paille d'orge hachée
- BXPO** : Bloc de terre comprimée à base de chaux avec paille d'orge hachée
- BXPP** : Bloc de terre comprimée à base de chaux avec fibres de polypropylène
- BXSF** : Bloc de terre comprimée à base de chaux sans fibres
- CDE** : Centre pour le développement de l'entreprise
- CRATERRE** : Centre international de la construction en terre
- CRS** : ciment résistant aux sulfates
- FSPDM** : Fibres de surface de palmier dattier mâle
- MVS** : Masse volumique sèche
- RCH** : Résistance à la compression humide
- RCS** : Résistance à la compression sèche
- RTS** : Résistance à la traction sèche
- TEO** : Teneur en eau optimale
- USACE** : US Army Corps of Engineers

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 enregistrerons 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 œuvre 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 œuvre, ses qualités esthétiques et une bonne inertie thermique, celle-ci permet d'avoir un habitat frais en été et qui conserve la chaleur en hiver. Mais le problème des constructions en terre, c'est qu'elles souffrent d'un déficit en résistance, d'une fissuration systématique due au retrait et se heurtent aux problèmes liés à leur sensibilité à l'eau.

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.

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 (Houben, 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 (Houben,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. 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.

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

La terre crue est utilisée pour la construction de bâtiments depuis les temps les plus reculés, comme en témoigne l'habitat traditionnel en de nombreux points de notre planète. Après avoir été abandonnée et oubliée avec l'avènement des matériaux de construction industriels, en particulier le béton et l'acier, elle fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt dans les pays en développement comme dans les pays industrialisés. Ce matériau, souvent critiqué pour sa sensibilité à l'eau et son manque de durabilité, présente dans sa forme actuelle de nombreux avantages pour la construction de logements durables, confortables et économiques (Houben,1996).

1.2 Techniques de construction en terre

A travers le patrimoine mondial des traditions de la construction en terre crue, on dénombre de très nombreuses techniques de construction avec une infinité de variantes adaptées à la qualité de la terre et au degré d'élaboration du savoir-faire, traduisant l'identité des lieux et des cultures. Il existe douze techniques d'utilisation de terre pour la construction présentées sur le diagramme établi par le groupe CRATERRE en 1986 (figure 1.1) (Houben,2006). Parmi celle-ci huit sont d'un usage courant et constituent les techniques principales (CRATerre, 1991) :

- **Adobe** : la terre à l'état de pâte plastique souvent amendée de paille ou autre fibres, moulée sous forme de briques séchées au soleil.
- **Pisé** : la terre est compactée en masse dans des coffrages, couche par couche et banchée par banchée, avec une dame.
- **Terre-paille** : la terre est dispersée dans de l'eau jusqu'à l'obtention d'un liquide épais homogène que l'on mélange à la paille afin de former un film sur chaque brin. Le matériau ainsi obtenu conserve l'aspect de la paille et est banché pour ériger un mur monolithique qui nécessite une structure porteuse.
- **Torchis** : la terre argileuse, amendée de paille ou autres fibres, recouvre en une ou plusieurs couches des claies qui hourdent une structure en colombages.
- **Terre façonnée** : la terre, souvent amendée de paille ou autres fibres, est façonnée sous forme de murs de la même façon que pour la technique de poterie, sans outil.
- **Terre extrudée** : la terre est extrudée par une puissante machine proche ou dérivée du matériel utilisé pour la fabrication de produits destinés à être cuits.
- **Bauge** : la terre, généralement amendée de paille ou autres fibres, est mise sous forme de boules

grossières, qui sont empilées les unes sur les autres et entassées légèrement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à ériger des murs monolithiques façonnés. Dans d'autres cas, la bauge est incorporée dans une structure en bois.

- **Terre comprimée** : la terre est comprimée sous forme de bloc dans un moule. Auparavant, on compactait la terre dans un moule à l'aide d'un petit pilon, ou en rabattant avec force un couvercle très lourd dans le moule. Aujourd'hui, on utilise des presses dont il existe une grande variété.

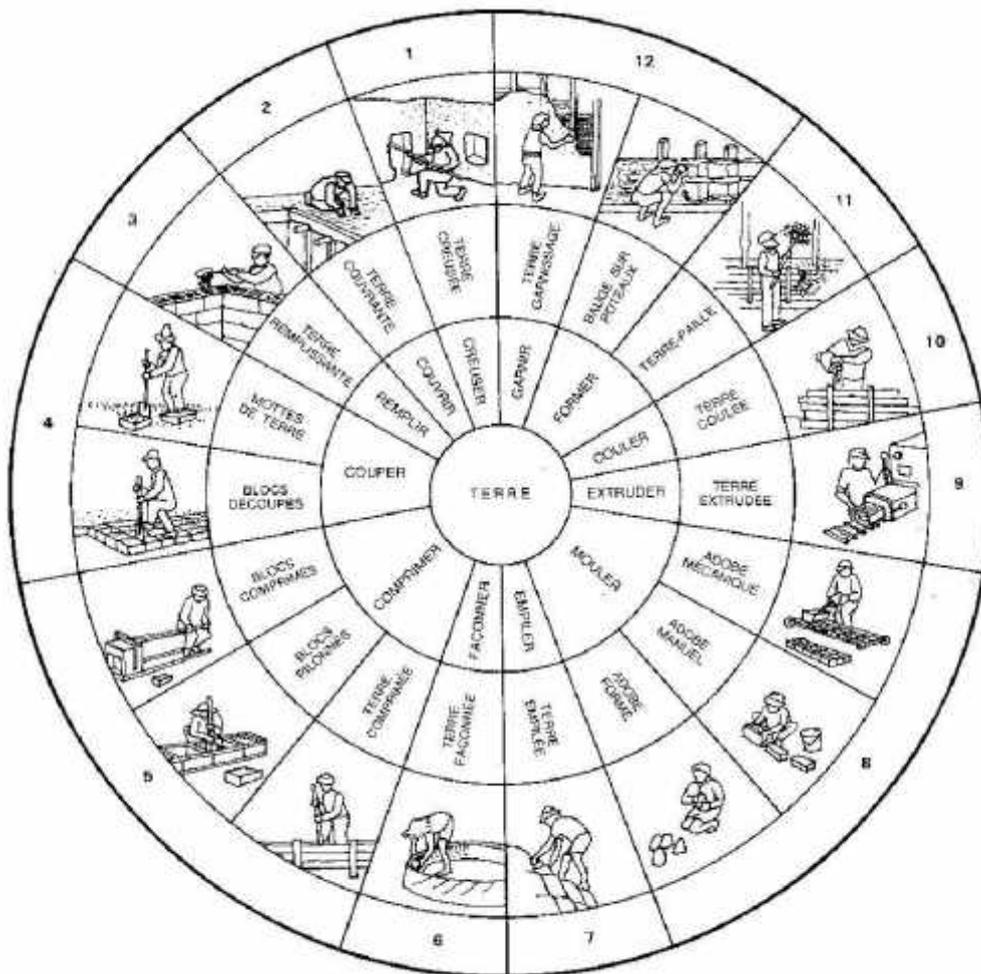


Fig. 1.1 : Schéma des différentes techniques de construction en terre établi par le groupe CRATERRE en 1986 (Houben, 2006)

1.3 Blocs de terre comprimée (BTC)

Par rapport à l'histoire de la construction en terre, la technique du bloc de terre comprimée (BTC) est une technique récente. Elle a été développée dans les années 50 dans le cadre d'un programme de recherche sur l'habitat rural en Colombie. Cette technique est une

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

L'idée de compacter la terre pour améliorer la qualité et la résistance des blocs de terre moulée est pourtant ancienne et c'est à l'aide de pilons en bois que l'on réalisait les premiers blocs de terre comprimée. Ce procédé est encore utilisé de par le monde. Les premières machines à comprimer la terre auraient été imaginées au XVIIIe siècle. Mais ce n'est qu'au début du XXe siècle que l'on imagina les premières presses mécaniques qui utilisaient de lourds couvercles rabattus avec force dans le moule. Des presses de ce type ont même été motorisées. L'industrie de la brique cuite a ensuite utilisé des presses à compression statique où la terre était comprimée entre deux plateaux. Le développement significatif de l'emploi des presses et de l'utilisation constructive et architecturale du bloc de terre comprimée n'a été finalement engagé qu'à partir de 1952 suite à l'invention de la fameuse petite presse "CINVA-RAM", imaginée par l'ingénieur Raul Ramirez, au centre CINVA de Bogota, en Colombie. Elle fut utilisée dans le monde entier. Les années 70 et 80 ont amené l'apparition d'une nouvelle génération de presses manuelles, mécaniques et motorisées et le développement aujourd'hui considérable d'un véritable marché de la production et de l'utilisation du bloc de terre comprimée (Rigassi, 1995).

1.4 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 1.2):

a. Blocs pleins

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

b. 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).

c. 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.

d. 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.

e. Blocs parasismiques

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

f. Blocs spéciaux

Les blocs sont fabriqués exceptionnellement pour une application spécifique.



Fig. 1.2 : Différents produits de blocs de terre comprimée

1.5 La construction en bloc de terre comprimée dans le monde

Plusieurs constructions ont été réalisées en blocs de terre comprimée à travers les quatres coins du monde, profitant des avantages de cette technique moderne, que ce soit sur le plan économique, écologique, esthétique, thermique et environnemental. On peut citer ici quelques exemples fascinants : Maison palmier à Marrakech, Maroc (figure 1.3), Domaine de

la terre, l'Isle d'Abeau à Lyon, France (figure 1.4) et Atelier électronique, Ecole, Auroville, Inde (figure 1.5).



Fig. 1.3 : Maison palmier à Marrakech, Maroc



Fig. 1.4 : Domaine de la terre, l'Isle d'Abeau, France



Fig. 1.5 : Atelier électronique, Ecole, Auroville, Inde.

1.6 La terre, un matériau de construction

1.6.1 Définition

Le sol est la fraction solide de la sphère terrestre. A la surface du sol, la terre est un matériau meuble, d'épaisseur variable, qui supporte les êtres vivants et leurs ouvrages et où poussent les végétaux. La terre est formée à partir d'une roche mère par des processus très lents de dégradation et par des mécanismes très complexes de migration de particules. Il en résulte une infinité de sortes de terres avec une variation illimitée de leurs caractéristiques. La terre végétale ou sol des agronomes, riche en matière organique, surmonte la roche mère, plus ou moins altérée. Lorsqu'ils sont meubles et contiennent peu de matière organique, les niveaux superficiels des sols sont utilisables pour la construction en terre (Houben, 1996).

1.6.2 Composition

La terre est constituée d'un mélange en proportions variables de quatre sortes d'éléments : les graviers (5-20 mm), les sables (0.08-5 mm), les limons (2 μm -0.08 mm), et les argiles (< 2 μm). Comme nous l'avons constaté, la terre est composée de matériaux inertes (graviers, sables) et de matériaux actifs (silts, argiles). Les premiers jouent un rôle de squelette et les seconds celui de liant, tel un ciment. La terre a donc une structure comparable à celle du béton avec un liant différent (Houben, 1996). Les proportions des éléments constituant les terres vont déterminer leurs comportements et leurs propriétés, par exemple, lorsqu'ils sont soumis à des variations d'humidité certains changent de volume, d'autres non. Les premiers sont instables et les autres stables. Cette notion de stabilité, c'est-à-dire d'aptitude à supporter les alternances d'humidité et de sécheresse sans variations des propriétés, est fondamentale pour un matériau de construction (Doat, 1979).

Vu l'importance des argiles comme liant dans la fabrication des BTC, et pour pouvoir analyser les mécanismes responsables des modifications qui apparaissent dans le sol traité, il est utile de rappeler certaines propriétés physico-chimiques des argiles.

1.6.3 Rappel sur les argiles

Les argiles sont des minéraux issus de la décomposition de roches. Il s'agit de matériaux hétérogènes à différentes échelles. A l'échelle macroscopique, elles sont souvent associées à d'autres minéraux (quartz, feldspath...). A l'échelle microscopique, elles présentent une structure en feuillet. Il est important de prendre en compte la nature physico-chimique des argiles, du fait que leur comportement rhéologique est gouverné par les

interactions entre les feuillets argileux. Dans cette partie, et pour définir cette nature physico-chimique, on présente la caractérisation minéralogique des différents niveaux d'organisation qui constituent les argiles.

1.6.3.1 Définition

Il n'y a pas de définition universelle du terme « argile ». En effet, il en existe autant que de disciplines. Elles se fondent sur les propriétés physiques étudiées, comme par exemple la plasticité, sur l'emploi qui en est fait ou encore sur la structure cristallographique.

L'argile à l'état naturel est rarement composée d'un seul minéral. Ainsi, elle correspond souvent à un mélange de phyllosilicates ; le minéral majoritaire lui donne alors son nom. Il y a, de plus, de nombreux minéraux associés comme les carbonates (dolomite, diobertite, calcite, aragonite...), la silice (quartz, cristobalite, tridymite), des oxydes et hydroxydes d'aluminium (corindon, gibbsite, diaspoire,...) ou encore des minéraux ferrières (lépidocrocite, maghémite...).

Le terme argile désigne donc un mélange de minéraux argileux associés à d'autres minéraux (feldspaths, quartz etc.) ainsi que des impuretés (oxyde de fer, titane etc.). Par ailleurs, ce mélange est caractérisé par une certaine plasticité et des grains ayant une taille inférieure à 2 μm (Michot, 2008).

1.6.3.2 Structure

Les phyllosilicates sont des silicates dans lesquels les tétraèdres de SiO_4 forment des feuillets infinis bi-dimensionnels. Ces feuillets tétraédriques sont condensés avec des octaèdres d'oxydes métalliques dans un rapport 2:1 ou 1:1. Les phyllosilicates sont également appelés plus simplement silicates lamellaires (Le Pluart, 2002). Les différents groupes de minéraux argileux se différencient par l'arrangement de leurs couches tétraédriques et octaédriques représentés sur la figure 1.6. L'organisation structurale des phyllosilicates est basée sur une charpente d'ions O^{2-} et OH^- (Caillère, 1982). Ces anions occupent les sommets d'assemblages octaédriques (O^{2-} et OH^-) et tétraédriques O^{2-} . Dans les cavités de ces unités structurales élémentaires viennent se loger des cations de tailles variables (Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+}) en position tétraédrique ou octaédrique. Ces éléments s'organisent suivant un plan pour constituer des couches octaédriques et tétraédriques dont le nombre détermine l'épaisseur du feuillet. L'espace entre deux feuillets parallèles s'appelle espace interfoliaire. Lorsque deux cavités sur trois de la couche octaédrique sont occupées par Al^{3+} (ou un autre ion métallique

trivalent), la structure est dénommée *dioctaédrique*. Quand la totalité des cavités octaédriques est occupée par des ions métalliques bivalents, la structure s'appelle *trioctaédrique*.

Par ailleurs, il peut exister des substitutions isomorphiques dans les couches tétraédriques ($\text{Si}^{4+} \rightarrow \text{Al}^{3+}$, Fe^{3+}) et /ou octaédrique ($\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Mg}^{2+}$, Fe^{2+} , ou $\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Li}^+$). Ces substitutions entraînent un déficit de charge qui est compensé, à l'extérieur du feuillet, par des cations compensateurs (Benchabane, 2006).

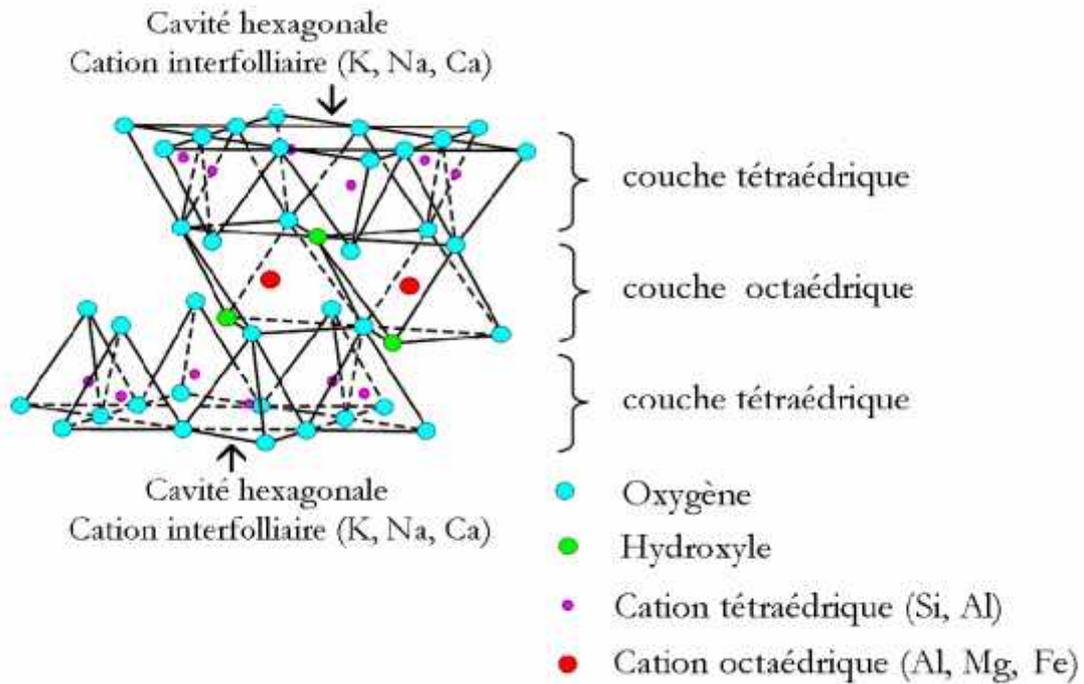


Fig. 1. 6 : Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicate 2:1 (Luckham et Rossi, 1999) cité par (Benchabane, 2006).

1.6.3.3 Classification des argiles

Les travaux de l'AIPEA (Association Internationale Pour l'Etude des Argiles, 1966-1972) et plus tard, ceux de (Pédro, 1994), ont permis d'aboutir à une classification (tableau 1.1) qui repose sur l'utilisation des critères suivants:

- Type de feuillets 2:1 ou 1:1;
- Charge globale du feuillet;
- Nature des cations interfoliaires.

Il existe différentes classifications des argiles, la plus classique est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet, on distingue ainsi 4 groupes:

- Minéraux à 7 Å: Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T:O ou de type 1:1;
- Minéraux à 10 Å: Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T:O:T ou de type 2:1 ;
- Minéraux à 14 Å: Le feuillet est constitué de l'alternance de feuillets T:O:T et de couches octaédriques interfoliaires ;
- Minéraux interstratifiés: L'épaisseur du feuillet est variable. Ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes ci-dessus.

La valeur de la charge permanente du feuillet a servi de critère pour établir une classification des phyllosilicates 2:1 (Tableau 1.1). Cette classification est déduite des travaux de (McKenzie ,1975) et (Brindley ,1966).

Tableau 1.1 : Classification des phyllosilicates , d'après (Caillère, 1959), complété par (Mitchell, 1993)

Nature du feuillet	Nature des cations interfoliaires	Groupe	Nature de la couche octaédrique	Exemples
1 : 1	Pas de cations ou seulement de l'eau	Kaolinite	Dioctaédrique	Kaolinite, halloysite, nacrite, dickite
2 : 1	Pas de cations	Pyrophyllites	Dioctaédrique	Talc
	Cations hydratés et échangeables	Smectites	Dioctaédrique	Montmorillonite, nontronite, beidellite, saponite
		Vermiculites	Dioctaédrique	Vermiculite dioctaédrique à trioctaédrique
	Cations monovalents non-hydratés	Micas	Dioctaédrique	Muscovite, Illite, Paragonite, biotite
	Cations divalents non-hydratés	Micas durs	Dioctaédrique	Margarite, clintonite
	Hydroxyles	Chlorites	Dioctaédrique	Donbassite, sudoite, Clinochore
2:1 fibré	/	Palygorskites, Sépiolites	Dioctaédrique	Sépiolite, Palygorskite

1.6.3.4 Principaux types d'argiles

Comme il a été présenté dans le tableau 1.1, il existe plusieurs familles d'argiles qui rassemblent des dizaines d'espèces. Mais ceux sont trois grands types d'argiles dont la présence dans le sol est la plus fréquente : la kaolinite, l'illite et la montmorillonite.

a. La kaolinite

Les kaolinites sont des argiles dioctaédriques de type 1:1 (ou T-O) avec une épaisseur du feuillet de l'ordre de 7,2 Å (figure 1.7 et figure 1.8). Quand deux feuillets de kaolinite sont superposés, les O^- présents sur la surface supérieure et les H^+ de la surface inférieure développent entre eux une liaison hydrogène O-H forte, assurant avec les liaisons de Van der Waals une grande stabilité à un empilement de feuillets vis-à-vis des actions de l'eau. Par conséquent, les particules sont stables et leur structure élémentaire n'est pas affectée par l'eau. Les cristallites (association de plusieurs feuillets) (Tessier, 1984), qui résultent de cet empilement, sont des plaquettes rigides dont l'extension latérale est de quelques centaines de nm et qui ne permettent pas la pénétration de l'eau au sein de l'espace interfoliaire et la substitution entre les feuillets. La liaison hydrogène forte entre les feuillets explique l'importance du nombre de feuillets par particule de kaolinite (de quelques dizaines à quelques centaines de feuillets solidement liés l'un à l'autre) et la faible valeur de la surface spécifique qui ne dépasse pas généralement 45 m²/g.

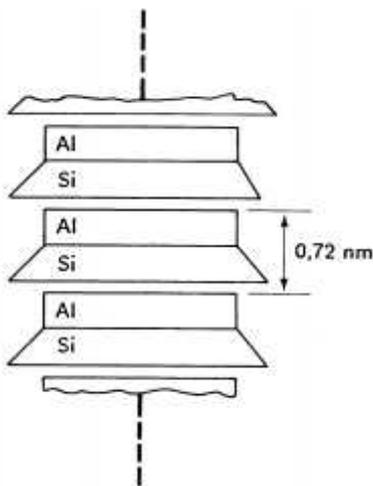


Fig. 1.7: Schéma de la structure de la kaolinite, (d'après Lambe, 1953)

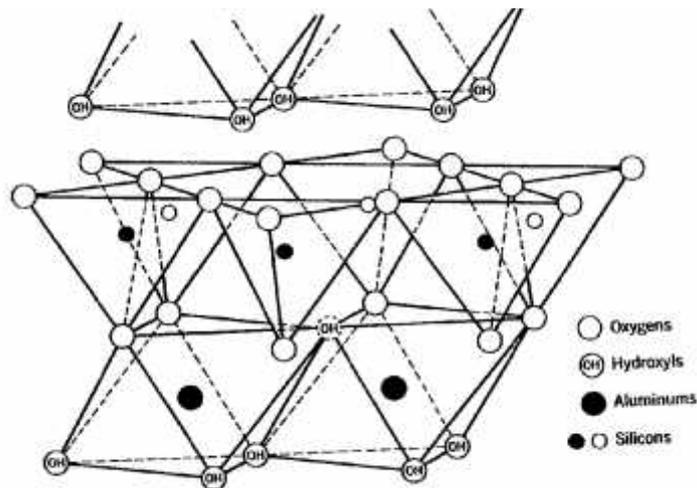


Fig. 1.8 : Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite, (d'après Grim, 1986)

b. La montmorillonite

Le feuillet élémentaire (type 2:1 ou T-O-T) est constitué de deux couches tétraédriques de silice encadrant une couche octaédrique d'alumine. L'empilement des feuillets est désordonné : chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent et a une extension latérale extrêmement importante par rapport à son épaisseur qui est d'environ 9,6 (figure 1.9 et figure 1.10). Ce désordre de feuillets et la constitution des faces

inférieures/supérieures de ces argiles ne permettent pas le développement d'une liaison hydrogène entre les feuillets, ce qui facilite leur écartement et l'adsorption des molécules variées (cations, eau, molécules organiques) au niveau de l'espace interfoliaire qui s'écarte. Par conséquent, la montmorillonite est très sensible à l'eau et un important gonflement de la particule peut se produire par adsorption de molécules d'eau entre les feuillets. L'épaisseur du feuillet peut alors varier de 9,6 à 15 , voire plus selon la nature du cation compensateur et l'hydratation de l'espace interfoliaire. Les montmorillonites sont généralement calciques, plus rarement sodiques suivant la nature du cation prédominant (calcium, sodium). Il est connu que le sodium confère des propriétés de gonflement supérieures à celles permises par la présence de calcium comme cation échangeable dans une argile (Saiyouri, 1996).

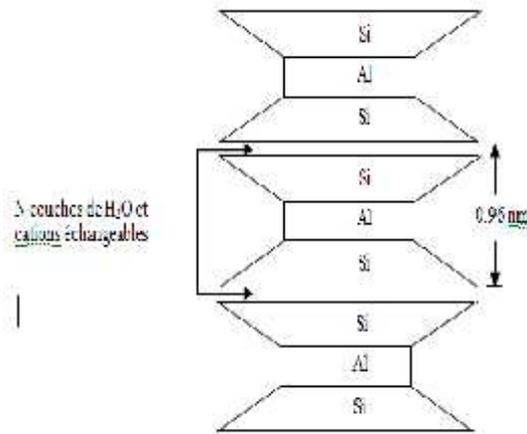


Fig. 1.9: Schéma de la structure de la montmorillonite, (d'après Lambe,1953)

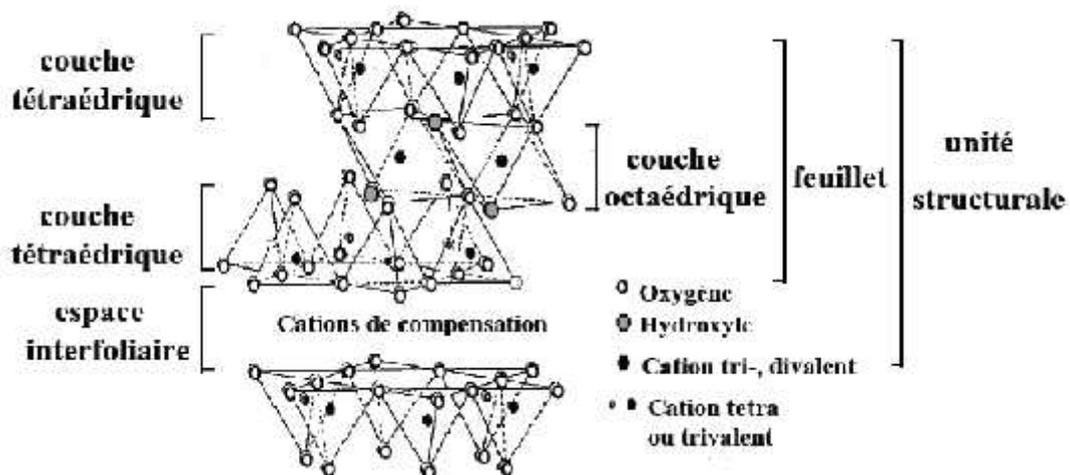


Fig. 1.10: Structure de la montmorillonite (Reinholdt,2001)

c. L'illite

Sa structure (type 2:1) est proche de celle de la montmorillonite mais elle possède un déficit de charge plus élevée dû aux substitutions ioniques par des cations interfoliaires de potassium K^+ (figure 1.11 et figure 1.12). Les cations K^+ ont la particularité de posséder exactement la même dimension que les cavités de surface où ils sont piégés. Cette liaison des feuillets par les ions potassium anhydre est très forte et empêche que les molécules d'eau ne parviennent à entrer entre les feuillets, rendant ces ions non échangeables et hydratables. Les illites ont des feuillets d'équidistance fixe à 9,6 Å. Ce caractère leur confère un plus faible potentiel de gonflement que celui des montmorillonites et la constitution de particules de grandes tailles.

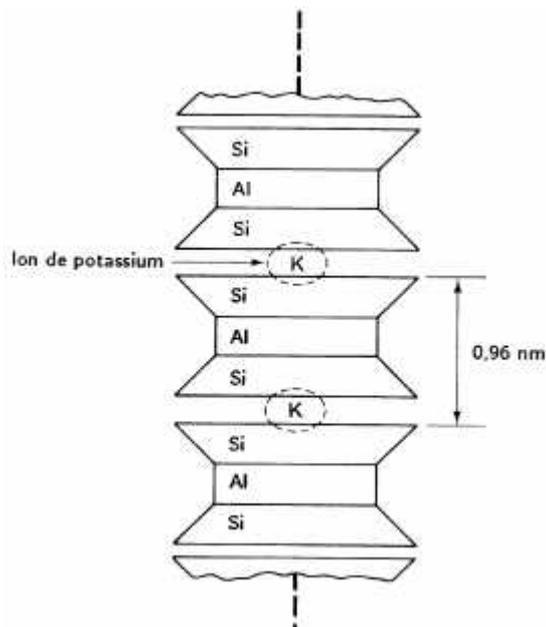


Fig. 1.11 : Schéma de la structure de l'illite. D'après Lambe, 1953.

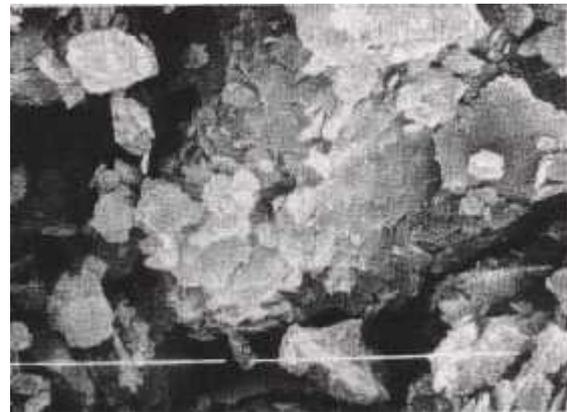


Fig. 1.12 - Photographie au microscope à balayage électronique d'une illite de Fithian, Illinois. La longueur du trait de lumière est de 5 µm. (Holtz, 1991)

1.7 Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de la terre

D'une terre à l'autre, les propriétés sont changeantes et dépendent de la nature et du mélange complexe des tractions granulaires qui les composent. C'est souvent la fraction granulaire dominante d'une terre qui caractérise ses propriétés fondamentales et régit son comportement.

On distingue d'une part des propriétés chimiques liées à la présence de sels, d'oxydes, de carbonates ou de sulfates et, d'autre part, des propriétés physiques nombreuses telles que la couleur, la stabilité structurale, l'adhérence, la masse volumique apparente, la teneur en eau,

la porosité ou indice des vides, le pouvoir adsorbant, le potentiel et la diffusion capillaire, la perméabilité, le retrait linéaire, la résistance sèche et d'autres encore. La connaissance de ces propriétés chimiques et physiques permet de préciser la qualité et le comportement d'une terre pour la construction (Rigassi,1995).

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

- la texture ou granularité;
- la plasticité;
- la compressibilité;
- la cohésion.

1.7.1 Texture ou Granularité

Elle se mesure par analyse granulométrique pour les fractions de grains grossiers (graviers, sables, silts) et par analyse sédimentométrique pour les fractions fines argileuses. Les éléments tels que les graviers et les sables sont les éléments résistants du matériau; les argiles assurent la cohésion de l'ensemble et contrôlent la plasticité et la manière dont la terre réagit à l'humidité, par conséquent elles contrôlent le retrait et le gonflement (Walker, 1995). En plus, les réactions chimiques entre l'argile et la chaux (la réaction pouzzolanique) forment de nouveaux produits qui contribuent effectivement dans la valeur finale de la résistance d'une terre stabilisée à la chaux (et ciment) (Akpodje, 1985; Bell, 1996). Les silts ont une fonction intermédiaire, moins nette.

La classification des fractions des grains adoptée par un grand nombre de laboratoires et référente aux normes (A.S.T.M, AFNOR) est la suivante (Houben, 2006):

- | | | |
|----------------------|-----------|----------|
| – Cailloux : | 200 mm - | 20 mm |
| – Graviers : | 20 mm - | 2 mm |
| – Sables grossiers : | 2 mm - | 0.2 mm |
| – Sables fins : | 0.2 mm - | 0.06 mm |
| – Silts : | 0.06 mm - | 0.02 mm |
| – Silts fins : | 0.02 mm - | 0.002 mm |
| – Argiles : | .002 mm - | 0 mm |

1.7.2 La plasticité

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

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

Pour un sol à gros grains, ou pour un sol à grains fins contenant une faible teneur en argile, une faible augmentation de l'humidité au-dessus de la limite plastique détruit les forces d'attraction, qui fournissent la résistance au cisaillement. Cela signifie que la différence entre la limite de plasticité et la limite de liquide est faible, et l'indice de plasticité est également faible. Alors que, pour un taux élevé d'argile dans un sol, il faut une importante quantité d'eau pour détruire les forces d'attractions. Dans ce cas, l'indice de plasticité est élevé. Ainsi, l'indice de plasticité est un moyen indirect pour mesurer les quantités et les affinités de l'humidité de l'argile dans le sol.

Les sols sableux et les limons ont des valeurs typiquement faibles de l'indice de plasticité, tandis que la plupart des argiles ont des valeurs plus élevées. Les sols qui ont des valeurs élevées d'IP sont très plastiques et sont généralement très compressibles et très cohérents. Un sol plastique est considéré comme cohérent (USACE, 2000).

1.7.3 La compressibilité

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

La teneur en eau doit être suffisante pour permettre une lubrification des grains et leur permettre de se réarranger afin d'occuper le moins de place possible. Cette teneur en eau ne

doit pas non plus être trop importante car les vides seraient remplis d'eau et, de ce fait, incompressibles.

L'essai Proctor, l'essai le plus largement utilisé pour évaluer l'aptitude d'un sol à être compacté est beaucoup plus adapté aux sols pulvérulents (voir le paragraphe 1.8.5.2).

1.7.4 La cohésion

La cohésion d'une terre exprime la capacité de ses particules à se maintenir ensemble lorsque l'on exerce sur le matériau une contrainte de traction. La cohésion d'une terre dépend des caractéristiques de collage ou de cimentation de son mortier grossier (fraction de grains de $< 2 \text{ mm}$) qui lie les grains inerte entre eux. Cette propriété est donc tributaire de la quantité et de la qualité collante des argiles. Les mortiers grossiers sont classés de la façon suivante (Houben, 2006):

- Mortier Sableux,
- Mortier Maigre,
- Mortier Moyen,
- Mortier Gras,
- Argiles.

La cohésion se mesure par l'essai de traction à l'état humide.

1.8 Stabilisation

1.8.1 Définition

Le Centre des Nations Unies pour les établissements humains a défini la stabilisation d'un sol comme étant, la modification des propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application particulière (United Nations, 1992). Mais la stabilisation est un problème complexe car de très nombreux paramètres interviennent. Il faut en effet connaître : les propriétés de la terre, les améliorations envisagées, l'économie du projet, les techniques de mise en œuvre de la terre choisie pour le projet et la maintenance du projet réalisé (Houben, 2006).

1.8.2 Objectifs

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

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

1.8.3 Procédés

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

1.8.3.1 Stabilisation mécanique :

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

1.8.3.2 Stabilisation physique :

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

1.8.3.3 Stabilisation chimique :

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

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).

1.8.4 Moyens de stabilisation

Dans la littérature, on peut trouver divers 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) (tableau 1.2) .

Tableau 1.2 : Moyens de stabilisation des terre remaniées (Houben,2006).

Stabilisant	Nature	Procédé	Moyens	Principe	Symbole
Sans apport de stabilisant		Mécanique	Densifier	Créer un milieu dense qui bloque les pores et les canaux capillaires	
Stabilisants inertes	Minéraux	Physique	Armer	Créer une armature omnidirectionnelle qui réduit le mouvement	
	Fibres				
Avec apport de stabilisant	Liants	Chimique	Enchaîner	Créer un squelette inerte qui s'oppose à tout mouvement	
			Liaisonner	Former des liaisons chimiques stables entre les cristaux d'argile	
	Hydrophobants	Imperméabiliser	Entourer les grains de terre d'un film imperméable et boucher les pores et canaux		
		Hydrofuger	Éliminer au maximum l'adsorption et l'absorption d'eau		

1.8.5 Densification par compression

Le compactage est une opération qui s'accompagne d'une réduction du volume des vides dans un sol (figure 1.13) (DeJong-Hughes, 2001), donc une densité sèche plus importante. On constate, pour tous les matériaux, une relation très nette entre la densité sèche et la résistance mécanique. Celle-ci est d'autant plus élevée que le matériau est compact (Ausroads, 1998). C'est ainsi que, pour une même composition et un même dosage, un béton est d'autant plus résistant qu'il est dense ; de même les pierres les plus denses ont les résistances mécaniques les plus élevées. C'est également le cas pour les terres ; toutefois pour ces dernières, les densités que l'on peut obtenir demeurent relativement faibles. La figure 1.14 représente qualitativement l'évolution de la résistance en compression en fonction du poids spécifique sec ρ_d pour ces trois familles de matériaux. L'analyse de ces courbes montre tout l'intérêt que représente un accroissement de ρ_d particulièrement pour les fortes valeurs de densité (Doat, 1979). Un autre avantage de la densification est la diminution de la vitesse de pénétration de l'eau dans le matériau stabilisé et curé, ce qui influe favorablement sur la durabilité. Mais on doit veiller au cours du processus de compactage à ce qu'il reste assez d'eau pour que l'hydratation des minéraux du sol et de la chaux ou de ciment (ajoutés comme stabilisants) se fasse dans des conditions normales (Winterkorn, 1975).

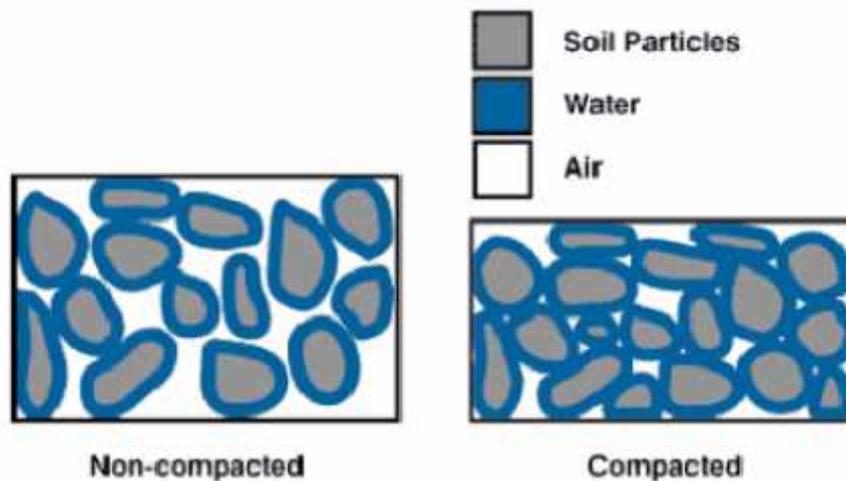


Fig. 1.13 : Effet du compactage sur les vides des sols (DeJong-Hughes, 2001).

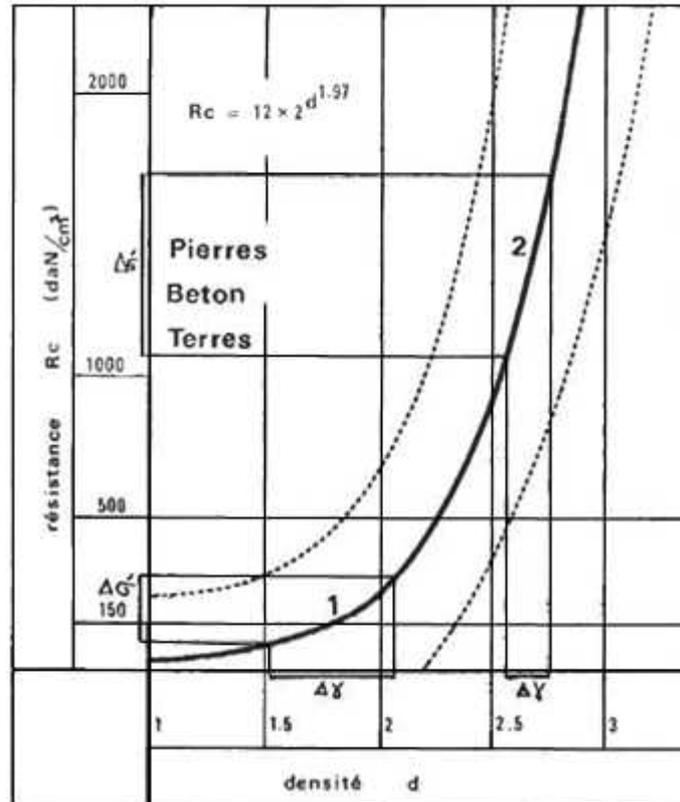


Fig. 1.14: Courbe type de dureté (résistance à la compression et densité) (Doat, 1979).

1.8.5.1 Méthodes de compression

La méthode de densification influe fortement sur la résistance finale du matériau (Doat, 1979). Il existe principalement quatre méthodes de compactage (Houben, 2006) :

- La compression statique ;
- La compression dynamique par vibration ;
- La compression dynamique par impact ;
- La compression par pétrissage.

1.8.5.2 Influence de la teneur en eau sur la densité

La densité d'un sol de terre comprimée dépend de plusieurs variables physiques : la densité des particules de sol, la granularité, la teneur en eau, la méthode de compactage et la contrainte de compactage. Cependant, les propriétés de la terre comprimée sont plus influencées par la teneur en eau que par tout autre paramètre (Burrough, 2001). Presque tous les sols présentent une relation similaire entre la teneur en eau et la densité sèche lorsqu'ils sont soumis à une contrainte de compactage donnée (figure 1.15) (USACE, 2000). La

compacité maximale d'un sol est atteinte lorsque son indice des vides est au minimum, cet état est atteint pour une teneur en eau du sol dite optimale. Un sol 'trop sec' sera le siège de frottements importants entre les grains de sol. Un sol trop humide, par contre sera moins susceptible d'être compacté car une partie importante de l'énergie de compactage sera absorbée par l'eau (incompressible) et ne sera donc pas communiquée aux grains de sol.

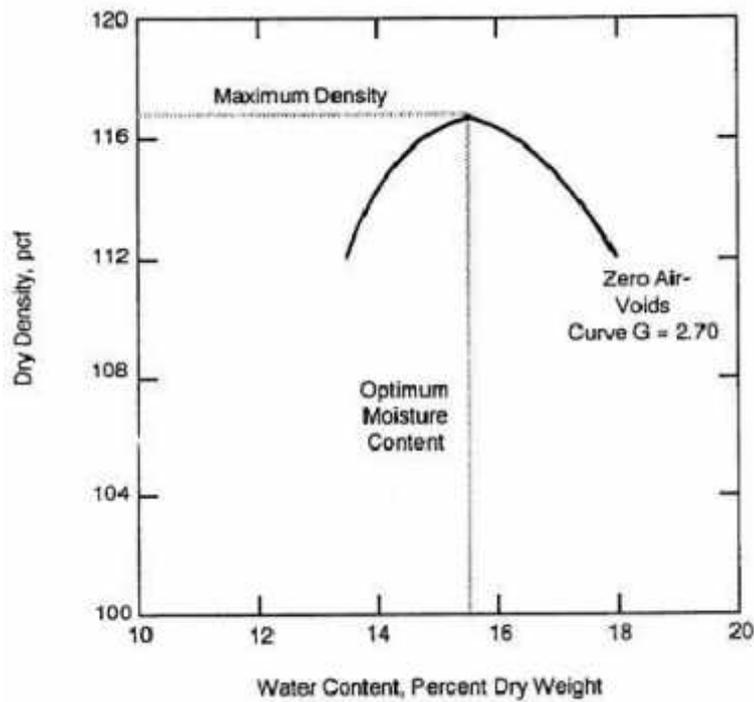


Figure 1.15: Relation typique entre la teneur en eau- densité (USACE ,2000).

La détermination de la teneur en eau optimale TEO est faite en laboratoire. En géotechnique routière, la recherche de la TEO est obtenue à l'aide de l'essai de Proctor, qui applique un compactage dynamique est mieux adapté aux sols pulvérulents. Cet essai n'est pas conseillé pour les sols argileux, car il entraîne une saturation localisée de l'éprouvette au droit de la dame de compactage. Il en résulte une éprouvette hétérogène en terme de densité (P'Kla, 2002).

Des études (Mesbah, 1999), montrent qu'un compactage statique est mieux adapté aux sols argileux.

De ce fait, l'essai Proctor s'est avéré peu utilisable et non représentatif des conditions de fabrication des briques compressées. En effet, d'autres part, il est à peu près impossible de fabriquer des éprouvettes à partir du moule Proctor, mais surtout, il semble ne pas exister de

relation entre l'« énergie Proctor » et celle d'un compactage statique utilisé dans la fabrication des blocs (Olivier, 1986).

Il vaut mieux insister sur la démarche la plus correcte et aussi utilisée sur chantier, qui est de trouver la teneur en eau optimum avec la presse à bloc directement (CDE,2000).

1.8.5.3 Influence de l'énergie de compactage

Quelque soit le type de terre et la méthode de compactage utilisé, une plus grande énergie de compactage diminue la teneur en eau optimale TEO et conduit à une plus grande densité sèche, comme le montre la figure 1.16 (Bergado, 1996 ; Winterkorn, 1975; USACE, 2000). Toutefois, de trop fortes énergies de compactage peuvent produire des phénomènes annexes nuisibles à la qualité du matériau. Ainsi à la presse, les très fortes pressions peuvent produire un laminage des blocs fabriqués (Houben,2006).

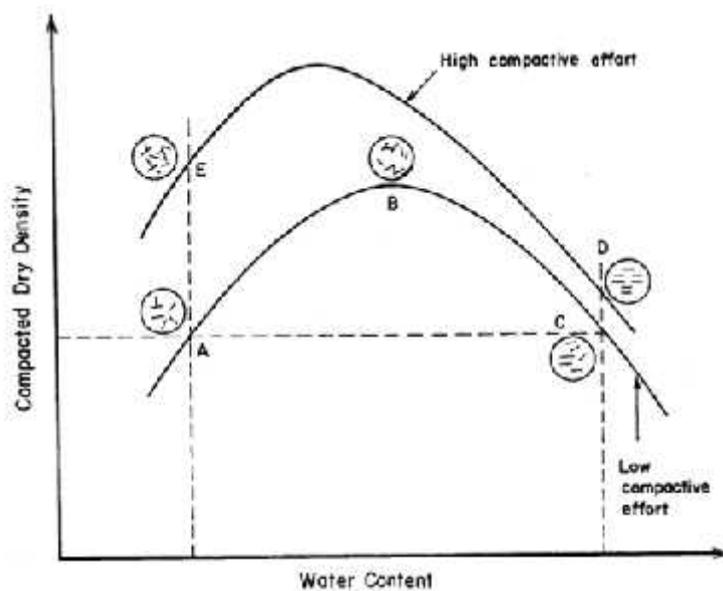


Figure 1.16 : Effets du compactage, en fonction de l'énergie de compactage, sur la structure du sol (Bergado, 1996).

L'étude menée par Gooding (Gooding, 1993) a montré que l'augmentation de la contrainte de compactage a un grand effet sur la résistance à la compression du bloc de terre stabilisée au ciment (figure 1.17). Dans le même contexte, les résultats des travaux de Guettala et al (Guettala, 2002), montrent que les résistances mécaniques augmentent avec l'augmentation de la contrainte de compactage jusqu'à un optimum de 17.5 MPa. Mais au-

delà de cette valeur il y a une chute de la résistance de l'ordre de 7% pour une contrainte de compactage de 20 MPa (figure 1.18).

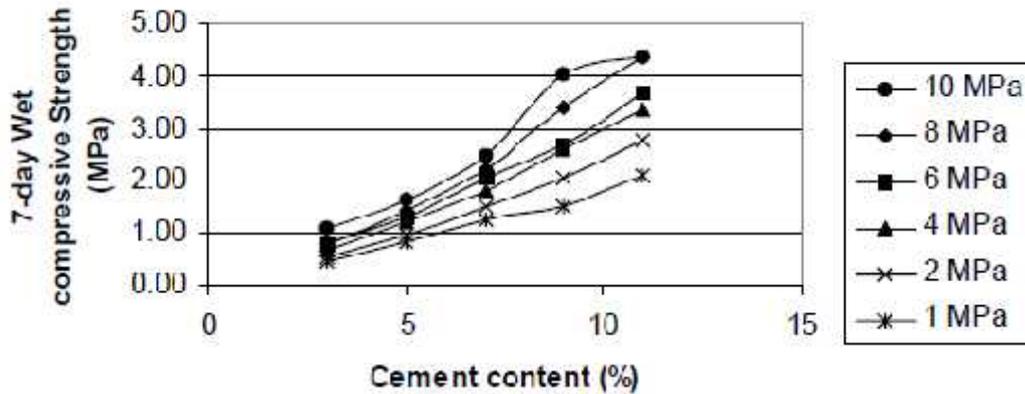


Fig. 1.17: La variation de la résistance en fonction de la teneur en ciment et la contrainte de compactage (Gooding,1993).

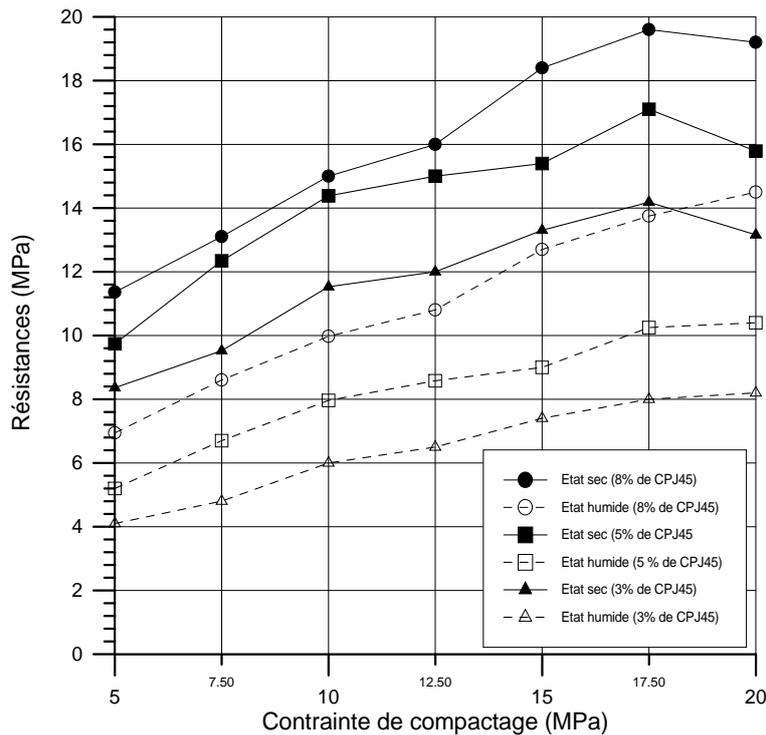


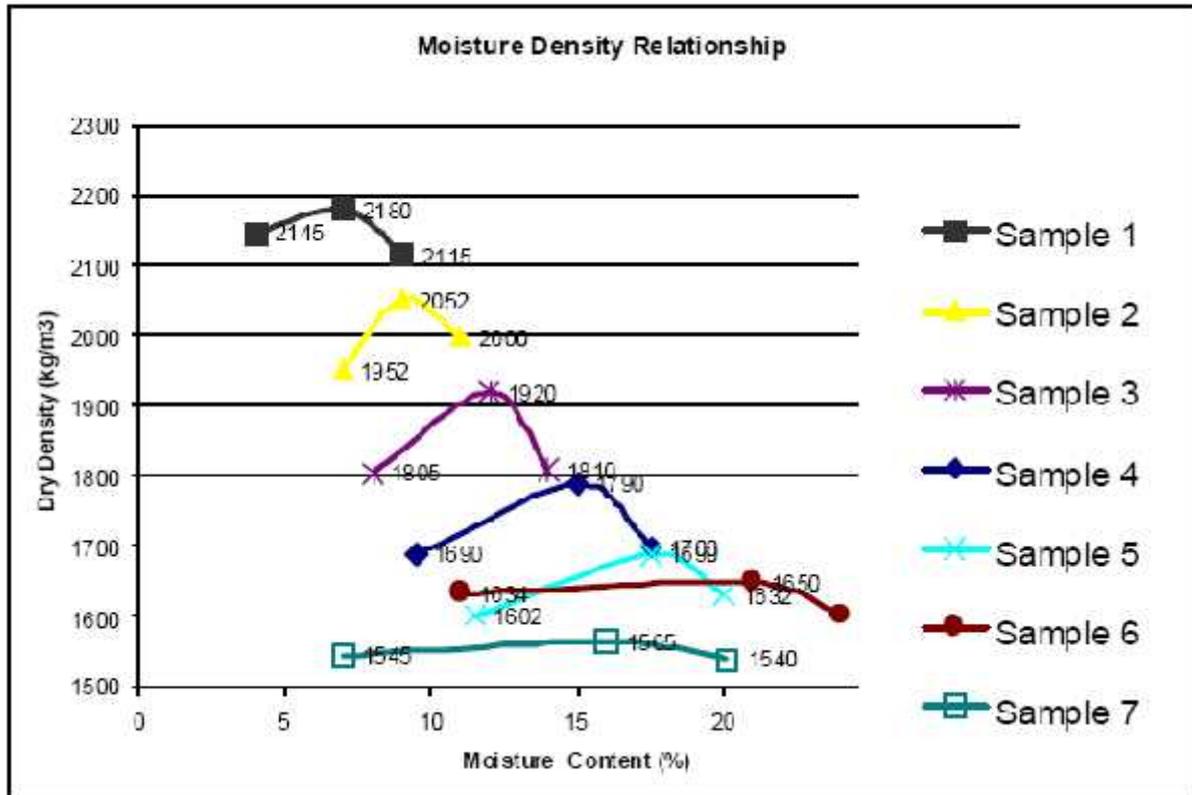
Fig. 1.18 : Influence de la contrainte de compactage et de la teneur en ciment sur les résistances mécaniques en compression (Guettala, 2002).

1.8.5.4 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 1.19) (USAGE, 2000) . Les

granularités 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).



Sample No.	Description	% Sand	% Clay/silt	% LL	% PI
1	Well-graded loamy sand	88	12	16	NP
2	Well-graded sandy loam	72	28	16	0
3	Med-graded sandy loam	73	27	22	4
4	Lean sandy silty clay	32	68	28	9
5	Loessial Silt	5	95	26	2
6	Heavy clay	6	94	67	40
7	Very poorly graded sand	94	6	NP	

Fig. 1.19 : La relation entre la teneur en eau et la densité sèche pour 7 types de sol (USAGE, 2000) .

1.8.6 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. La figure 1.20 présente les variations de plasticité (limites d'Atterberg) d'un mélange sable-argile pour différentes proportions de sable et d'argile (Doat,1979).

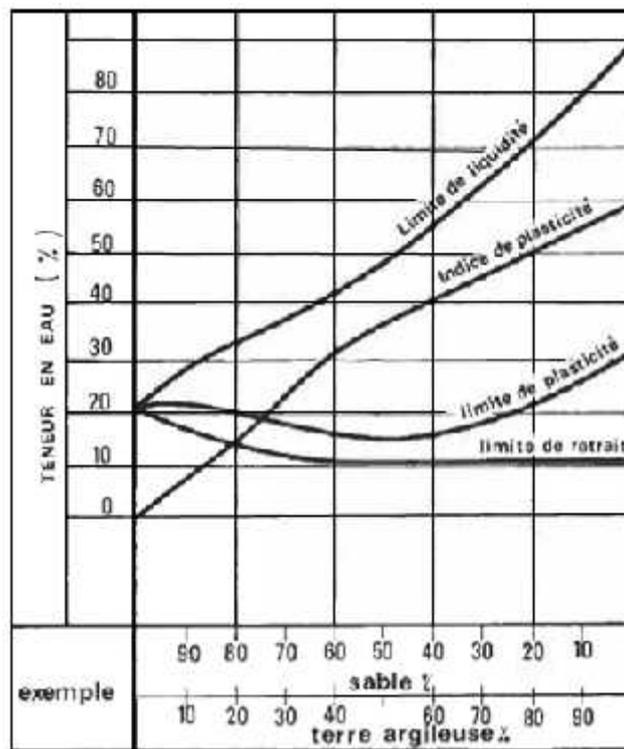


Figure 1.20 : Evolution des limites d'Atterberg en fonction de la teneur en sable (Doat,1979).

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 1.21). Á titre d'exemple, pour 30 % de teneur en sable, 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.

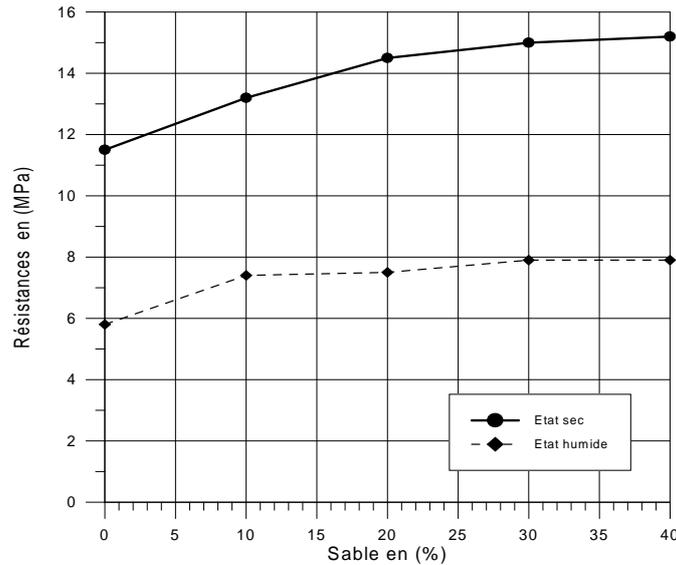


Figure 1.21 Influence de la teneur en sable sur les résistances mécaniques en compression du béton de terre stabilisée, avec 5% de ciment et une contrainte de compactage de 10 MPa (Guettala, 2003).

1.8.7 Stabilisation au ciment

1.8.7.1 Généralités

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 bâtiments, s'est développée indépendamment 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. 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, $Ca(OH)_2$. Verdeyen conseille le ciment pour les sols dont la teneur en argile n'excède pas 20 à 30 % ($I_p < 25\%$) (Verdeyen,1971).

1.8.7.2 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 tétracalcique (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 hydratés. 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 ($C-S-H$: $3CaO.2SiO_2.3H_2O$) :



L'hydratation des aluminates tricalciques (C_3A) 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 C_3A réagissent avec l'eau pour donner des C_4AH_{13} , C_2AH_8 , et des C_3AH_6 . Les C_4AH_{13} et C_2AH_8 sont instables. Sous l'action de la chaleur d'hydratation, ils se transforment en C_4AH_8 .

La phase ferrite (C_4AF) 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).

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).

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

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

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

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

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

- une matrice inerte sableuse liée au ciment,

- une matrice d'argile stabilisée,
- une matrice de terre non stabilisée.

1.8.7.3 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 (Walker, 1997). Ces résultats montrent que la résistance à la compression du bloc de terre comprimée stabilisée au ciment diminue avec l'augmentation de teneur en minéraux argileux (figure 1.22).

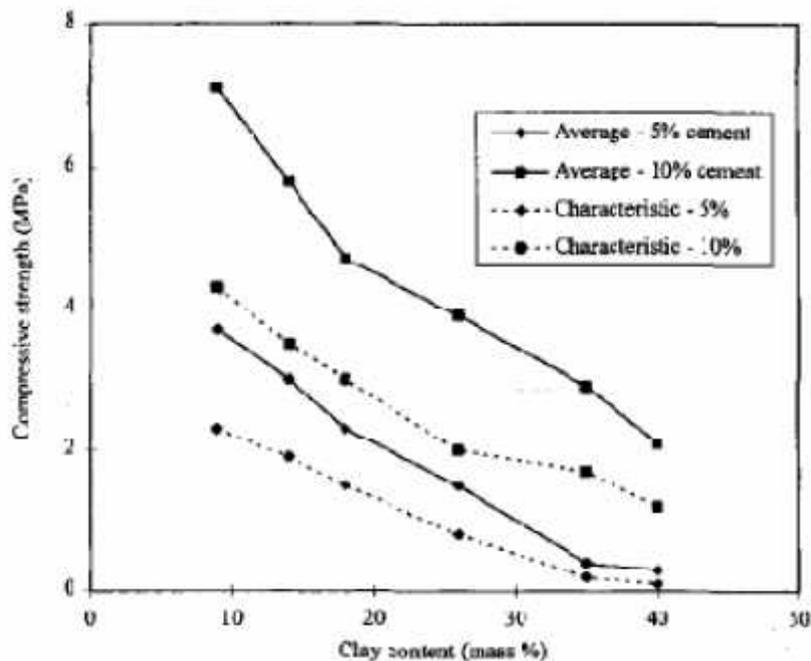


Fig . 1.22: Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la compression du bloc de terre comprimée stabilisée au ciment (Walker, 1997).

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 constituent souvent une limite supérieure économiquement acceptable (Doat,1979).

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.

(Heathcote, 1994), 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% pour être le mieux adapté. Par exemple, (Walker, 1995) indique que les blocs à base de moins de 5% de ciment sont souvent trop friable pour être manipulés. Plus tard Walker (Walker, 1996) 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%.

1.8.7.4 Effets sur les propriétés du matériau stabilisé

a. Effet sur la densité

Kerali (Kerali, 2001), 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.

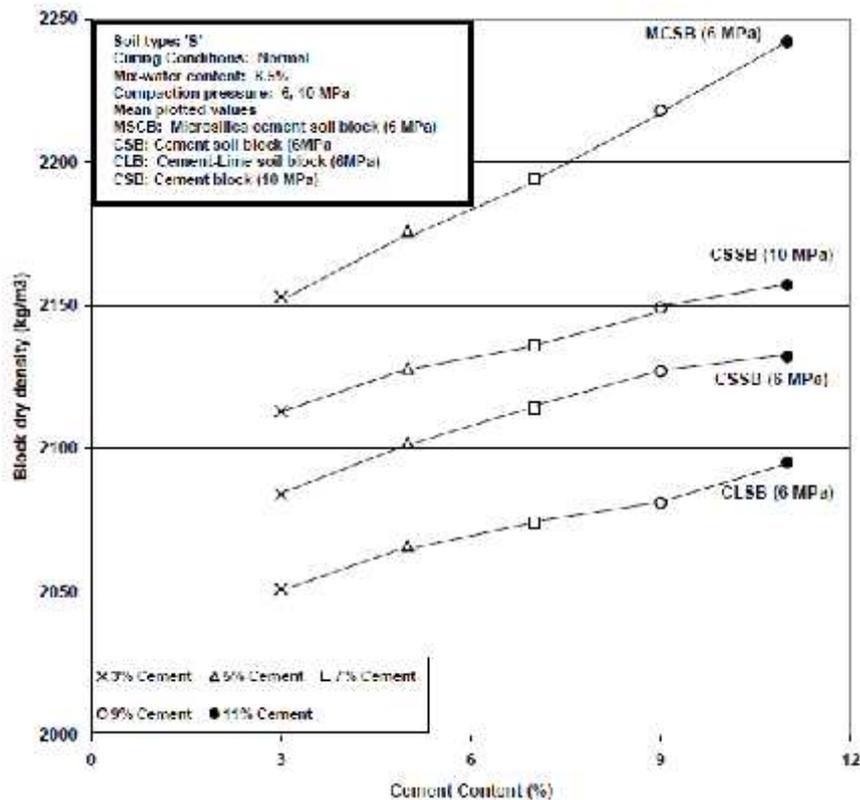


Figure 1.23 : Effet de la teneur en ciment et la contrainte de compactage sur la densité sèche du bloc de terre comprimée (Kerali, 2001).

b. 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).

Akpokodje a examiné l'effet sur la résistance du sol avec différentes teneurs en ciment (Akpokodje ,1985). 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 1,3 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) et Walker (1995).

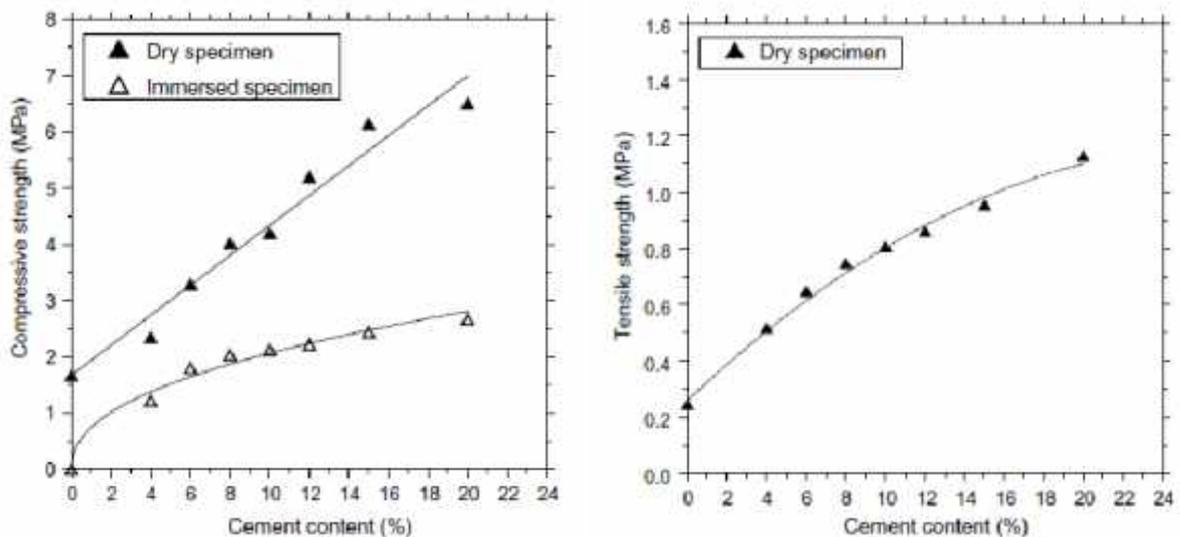


Fig 1.24 : Effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression et à la traction par fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment (Bahar, 2004)

L'amélioration de la résistance à la compression peut, suivant le sol traité, évoluer différemment avec la teneur en ciment (Doat,1979) 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), 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).

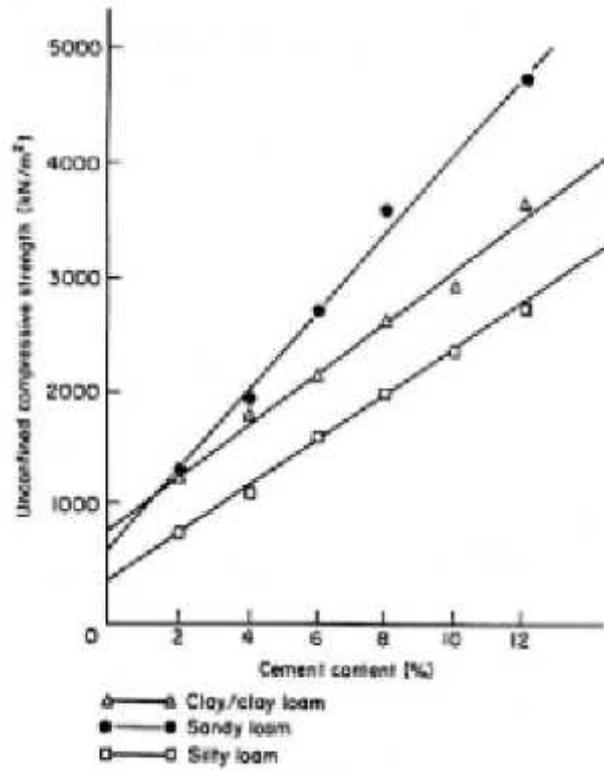


Fig. 1.25: Variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en ciment pour 3 types de sols en zone aride australienne (Akpokodje ,1985)

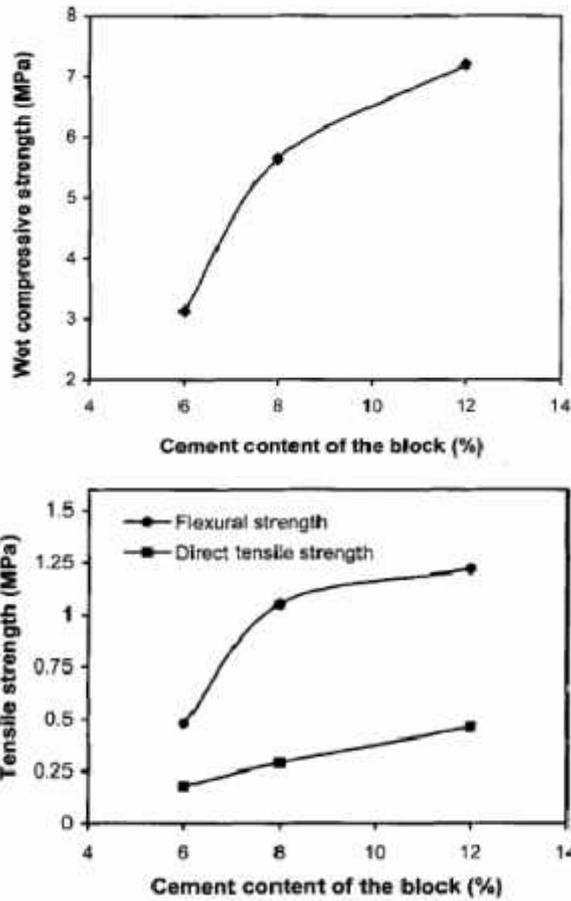


Fig. 1.26 : Variation de la résistance à la compression humide et la résistance à la traction des blocs de terre en fonction de la teneur en ciment (Venkatrama,2005).

c. 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 à 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).

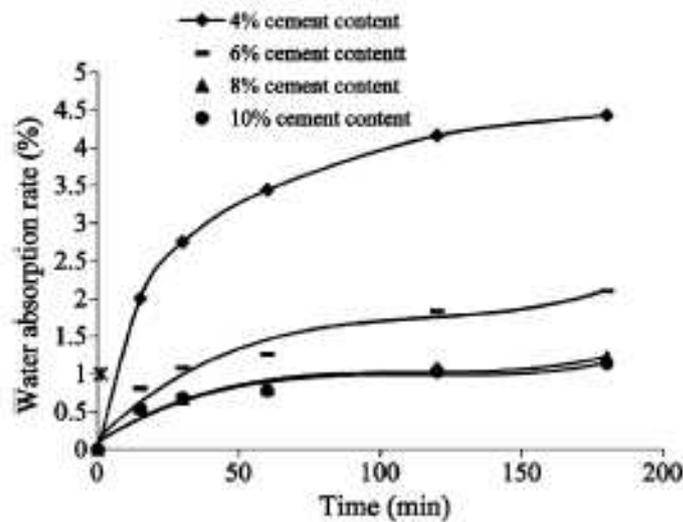


Fig. 1.27 : Variation du taux d'absorption d'eau dans le temps du bloc de terre comprimée stabilisée avec différentes teneurs en ciment (Meukam, 2004).

1.8.8 Stabilisation à la chaux

1.8.8.1 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 civilisations anciennes (Jarrige, 1989).

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).



– 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.



– 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.

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 $\text{IP} > 17$ et $\text{LL} > 40$.

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) ; (Gresillon, 1976). Le Roux (Le Roux, 1987) 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.

1.8.8.2 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.

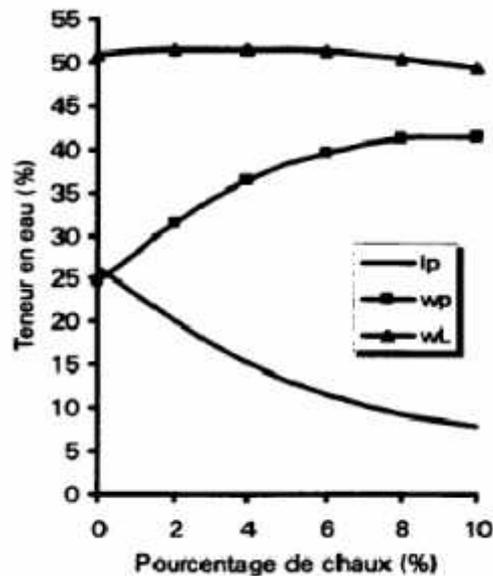


Fig. 1.28 : Variation des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage de chaux par poids (Kézdi, 1979)

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.

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

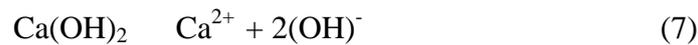
En utilisant de la chaux vive, la diminution de la teneur en eau sera plus forte en raison de la chaleur dégagée par la réaction (réaction exothermique). Quoique la chaleur dégagée par la réaction soit en grande partie responsable de l'évaporation de l'eau, le malaxage peut également provoquer une aération 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). 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). 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 (Bergado, 1996). 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):

- Réduction de la distance (épaisseur) entre les groupes de feuillets d'argiles réduisant la sensibilité à l'eau;
- Flocculation des particules d'argiles;
- 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 flocculation et l'agglomération de l'argile

On appelle flocculation 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 flocculé beaucoup moins plastique et donc plus stable.

L'argile prend donc l'apparence de matériaux granulaires s'agglomérant en grumeaux. La flocculation 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 flocculation et l'agglomération sont relativement rapides où les changements significatifs ont lieu à l'intérieur dans quelques heures (Prusinski, 1999).

Le résultat des deux premières réactions (échange cationique et flocculation/agglomération) se reflète par un changement de la relation entre la densité et la teneur en eau. En effet, l'argile

n'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). 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.

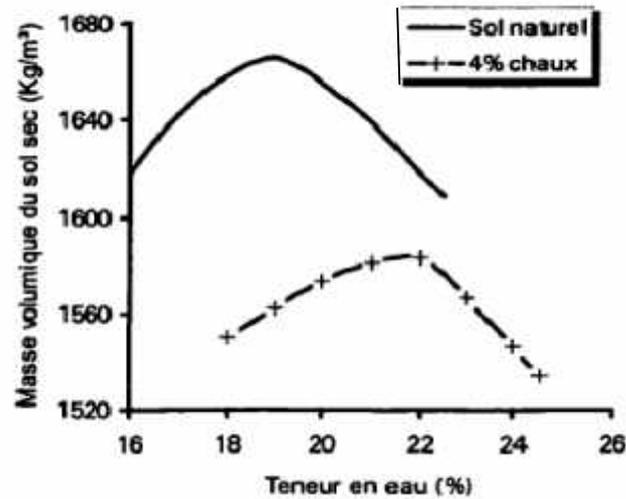


Fig. 1.29 : Déplacement de la courbe Proctor suite à une stabilisation à la chaux (Moore, 1987)

d. 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 CO_2 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 (C-S-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). 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.

1.8.8.3 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).

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.

1.8.8.4 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 Millogo (Millogo, 2008) (figure 1.31).

D'après Ausroads (Ausroads,1998), 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.

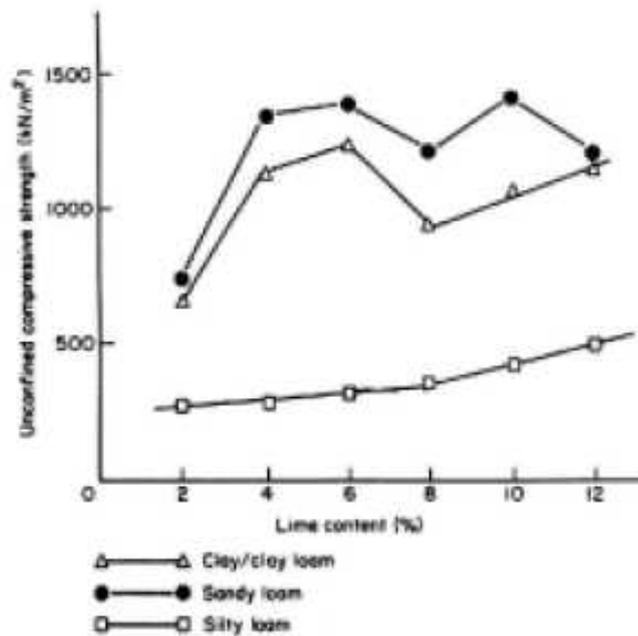


Fig. 1.30 : Variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux pour 3 types de sols en zone aride australienne (Akpokodje ,1985)

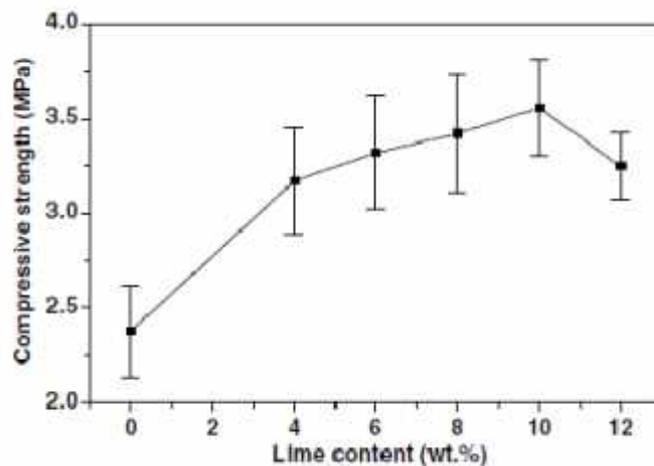


Fig. 1.31: Evolution de la résistance à la compression des briques d'adobe en fonction de la teneur en chaux (Millogo ,2008)

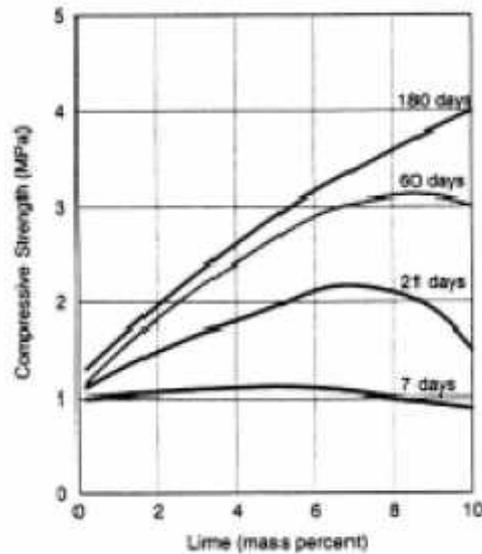


Fig. 1.32: La variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et l'âge (Ausroads,1998).

À travers une étude menée pour l'amélioration de la durabilité du béton de terre stabilisée, Guettala (Guettala, 2003) a constaté une évolution de la résistance à la compression à 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 à l'état sec peut être rapide pour de faibles teneurs en chaux de 5 à 8 % provoquant 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 (figure 1.33).

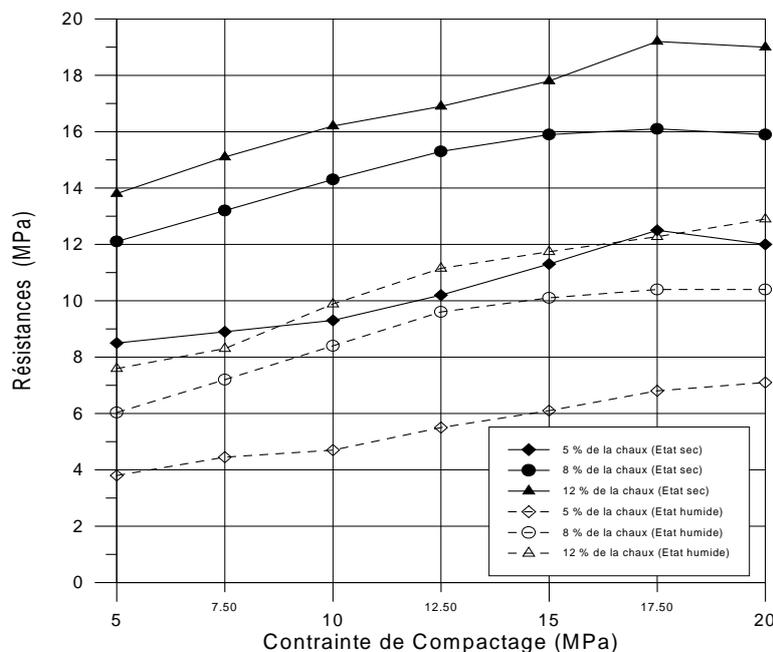


Fig 1.33 : Influence de la contrainte de compactage et de la teneur en chaux sur les résistances mécaniques (Guettala, 2003).

1.8.9 Stabilisation mixte chaux-ciment

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

Une étude menée par Tesoriere et al. ((Tesoriere, 1981) cité par (Guettala, 2003)) a porté sur la caractérisation mécanique des sols limoneux trop plastiques ayant subi un traitement mixte chaux-ciment. L'évolution observée des résistances à 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 $2,1 \text{ MPa}$;
- 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 à $25 \text{ }^\circ\text{C}$. 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 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 paraît limité comme pour les mélanges sol-ciment. Par contre, pour les forts dosages en

chaux, l'accroissement des résistances continue pendant un temps assez long comme pour les mélanges sol-chaux. A faible dosage en chaux, un retard de trois (3) heures entre l'addition des liants apporterait des améliorations de performances mécaniques aussi bien à court terme qu'à long terme.

Une étude menée par Ben Amor et al. (1997) sur le traitement de la montmorillonite avec 5 % de CaO des mélanges M3 et de M4 (tableau 1.3), a montré que l'influence du traitement est appréciée à partir des propriétés mécaniques d'échantillons extrudés. La tenue à l'eau des éprouvettes n'est guère améliorée. Celles ci se délitent dès qu'elles sont immergées.

Tableau 1.3 : Les proportions des constituants (Ben Amor, 1997)

Echantillons	Montmorillonite (%)	Montmorillonite traité (%)	Ciment (%)	Eau d'extrusion (%)
M3	00	70	30	52
M4	70	00	30	40

Les courbes de la figure 1.34 indiquent que les résistances de toutes les éprouvettes augmentent sensiblement jusqu'à 28 jours d'âge. Au delà de cette échéance, elles demeurent pratiquement constantes. Les produits à base de montmorillonite traités à la chaux (M3) présentent des performances mécaniques moins importantes que celles des mélanges montmorillonite sans addition de la chaux (M4). Le traitement de la montmorillonite à la chaux ne semble pas être un moyen d'améliorer la stabilisation de cette argile par le ciment.

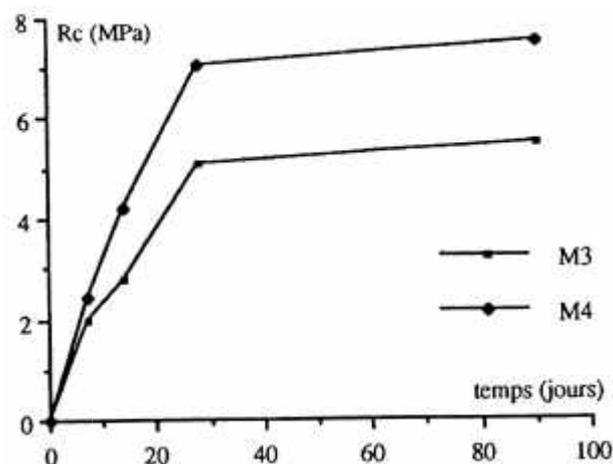


Fig. 1.34 : Résistance à la compression (Rc) en fonction du temps (Ben Amor, 1997).

1.8.9 Stabilisation par fibres

La stabilisation par armature à l'aide de fibres est très employée de par le monde en construction en terre. Les fibres sont principalement employées pour la confection des blocs moulés par pétrissage, avec des terres plutôt argileuses présentant souvent un important retrait. Les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille sont très variées mais on connaît aussi l'emploi de fibres pour construire en torchis, en terrepaille, en bauge ainsi qu'en blocs comprimés et en pisé (Houben, 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).

Dans le reste de ce chapitre, nous allons passer en revue les principales fibres utilisées dans la fabrication des matériaux composites en général et les briques de terre fibrée et le renforcement des sols en particulier.

1.9 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 matériau qui a été introduite dans le commerce comme de nouvelles applications. Elles sont classées selon leur origine (naturelles, synthétiques et artificielles), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc), leur dimension (macro ou micro-fibre) 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.

1.9.1 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 (figure 1.35) (Baley, 2013) :

– **Les fibres végétales** : l'utilisation de fibres naturelles, et en particulier de fibres végétales comme renfort de matériaux composites, présente deux principaux avantages. Tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles à faible coût et leur utilisation en construction constitue

de nouveaux débouchés pour les matières agricoles. D'autre part, la valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport à des composites conventionnels puisque ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables, neutres vis-à-vis des émissions de CO₂ et demandant peu d'énergie pour être produites.

Les fibres végétales comprennent :

- des fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok),
- les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ortie),
- les fibres extraites de feuilles (sisal), de troncs (palmier), d'enveloppes de fruits (noix de coco) ;

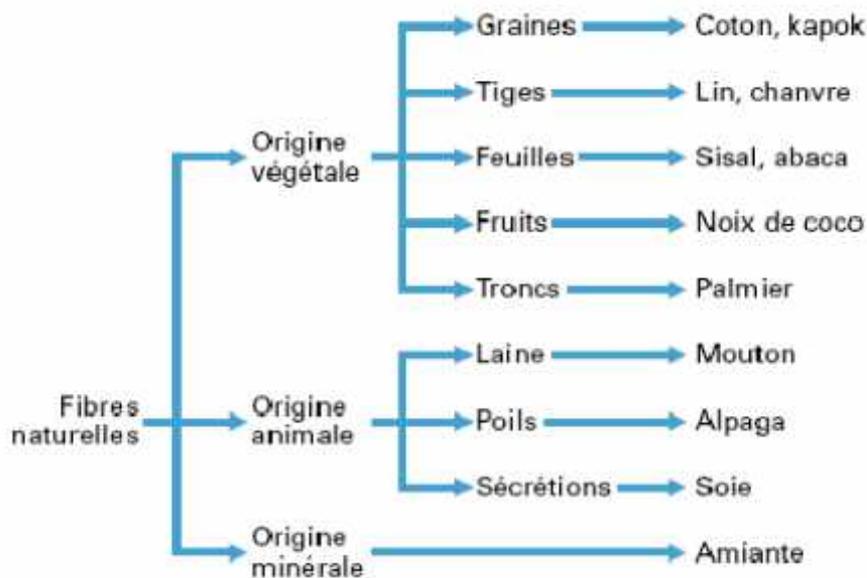


Fig.1.35 : Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Baley, 2013)

– **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'araignée ;

– **Les fibres minérales** : L’amiante est la seule fibre minérale naturelle. Elle a attiré l’attention des industriels pour sa résistance à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques et pour son pouvoir absorbant. Elle a été utilisée dans diverses installations industrielles et même en construction avant de l’interdire progressivement à cause des risques cancérogènes qu’elle présente (Service,2004).

b. Fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont fabriquées avec des polymères de synthèse obtenus à partir de substances ou de composés fournis par l’industrie pétrochimique. Elles ont fait leurs apparitions au début de 20^{ème} siècle, après la réussite de la fibre de Viscose, depuis lors, un grand nombre de fibres synthétiques ont été mises au point; elles possèdent chacune des propriétés qui répondent à un type particulier d’application. Ces fibres, tout comme les fibres artificielles, sont obtenues par filage. Elles suscitent l’intérêt de beaucoup d’industriels pour leur faible coût, leur disponibilité et leur indépendance des saisons et surtout la possibilité de les adapter et modifier leurs propriétés, par contre, elles sont très critiquées quant à leur comportement vis-à-vis de l’environnement que ce soit pendant le processus de fabrication ou après leur utilisation et les difficultés de leur recyclage .

Les principales catégories de fibres synthétiques commercialisées sont:

- Les polyamides (Nylons) ;
- Les polyesters ;
- Les dérivés polyvinyliques ;
- Les polyoléfines : les polyéthylènes et les polypropylènes : sont d'une importance croissante et leur production s'élève maintenant à environ 8% de toutes les fibres synthétiques (Quinn, 2002).

c. Fibres artificielles :

Ce type de fibres 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’autres. Elles sont aujourd’hui les plus répandues dans l’industrie de la construction.

1.9.2 Les fibres végétales

Le début de XXI^{ème} siècle a marqué le retour des industries aux fibres végétales. Avec l'intérêt croissant à l'environnement et l'encouragement des gouvernements et des institutions à l'investissement durable, la tendance est de s'orienter vers ce type de fibres écologiques et fonctionnelles. Ce retour est d'autant plus important, que les ressources pétrolières sont de plus en plus rares et coûteuses.

Nous nous intéresserons dans cette thèse aux fibres de palmier dattier (*Phoenix L. dactylifera*) qui constitue l'une des richesses végétales les plus abondantes en Algérie et qui de nos jours, restent peu exploitées. Donc il est nécessaire de mettre en lumière certains points important de ces fibres.

1.9.2.1 Le palmier dattier

Le palmier dattier est typiquement cultivé dans les oasis sahariennes. Celui originaire d'Afrique du Nord, est amplement cultivé de l'Arabie jusqu'au Golf Persique, où il forme la végétation caractéristique des oasis. Il est cultivé en outre aux Canaries, dans la Méditerranée septentrionale et dans la partie méridionale des Etats-Unis. C'est une plante sensible au froid, qui pousse sur des terrains de n'importe quelle nature, pourvu qu'ils soient fertiles et bien drainés. Dans les régions à climat doux, il est cultivé en plein air, en position ensoleillée, utilisé surtout comme plante ornementale pour son allure élancée et son feuillage (Sbiai,2011).

Il existe plus de 2600 espèces de palmiers. On pourrait croire que c'est un arbre qui possède un tronc alors que c'est un monocotylédone qui ne contient pas de bois ni de tronc mais possède un stipe. De plus, c'est une plante dioïque contenant donc des palmiers mâles et des palmiers femelles. Le palmier est très élancé, généralement il a hauteur entre 15 et 25 mètres et peut atteindre parfois 30 mètres, couvert de manière visible par les gaines des feuilles tombées. Les feuilles, réunies en un nombre de 20 à 30 maximum, forment une couronne apicale clairsemée (figure 1.36), (figure 1.38). Elles sont pennées, longues jusqu'à 6m; les feuilles supérieures sont ascendantes, les basales recourbées vers le bas, avec des segments coriaces, linéaires, rigides et piquants, de couleur verte.



Fig. 1.36 : Photo des palmiers dattiers

Le palmier dattier se constitue principalement de 10 parties à savoir (figure 1.37) (www.relais-sciences.org/odj/doc/palmier_dattier) :

1. Palmes

Les palmes sont les feuilles du palmier. Elles sont finement découpées et longues de 4 à 7 mètres. Les feuilles âgées peuvent rester contre le stipe quelques mois voire plusieurs années avant de tomber. L'ensemble des feuilles au sommet du stipe est appelé couronne ; elle peut faire de 6 à 10 mètres d'envergure.

2. Jeune palme

La jeune palme est enroulée pendant toute sa croissance comme les brins d'herbe ou les feuilles de bambous.

3. Régime de dattes

Un régime de dattes est la partie qui supporte les fruits du palmier. On parle aussi de régime pour les bananes. Il est accroché au palmier par la hampe, qui est d'ailleurs tellement résistante qu'elle doit être sciée pour être décrochée. Il peut contenir plus de 1000 fruits.

4. Dattes

Ces fruits sont des baies de forme ovale de 3 cm de long. La chair très sucrée entoure la graine. Récoltées en automne, leur couleur varie du rouge lumineux au jaune lumineux selon les variétés ; elles seront ensuite séchées au soleil. Un palmier dattier peut produire de 10 jusqu'à 100 kg par an.

5. Gourmand

Un gourmand est une branche secondaire qui se développe sur une branche principale d'une plante. Il faut généralement les supprimer car comme leur nom l'indique, ils sont gourmands et épuisent inutilement la plante.

6. Stipe

Le stipe rappelle le tronc des arbres, mais il est en fait composé de fibres végétales des anciennes feuilles. Son diamètre peut varier légèrement selon les conditions climatiques.

7. Cicatrices annulaires

On a l'impression que le palmier a un «tronc recouvert d'écailles». Ces cicatrices annulaires correspondent au point d'attache de la feuille ancienne une fois le pétiole (support de la feuille) tombé. Elles permettent au grimpeur de s'y accrocher pour atteindre les dattes.

8. Rejet

Le rejet est une jeune pousse du végétal, dont il est possible de planter pour obtenir un nouveau palmier. Celui-ci sera choisi par l'homme parmi une sélection des meilleurs palmiers.

9. Bulbe

Se situant à la base du stipe, le bulbe constitue la réserve du palmier. De là part le système racinaire d'où émergent les racines primaires courtes de moins d'un mètre, et longues de plus de 20 mètres.

10. Racines

Elles sont nombreuses et profondes jusqu'à 20 mètres ; elles sont capables d'aspirer 500 litres d'eau par jour.

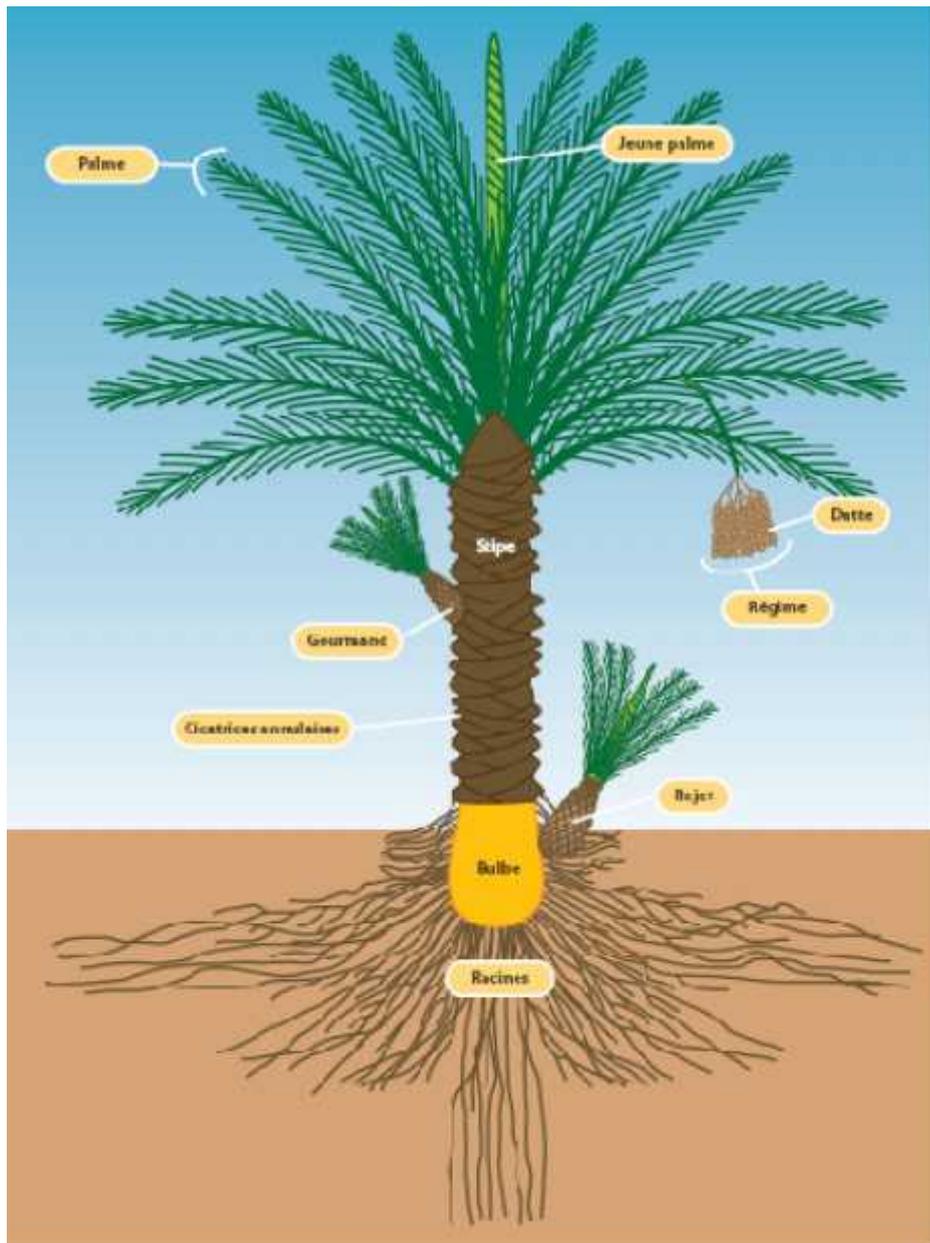


Fig. 1.37 : Structure générale d'un palmier dattier
(www.relais-sciences.org/odj/doc/palmier_dattier)

1.9.2.2 Les fibres de palmier dattier

Les palmiers dattiers ont une structure fibreuse, avec quatre types de fibres (Kriker, 2005):

- les fibres de feuilles dans le pédoncule,
- les fibres de baste dans les tiges ;
- les fibres de bois dans le tronc (figure 1.38) ;
- les fibres de surface autour du tronc (appelées localement : lif ou leaf) (figure 1.39).



Fig. 1.38: Photo d'une section du tronc du palmier dattier



Fig. 1.39 : Photo du lif autour du tronc du palmier dattier

Kriker et al (Kriker, 2005) ont mené une étude sur les fibres de palmier dattier de surface. Les auteurs ont justifié leur choix, en disant que ces fibres semblent les plus appropriés pour l'exploitation. Cette étude est faite sur quatre types de fibres de surface de palmiers dattiers (FSPD) à savoir : le palmier dattier mâle, Deglette-Nour, Degla-Bida et Elghers (désignations locales). Les résultats ont révélé que les fibres de surface du palmier dattier mâle (FSPDM) ont une résistance à la traction meilleure que celle des autres types de fibres étudiées. Dans le cadre de cette étude, ils ont étudié aussi la morphologie et la structure des fibres par microscopie électronique à balayage (MEB). Les clichés MEB présentés sur les figures 1.40.a, 1.40.b et 1.40.c, montrent une coupe transversale typique, une coupe longitudinale typique et une vue longitudinale de la fibre FSPDM. Les figures 1.40.a, 1.40.b montrent que la section de la fibre est dense avec un petit canal et de nombreux petits pores qui permettent la circulation de la salive. Ceci confirme que la structure est poreuse et que les fibres ont un comportement hydrophile. La figure 1.40.c montre que les fibres FSPDM possèdent une certaine rugosité sur leur surface, ce qui assure une bonne adhérence fibres-matrice.

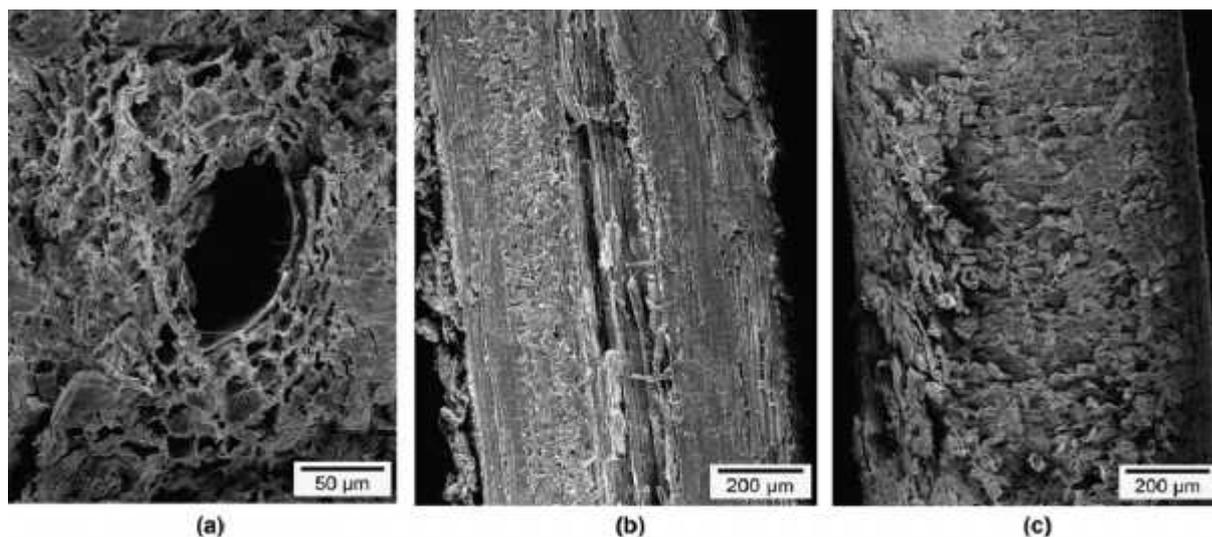


Fig. 1.40 : Observation sous MEB des fibres de palmier dattier mâle de surface : (a) coupe transversale typique ; (b) coupe longitudinale typique ; (c) vue longitudinale de la fibre (Kriker, 2005)

1.9.2.3 Caractéristiques générales des fibres lignocellulosiques

a. Composition chimique

Les constituants majoritaires des fibres lignocellulosiques déshydratées sont : la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. D'autres produits comme les protéines, les pectines, l'amidon et les sels inorganiques sont présents en quantités plus faibles (Rowell, 1995). La composition chimique des fibres dépend de leur origine, mais d'une façon générale la cellulose est toujours majoritaire avec des pourcentages en poids pouvant aller de 22% pour les fibres provenant du sabai, jusqu'à 85% pour les linters de coton (tableau 1.4). Les concentrations en lignine varient de 7 à 24% en poids et celles des hémicelluloses de 12 à 27% en poids. Ces composés sont des hétéropolymères qui présentent une grande variabilité en composition chimiques selon leur origine. Les composés inorganiques, caractérisés par leur teneur en cendres, varient aussi en fonction de la nature de la fibre. Ainsi, cette teneur est de 1% en poids pour les fibres lignocellulosiques de bois et de l'ordre de 14% pour les fibres issues du riz (Sbiai,2011).

La **cellulose** est un polymère de glucose qui est l'un des constituants principaux de la paroi végétale. Il s'agit du biopolymère responsable de la majorité des résistances mécaniques dans les végétaux ne possédant pas de tissus secondaires, de part sa forte structure cristalline et son arrangement très ordonné. Cette quantité ne cesse de croître avec le temps ; une plante

jeune aura donc une résistance mécanique plus faible car elle possèdera moins de cellulose (Keller, 2001). Son organisation, majoritairement cristalline, rend la cellulose **insoluble dans la plupart des solvants notamment l'eau**, même si ce composé reste très hydrophile.

Cependant, si la structure cristalline de la cellulose est modifiée, par exemple lorsque l'on passe de la cellulose I, très cristalline, à la cellulose II, amorphe, les propriétés mécaniques sont dégradées (Bledzki, 1999).

Tableau 1.4 : Composition chimique de quelques fibres naturelles (Reyne,1990), (Gandini,2002)

Type de fibres	Cellulose (‰)	Hémicelluloses (‰)	Lignine (‰)	Autres (‰)
Fibres de pailles				
Riz	28 - 36	-	12 - 16	-
Blé	29 - 35	27	16 - 21	11-23
Fibres de cannes à				
Sucre	32 - 44	22	19 - 24	26-8
Bambou	26 - 43	15	21 - 31	9-35
Fibres d'herbes				
Alfa (Esparto)	33 - 38	-	17 - 19	-
Sabai	22	-	23,9	-
Fibres péribériques				
Lin	43 - 47	16	21 - 23	13-20
Kénaf	31 - 39	19	15 - 19	23-35
Jute	45 - 53	15	21 - 26	5-11
Fibres de feuilles				
Abaca (Mamila)	50,8	20	8,8	10
Sisal (agave)	43 - 56	17	7 - 9	23-38
Fibres de graines				
Linters de coton	80 - 85	-	-	-

Les **lignines** qui sont des composés très hydrophobes, se présentent sous forme de polymères tridimensionnels. Leur structure complexe varie en fonction de l'espèce mais aussi des éléments morphologiques (fibres, vaisseaux...). Elles confèrent aux végétaux qui en possèdent **rigidité et imperméabilité**, les lignines étant des composés très hydrophobes. Enfin, elles participent à la cohésion des fibres dans les parties boisées lignocellulosiques du xylème et leur apportent une importante résistance en compression.

Les **hémicelluloses** sont des polysaccharides à chaînes plus courtes que celles de la cellulose et possèdent une structure amorphe. Elles sont hydrophiles et ont notamment la **capacité de gonfler au contact de l'eau**. C'est ce gonflement qui est responsable de l'instabilité dimensionnelle du bois. Par ailleurs, les hémicelluloses sont solubles dans l'eau et peuvent être extraites de la paroi lors d'une trempée alcaline notamment.

Les **pectines** sont des polysaccharides acides. Elles sont présentes en quantité importante dans la lamelle mitoyenne, où elles assurent la cohésion des cellules. Au même titre que les hémicelluloses, il s'agit d'un composé soluble dans l'eau. Il faut noter que la composition et la structure des hémicelluloses et des pectines varie avec l'espèce végétale et elle est de ce fait très complexe à appréhender (Nozahic, 2012).

b. Composition structurale

Une fibre présente les parties suivantes (figure 1.41) :

- la lamelle mitoyenne M d'épaisseur de 0.5 à 2 μm en périphérie qui est commune aux cellules voisines. Elle est composée principalement de lignine (70%) associée à d'autres composés organiques tels les hémicelluloses, la pectine, la cellulose. La lamelle mitoyenne soude les fibres les unes aux autres et leur confère une grande rigidité grâce à la présence de la lignine.
- La paroi primaire P, très mince (0.03 à 0.1 μm) est souvent confondue avec la lamelle mitoyenne. Elle est constituée d'une structure fibrillaire enrobée dans un mélange de lignine, de pectines et d'hémicelluloses (figure 1.42).

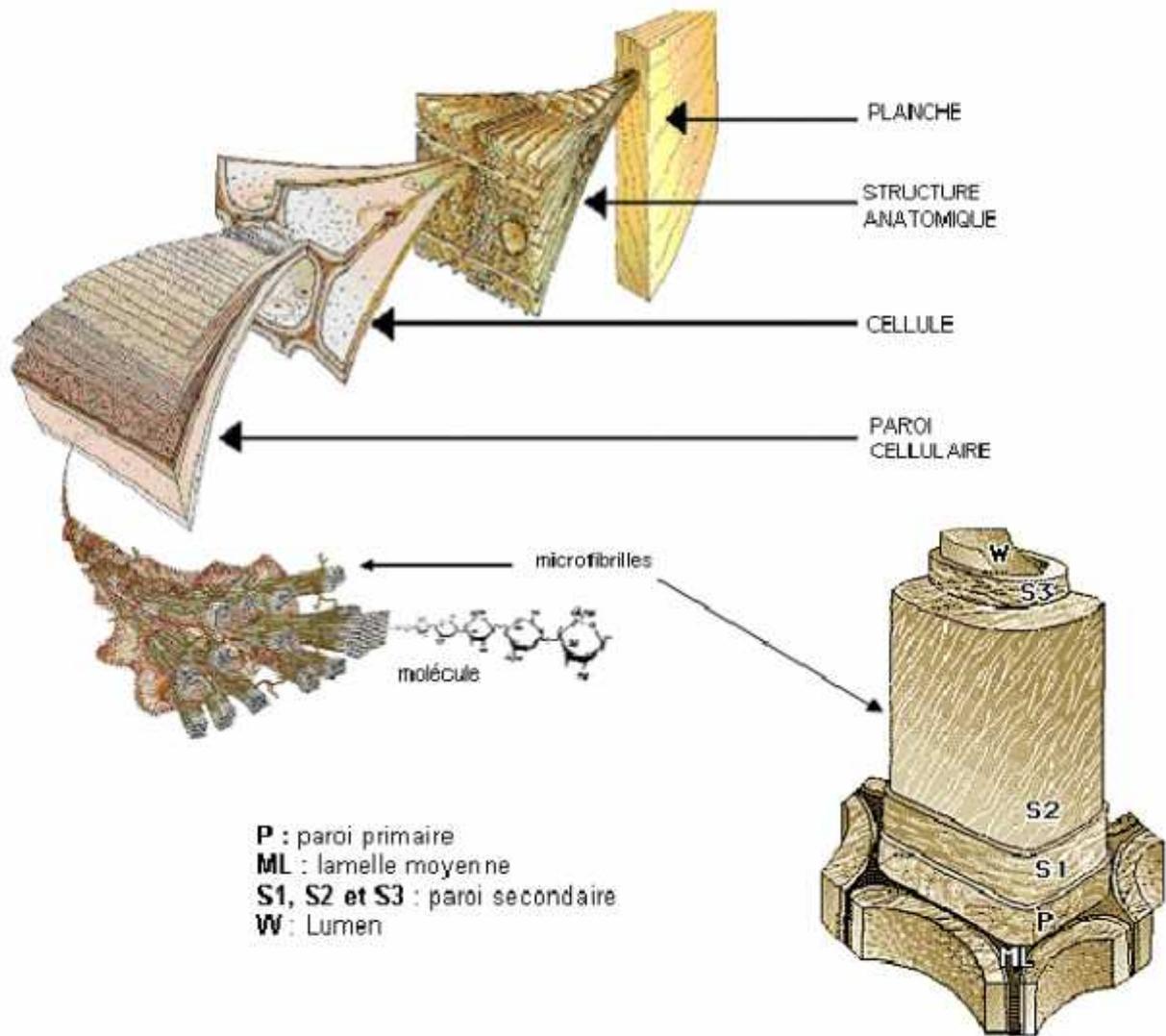


Fig. 1.41 : Structure des fibres de bois (observations multi échelles: d'après Harrington (Harrington ,1998) cité par (Sbiai,2011)).

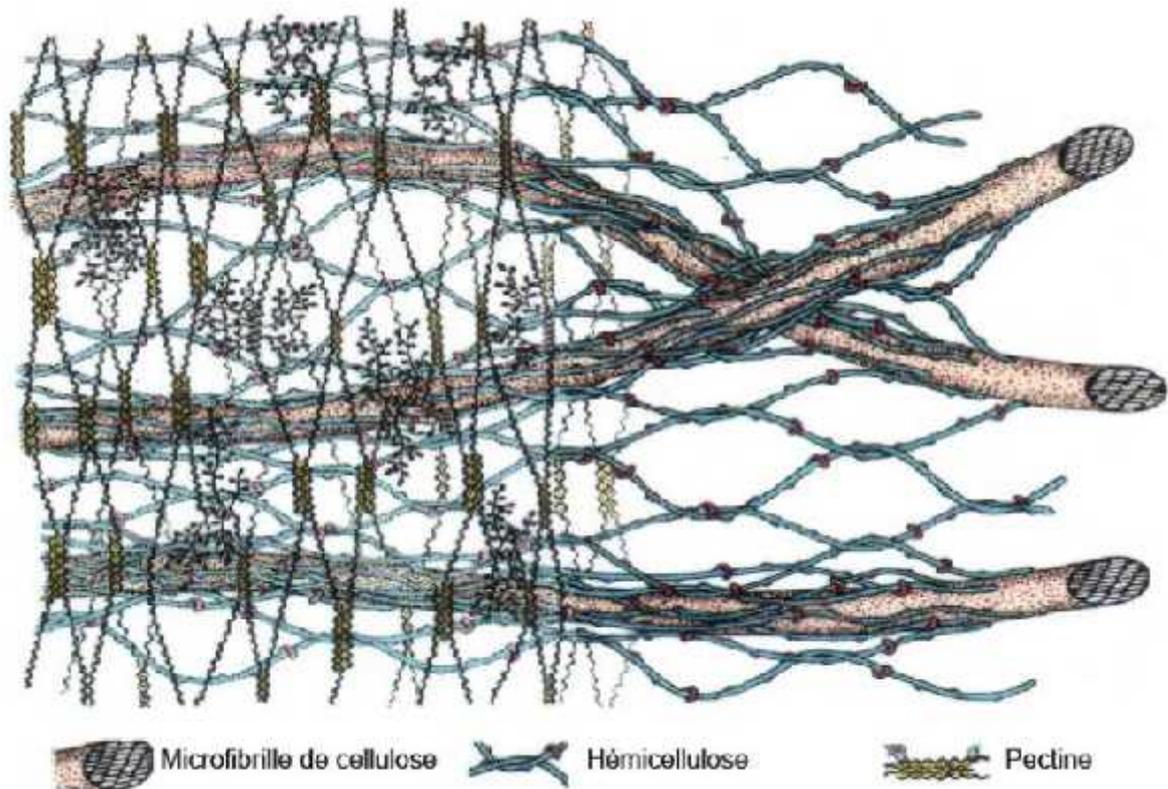


Fig. 1.42 : Structure tridimensionnelle de la paroi primaire (Sbiai, 2011).

- La paroi secondaire, principale partie de la fibre qui comprend trois parties distinctes :

- La paroi externe S1 mince (0.1 à 0.2 μm) dans laquelle les fibrilles sont enroulées en hélices parallèles, de sens opposés (une couche dans un sens, l'autre couche croisée).
- La paroi centrale S2, elle est la plus épaisse (0.5 à 8 μm). Les fibrilles sont disposées en hélices parallèles, la rigidité de la fibre dépend de l'épaisseur de cette paroi.
- La paroi interne S3 (appelée paroi tertiaire) ; mince (0.04 à 0.1 μm), voisine du lumen W. Entre les fibres, il existe des espaces qui sont partiellement composés de lignine et d'hémicelluloses.

1.10 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).

Ce phénomène est mis en évidence par la figure 1.43 représentant le comportement d'une matrice cimentaire pure et de la même matrice renforcée par 16% en volume de fibres de chanvre.

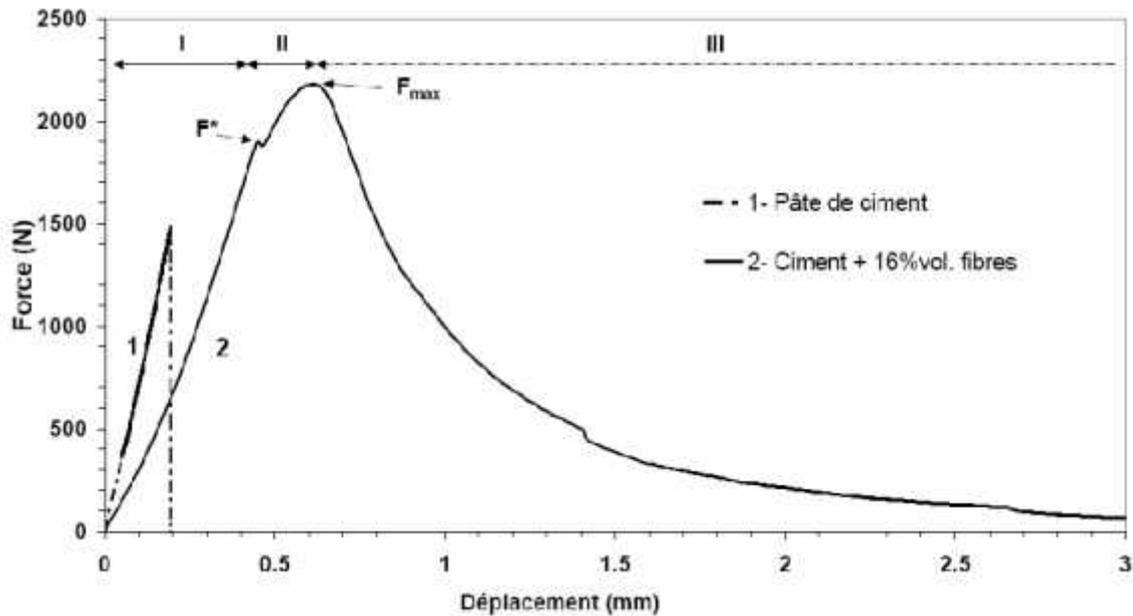


Fig. 1.43 : Courbes du comportement typique d'un échantillon de ciment pur (1) et d'un composite ciment/fibres de chanvre (2) en flexion 3 points (Sedan,2007).

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 fibré 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).

1.11 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 reconnue il ya 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.

1.11.1 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 1.44 et 1.45). Une tendance similaire a 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).

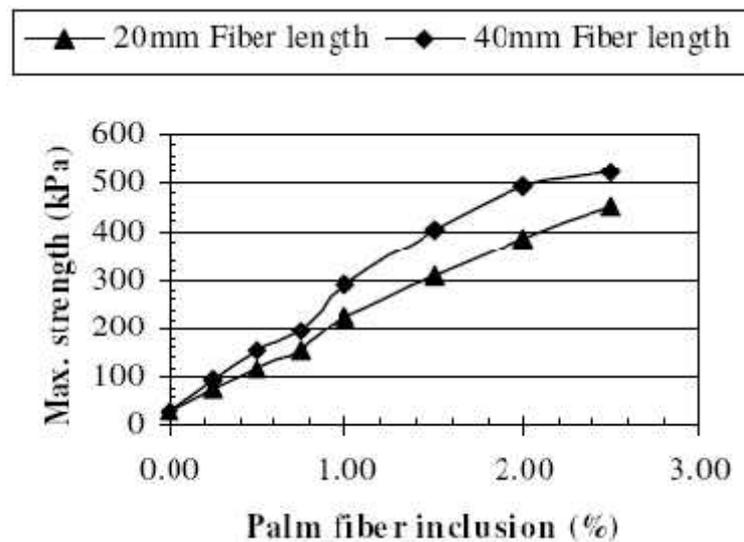


Fig. 1.44. : Les résistances à la compression maximales avec les teneurs en fibres de palmier dattier (Marandi, 2008)

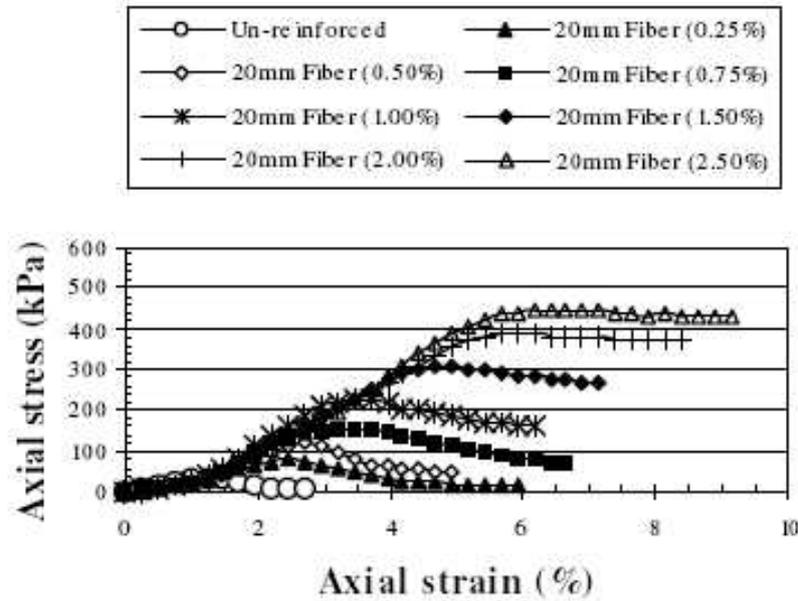


Fig. 1.45 : Les courbes contrainte-déformation des échantillons de sol renforcés et non renforcés par des fibres de palmier sous l'essai de compression non confiné (Marandi, 2008)

1.11.2 Les fibres de polypropylène

Pour le renforcement du sol, les fibres de polypropylène sont les plus utilisées dans les essais de laboratoire (Tang, 2007). Actuellement, les fibres de polypropylène sont utilisés pour améliorer les propriétés de résistance du sol, afin de réduire le retrait et contourner les problèmes de dégradation chimique et biologique (Vasudev,2007).

Puppala et Musenda ont montré à travers leur étude, que l'utilisation des fibres de polypropylène comme renfort améliore la résistance à la compression non confinée du sol et réduit le retrait et le gonflement des argiles gonflantes (Puppala,2000).

Les résultats des essais de Tang et al. (Tang, 2007) ont indiqué que l'incorporation des fibres pour le renforcement des sols avec ou sans ciment, a causé une augmentation de la résistance à la compression non confinée (figure 1.46), la résistance au cisaillement et la déformation axiale de rupture, une diminution de la rigidité et la perte de résistance post-pic. Les auteurs ont constaté aussi un changement du mauvais comportement du sol stabilisé au ciment en un autre plus ductile.

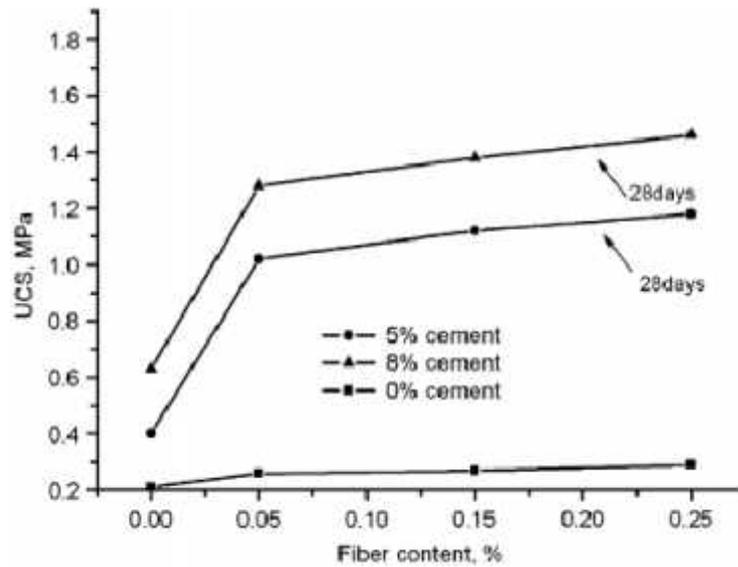


Fig. 1.46: La relation entre la résistance à la compression non confinée et la teneur en fibres (Tang, 2007).

Afin de comprendre l'effet de la teneur en fibres de polypropylène, la teneur en chaux et le temps de cure sur le comportement du sol argileux étudié, Cai et al. (Cai,2006) ont examiné un grand nombre d'échantillons de sols traités et non traités, en les soumettant aux essais de compression simple et de cisaillement direct. En outre, d'autres propriétés importantes comme le gonflement, le retrait ont été étudiés. Ils ont conclu finalement que l'augmentation de la teneur en fibres a conduit une augmentation de la résistance à la compression, le retrait et la ductilité du sol, alors que le gonflement a diminué (figure 1.47).

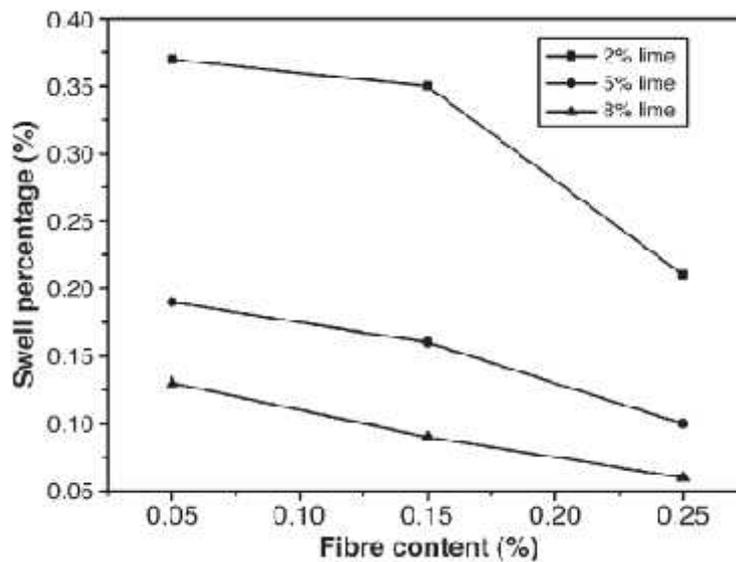


Fig. 1.47 : Effet de la teneur en fibres de polypropylène sur le gonflement des échantillons d'un sol traité à la chaux, après 7 jours de cure. (Cai,2006).

1.12 L'effet de la stabilisation par les fibres naturelles sur les propriétés des adobes

L'ajout des fibres naturelles est un moyen de stabilisation couramment utilisé dans la fabrication des adobes et autres produits de terre, et ceci depuis des milliers d'années (Mesbah,2004), (Ghavami,1999).

Le rôle des fibres est multiple, elles augmentent d'une part la résistance à la traction et par conséquent la souplesse du matériau. Une terre ordinaire, en effet, ne peut supporter que de faibles efforts de flexion, alors qu'un sol armé sera capable de subir des déformations importantes sans se fissurer. Cette élasticité empêche le mur de se craqueler au séchage, les fibres répartissent dans toute la masse du matériau les tensions provoquées par le retrait de l'argile. D'autre part, le volume qu'elles occupent dans le mur diminue sa densité et améliore ses qualités isothermiques (Doat,1979).

Les recherches actuelles réalisées sur l'adobe en utilisant plusieurs types de fibres végétales ont abouti à des résultats différents.

Ghavami et al. (Ghavami,1999) se sont intéressés à l'étude d'un sol, sans fibres et stabilisé parfois avec des fibres de sisal et d'autres fois avec de noix de coco. Ils ont constaté que la rupture du sol non fibré est très rapide et presque sans avertissement. En revanche, dans le cas du sol avec fibres, ils ont remarqué qu'après que la charge de rupture a été atteinte, les échantillons se déforment encore. D'après les auteurs, ceci peut être due à la répartition des forces internes de la matrice du sol vers les fibres de renforcement (figure 1.48).

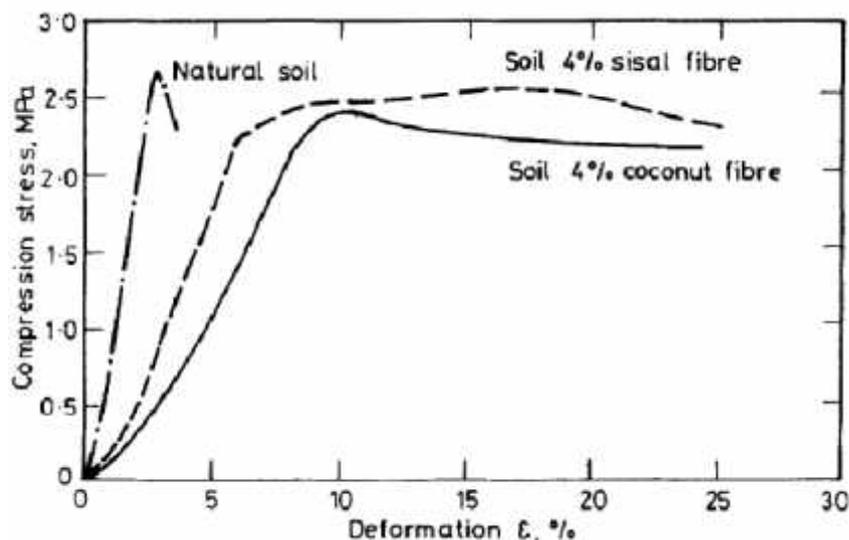


Fig. 1.48 : Influence de 4% de fibres sur la relation contrainte-déformation du sol (Ghavami, 1999).

Yetgin et al. (Yetgin, 2008) ont étudié cinq types différents de sols stabilisés par la paille. Les résultats montrent qu'avec l'augmentation de la teneur en fibres, il y a une diminution des résistances à la compression et à la traction et du retrait.

1.13 L'effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des blocs de terre comprimée

L'avantage du coût des fibres naturelles par rapport au coût des fibres synthétiques explique en partie la tendance d'utilisation en faveur des fibres naturelles (Thielemans, 2004). Mais il faut dire, que l'utilisation des fibres naturelles comme un matériau de construction pose un défi particulier à la science et à la technologie (Swamy, 1990).

L'industrie des fibres naturelles doit relever le défi de développer de nouvelles technologies pour faciliter l'utilisation des fibres naturelles dans la production de matériaux de construction, en se basant sur leurs avantages naturels pour concurrencer efficacement les produits synthétiques. Les défis particuliers pour les scientifiques sont : l'adhérence fibre / matrice, la faible résistance, le problème de stockage sur de longues périodes, les fibres sont hydrophiles, les problèmes de compatibilité, la sensibilité à l'humidité, la dégradation des fibres pendant le traitement, l'orientation et la distribution des fibres.

L'utilisation des fibres naturelles locales est plus avantageuse pour la population, vu son abondance, son coût faible, sa faible consommation d'énergie qui permet la réduction des impacts environnementaux, (Coutts, 1995 ; Aggarwal, 1995 ; Bouhicha, 2005 ; Binici, 2005 ; Hejazi, 2012 ; Millogo, 2014).

Pour la stabilisation des BTC, il a été confirmé maintenant que l'emploi des liants minéraux (ciment et chaux) et le bitume comme stabilisants améliore la résistance mécanique et l'insensibilité à l'eau des BTC (Houben, 1994). Mais la stabilisation des BTC par des fibres et en particulier les fibres végétales n'a pas eu le consensus de tous les chercheurs.

Dans ce qui suit, on va passer en revue l'influence de la présence des fibres en générale et les fibres végétales en particulier, sur les propriétés mécaniques, hygroscopiques et thermiques des BTC.

1.13.1 Effet des fibres sur les propriétés mécaniques

Des études apparues depuis plusieurs années sur le BTC ont montré que l'addition des fibres naturelles réduit la taille des fissures causées par le retrait et améliore la durabilité et la résistance à la traction (Ramaswamy, 1983 ; Ziegler, 1998 ; Filho, 2000).

Dans un travail de recherche publié en 2014 (Millogo,2014), Millogo et al. se sont intéressés à la stabilisation d'un sol latéritique par des fibres d'hibiscus cannabinus (Kénaf), pour fabriquer des blocs de terre comprimée sans aucun stabilisant chimique. Les BTC ont été renforcés avec des teneurs en fibres de 0,2 à 0,8 % en poids et avec deux longueurs de fibres 30 mm et 60 mm. Les résultats montrent que la présence des fibres d'hibiscus cannabinus a amélioré les caractéristiques physiques et mécaniques des blocs. L'important effet a été observé avec le cas de 30 mm de longueur de fibre (figure 1.49), (figure 1.50).

Les auteurs ont justifié l'augmentation des propriétés mécaniques à la non propagation de fissures, due à la présence des fibres dans la matrice d'argile. D'après les auteurs, l'impact de ces fibres sur la résistance à la flexion est positif en raison de leur résistance à la traction élevée et de leur adhérence à la matrice d'argile. Vergas et al. ont constaté dans une étude expérimentale sur la résistance sismique de la maçonnerie, une augmentation de la résistance à la compression du BTC avec l'utilisation de 0.5-8,0% en poids, de paille de longueur 100 mm. Ils ont justifié ce résultat par l'action de couture de l'interface BTC-mortier de fibres de paille ce qui limite l'apparition des microfissures produites par le retrait de séchage (Vergas, 1986).

Lors de sa discussion sur les types de stabilisants Stulz et Mukerji reconnaissent la paille (blé, seigle, orge, etc) et les fibres végétales (sisal, chanvre, le coco et bagasse) comme une importante catégorie de stabilisants des BTC, mais ils ne l'ont pas justifié par des résultats de travaux de recherches (Stulz, 1988).

Sallehan et Yaacob ont constaté que l'ajout de 3% de fibres de palmier a amélioré la résistance à la compression des briques fibrées (Sallehan, 2011).

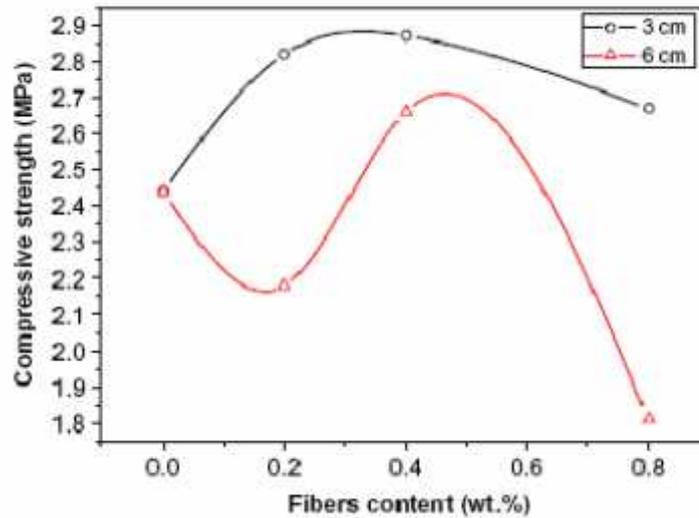


Fig. 1. 49: Les courbes de la résistance à la compression en fonction de la teneur et la longueur des fibres (Millogo,2014).

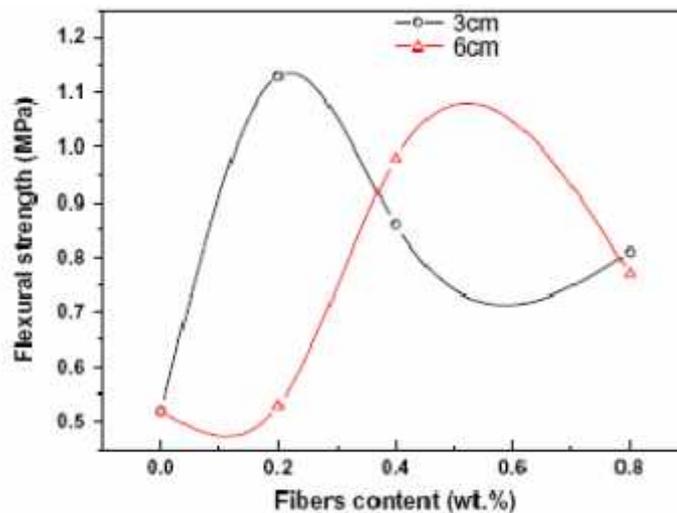


Fig. 1. 50: Les courbes de la résistance à la flexion en fonction de la teneur et la longueur des fibres (Millogo,2014).

Dans son étude, Namango a constaté, que dans certaines limites, il y a une augmentation considérable de la résistance à la compression et à la flexion à l'état sec avec l'augmentation de fibres de sisal (figure 1.51 et figure 1.52), de poudre de manioc et de teneur en ciment, et qu'en dehors de ces valeurs limites, la présence des fibres de sisal a un effet défavorable sur la résistance du bloc de terre comprimée (Namango,2006). De son côté, Minke a constaté, que l'ajout de fibres tels que poils d'animaux ou humains, coco, sisal, agave, le bambou et la paille peut aider à réduire le retrait, car la teneur en argile est réduite et une

certaine quantité d'eau est absorbée par les pores des fibres (Minke, 2000). Dans le même contexte, Villamisar et al. ont montré que l'utilisation des pelures de manioc a augmenté considérablement la résistance à sec des mélanges, ce qui est utile pour réduire les chutes causées par les problèmes de la manipulation du BTC (Villamisar, 2012).

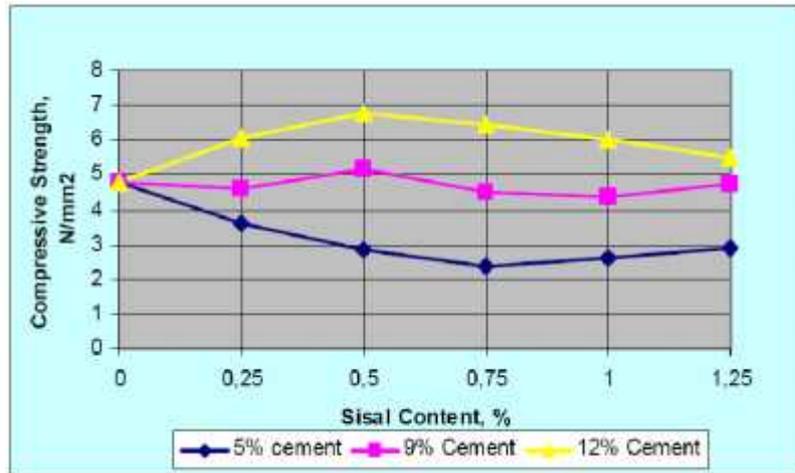


Fig. 1.51 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en fibres de sisal (Namango,2006).

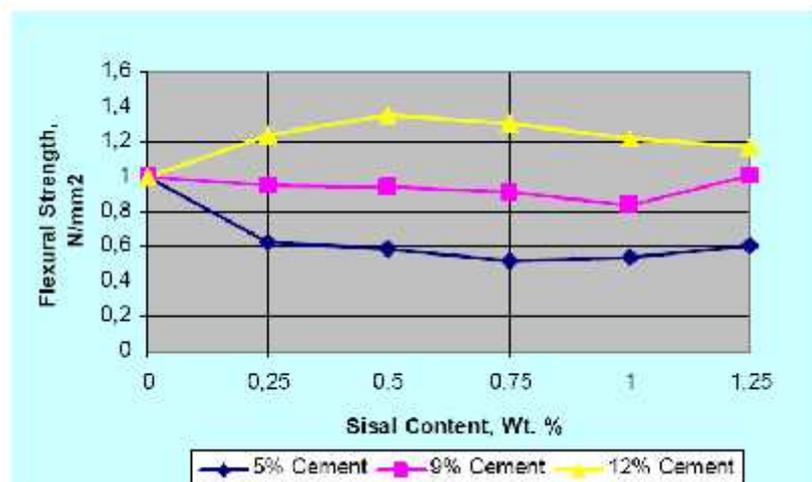


Fig. 1.52: Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en fibres de sisal (Namango,2006).

Rigassi a cité dans son manuel de production des blocs de terre comprimée, que l'introduction des fibres dans le matériau terre est un moyen de création d'un réseau de fibres omnidirectionnel, ce qui traduit par l'amélioration de la résistance à la traction et au

cisaillement et contribue aussi à réduire le retrait. Mais sans donner d'arguments, déclare que les fibres végétales sont incompatibles avec le mode de compactage des BTC, parce qu'elles rendent le mélange trop élastique (Rigassi,1995).

Khedari et al. ont soumis à l'étude des briques à base d'argile latéritique comprimée stabilisée par des fibres de coco. Les résultats montrent une légère diminution de la résistance à la compression (figure 1.53). Les auteurs ont justifié cette baisse de résistance par l'effet des dimensions, des conditions de surface et le nombre de fibres présent dans un volume donné. Donc l'augmentation de la teneur en fibres de coco conduit à une diminution de la contrainte d'adhérence, d'où une réduction de la résistance à la compression (Khedari,2005).

Olivier et El Gharbi ont effectué une étude sur les blocs de terre stabilisés avec des fibres de sisal, à travers cette étude, ils ont affirmé que le point faible est l'interface entre mortier de terre et les blocs de terre. Les auteurs ont tenté d'améliorer cette interface en renforçant bien les blocs de terre comprimés par des fibres de sisal comme le mortier de terre. Ils ont aussi évalué l'avantage de l'utilisation du sisal (Olivier, 1995).

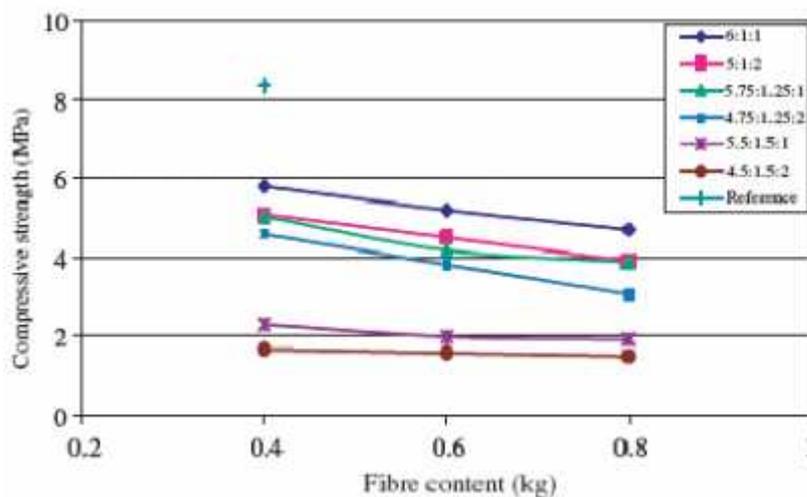


Fig. 1.53 : L'influence de la teneur en fibres sur la résistance à la compression (Khedari,2005).

Eko et. al. ont étudié le renforcement des sols avec un mélange de ciment et de fibres végétales de bagasse de canne à sucre. Dans leur étude, ils ont utilisé 5 à 10% en poids de ciment et 5 à 15% en volume de fibres de bagasse. Ils ont constaté qu'il y a une amélioration de la résistance à la compression non confinée à 28 jours avec l'augmentation de la teneur en

ciment, jusqu'à un maximum d'environ 5 MPa. Alors qu'une augmentation du volume de fibres est jugée préjudiciable au développement de la résistance (Eko, 2001).

Bouhicha et al. ont employé dans leur recherche différents teneurs et longueurs en paille d'orge hachée pour renforcer quatre types différents de sols sans stabilisants chimiques, dans le but d'étudier la possibilité d'améliorer les propriétés des sols. Les résultats des essais ont prouvé les effets positifs de l'ajout de paille à réduire le retrait (figure 1.54) et à améliorer la résistance à la compression (figure 1.55), si une teneur optimale du renfort est utilisée. Les résistances à la flexion (figure 1.56) et au cisaillement ont également augmenté pour les échantillons fibrés (Bouhicha,2005).

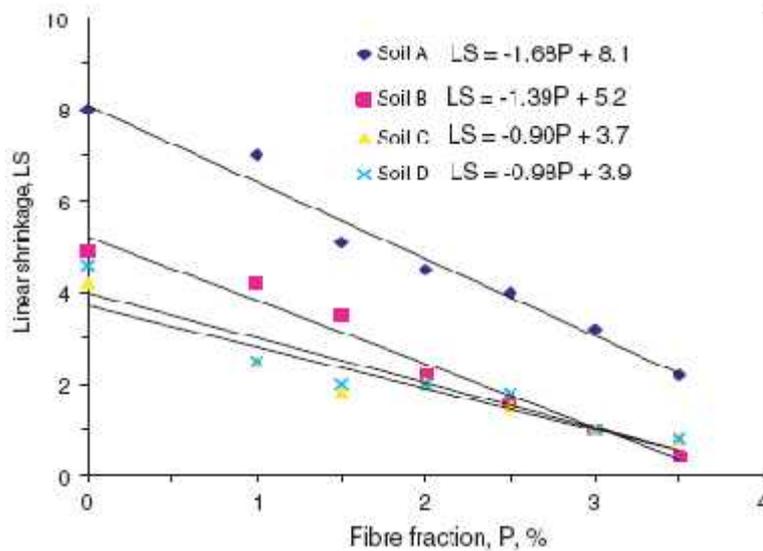


Fig. 1.54 : Variation retrait linéaire en fonction de la teneur en paille d'orge hachée (Bouhicha,2005).

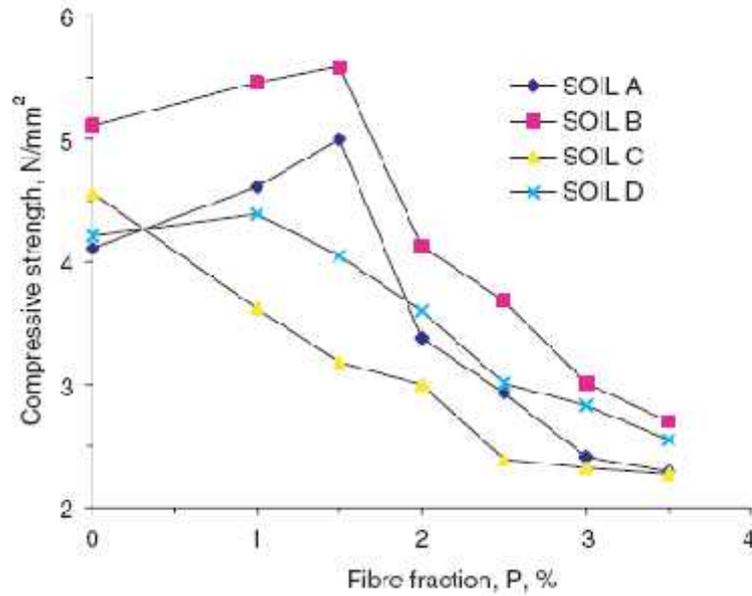


Fig. 1.55 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en paille d'orge hachée (Bouhicha,2005).

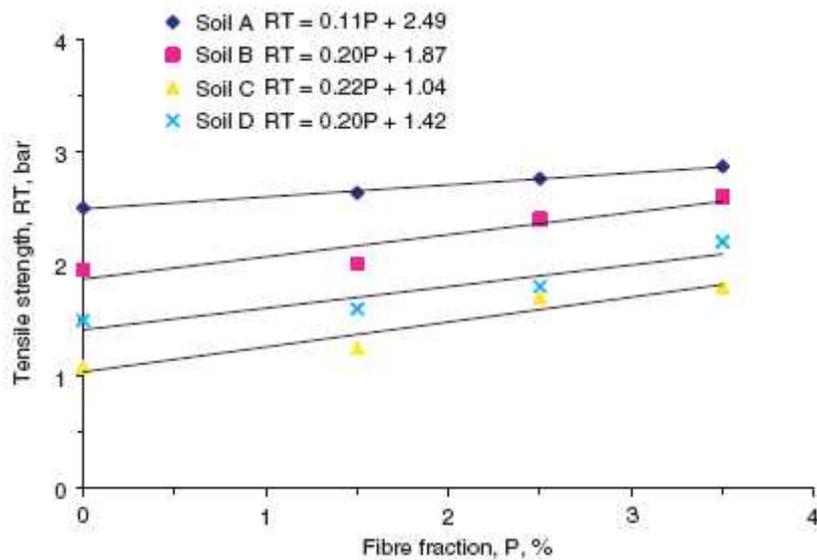


Fig. 1.56 : Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en paille d'orge hachée (Bouhicha,2005).

Il faut signaler qu'il y a des études réalisées sur les blocs de terre comprimée renforcés par des fibres synthétiques et artificielles, à titre d'exemple, l'étude menée par Eko et al. (Eko,2012). Dans cette étude, ils ont utilisé un sol latéritique stabilisé par 6% en ciment et renforcé par trois teneur en fibres : 1.7% ,2% et 2.7% et trois longueurs : 20 mm, 35 mm et 50 mm. Ils ont remarqué que la résistance à la traction augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres jusqu'à un pic, ou on observe une diminution de la résistance avec l'augmentation de la teneur en fibres (figure 1.57).

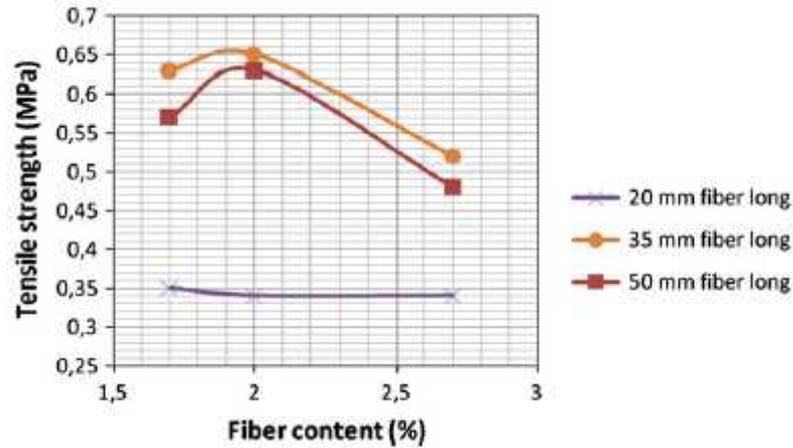


Fig. 1.57 : Effet de la teneur en fibres d'acier sur la résistance à la traction pour des blocs de terre comprimée stabilisée à 6% de ciment (Eko,2012).

Dans le cadre d'une étude d'élaboration d'un essai de traction directe sur le BTC avec des fibres naturelles, Mesbah et al. affirment que l'avantage d'utilisation des fibres naturelles comme renfort dans le bloc de terre comprimée comprennent à la fois l'amélioration de la ductilité en traction (figure 1.58) comparativement à un bloc sans renfort et l'inhibition de la propagation des fissures de traction après sa formation initiale. D'après les auteurs, il semble que les fibres n'ont pas d'effet sensible sur le comportement du matériau avant sa fissuration (Mesbah,2004).

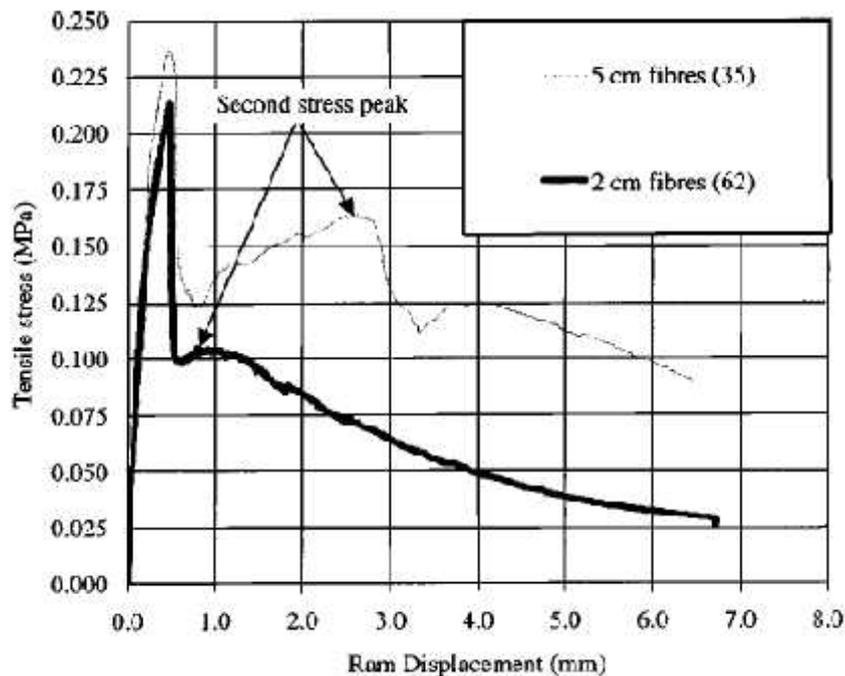


Fig. 1.58 : Le comportement à la traction du bloc de terre comprimée renforcée par des fibres naturelles (Mesbah,2004).

1.13. 2 Effet des fibres sur l'absorption d'eau

On a vu auparavant que les fibres végétales ont un caractère hydrophile qui favorise l'adsorption d'eau, alors que d'autres types de fibres ont un caractère hydrophobe comme le cas des fibres de polypropylène. Cette faible insensibilité à l'eau des fibres végétales constitue un point faible dans son utilisation pour la fabrication des produits en terre crue, chose qui a poussé les chercheurs à essayer d'étudier ce problème et d'évaluer son ampleur.

Sallehan et Yaacob (Sallehan, 2011) ont conclu à travers les résultats des essais d'absorption d'eau réalisés dans l'étude citée dans le paragraphe précédent, qu'il y a une légère augmentation de l'absorption de l'eau avec l'augmentation de la teneur en fibres de palmier.

Ravishankar et Raghavan ont confirmé que pour les sols latéritiques stabilisés par la fibre de coco, le taux d'absorption de l'eau augmente avec l'augmentation de la teneur en fibre de coco (Ravishankar, 2004).

1.13. 3 Effet des fibres sur les propriétés thermiques

Vu que l'étude des propriétés thermiques des BTC fibrées ne présente pas notre centre d'intérêt dans cette thèse, on va limiter notre recherche bibliographique sur la conductivité thermique.

Khedari et al. ont constaté que la conductivité thermique des briques à base d'argile latéritique comprimée stabilisée par des fibres de coco diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres, et cette diminution a atteint un taux important qui est de l'ordre de 50 % (figure 1.59) (Khedari,2005).

Millogo et al. ont constaté aussi, dans le cadre de l'étude présentée auparavant, que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation des teneurs et des longueurs des fibres d'hibiscus cannabinus (figure 1.60) (Millogo,2014) .

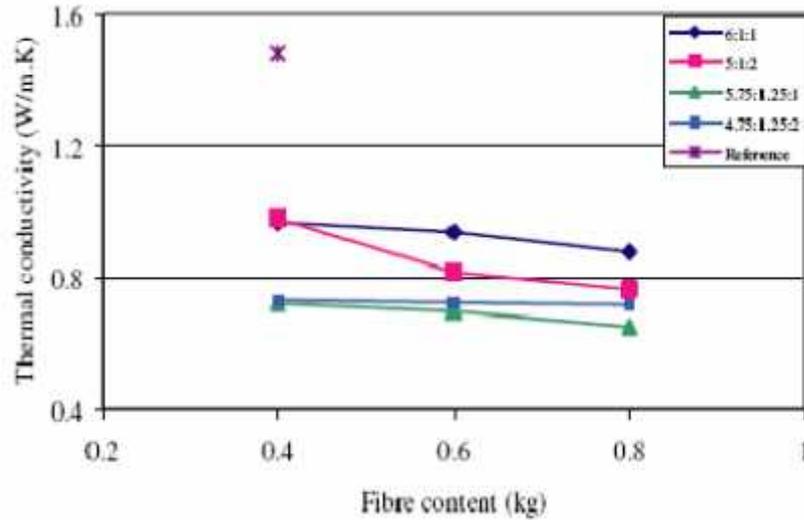


Fig. 1.59 : L'influence de la teneur en fibres de coco sur la conductivité thermique (Khedari,2005).

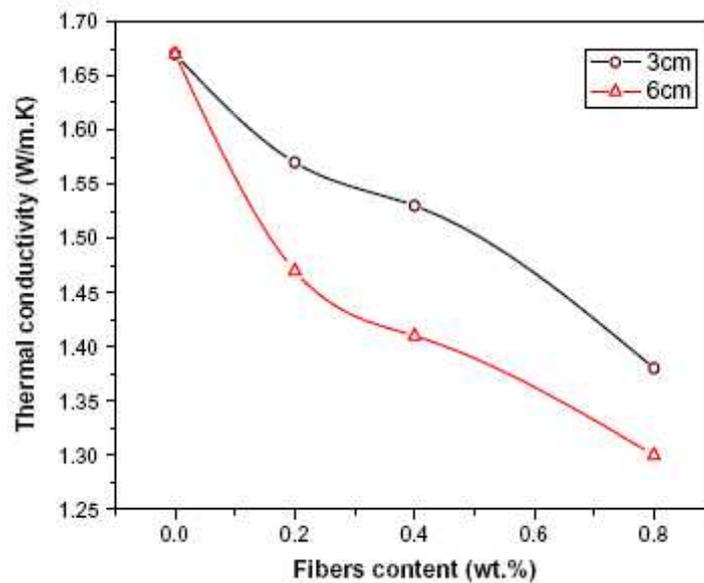


Fig. 1.60: L'influence de la teneur et la longueur des fibres d'hibiscus cannabinus sur la conductivité thermique du bloc de terre comprimée (Millogo,2014).

1.14 Effet du traitement des fibres végétales sur les propriétés des composites

Plusieurs études ont montré que les propriétés des composites dépendent de la liaison interfaciale des fibres naturelles avec les matrices. En d'autres termes, l'adhérence entre les fibres de renforcement et la matrice joue un rôle important dans les propriétés mécaniques finales des matériaux, ce qui assure une meilleure transmission des efforts de la matrice vers les fibres. Cette action rend la présence des fibres plus bénéfique et contribue à l'amélioration des propriétés

mécaniques des composites (Haque ,2009). En général, une faible adhérence fibres /matrice conduit une augmentation de la porosité et de l'absorption d'eau et réduit les valeurs des propriétés mécaniques du composite au fil du temps. Par conséquent, le traitement de la surface des fibres naturelles est actuellement un des sujets qui a fait l'objet d'un nombre important de recherches, en vue d'améliorer la compatibilité et l'adhérence fibres /matrice. Pour les méthodes de traitement, on peut citer les méthodes physiques : traitements thermiques, corona, plasma, et des méthodes chimiques : imprégnation, greffage, couplage (Alsaeed, 2013).

On s'intéresse dans cette thèse au traitement chimique à travers le traitement alcalin (traitement par imprégnation).

Les fibres sont traitées avec une solution de NaOH durant un temps et température bien définies. Elles sont ensuite lavées avec de l'eau distillée pour éliminer l'excès de NaOH, et finalement elles sont séchées à l'air. Ce traitement améliore les caractéristiques adhésives de la surface des fibres en éliminant les impuretés naturelles et artificielles (Hamada, 1994).

Taha et al. (Taha,2007) ont traité les fibres de palmier dattier dans une solution de soude (2% à 5%) à 23°C pendant 2, 4, 6 et 24h pour l'incorporation dans des composites à base de polymères. Cette modification a permis un lavage des impuretés de surface des fibres et d'une partie des hémicelluloses qui influe sur les propriétés d'absorption notamment celle de l'humidité. En effet, la réduction des hémicelluloses dans ces fibres réduit la capacité d'absorption d'eau dans la fibre (Taha,2007).

Joshy et al. (Joshy,2007) ont traité les fibres d'Isora par 1% d'une solution alcaline à 30°C pendant 4h pour les utiliser comme renfort dans une matrice polyester. Les propriétés mécaniques des composites formés sont meilleures avec les fibres traitées qu'avec les fibres employées à l'état brut. Le traitement alcalin des fibres d'Isora donne naissance à un matériau composite avec des modules E' et E'' élevés. De plus, le taux en fibres traitées dans le composite peut atteindre 66% en volume pour seulement 45 % dans le cas des fibres non traitées (Joshy,2007).

Alsaeed et al. (Alsaeed, 2013) ont traité les fibres de palmier dattier dans une solution de soude avec trois concentrations (3%, 6% et 9%) à la température ambiante du laboratoire pendant 24h. Les auteurs ont étudié l'effet du traitement alcalin sur l'adhérence de la fibre de palmier dattier avec la matrice d'époxy. Les résultats de travail ont révélé que la faible concentration de la solution de NaOH a présenté moins d'influence sur la résistance à la traction de la fibre et moins d'influence sur la surface d'adhérence fibre/matrice. D'autre part,

la concentration la plus élevée (9%) a affaibli la fibre et a causé son endommagement. Alors que 6% de concentration en NaOH est la concentration optimale dans laquelle il y avait moins d'effet négatif sur la résistance de la fibre et une grande amélioration de l'adhérence entre la fibre et la matrice polymère (Alsaeed, 2013).

Les résultats de l'étude de Alsaeed et al. (Alsaeed, 2013) seront exploités dans l'étude expérimentale menée dans le cadre de la préparation de cette thèse, en remplaçant la matrice de polymère par une matrice de terre comprimée stabilisée au ciment ou à la chaux.

1.15 Durabilité des fibres végétales en milieu alcalin

Les liants cimentaires ou les chaux ont la propriété une fois mélangés à l'eau de créer un pH interstitiel fortement basique (13,5 pour le ciment Portland, 12,5 pour la chaux aérienne).

Le premier mécanisme expliquant la perte de ductilité des composites fibrés par des fibres végétales est la dégradation de ces fibres dans le milieu alcalin de la matrice. Afin d'étudier ce phénomène, plusieurs chercheurs ont étudié les propriétés des fibres végétales immergées dans différentes solutions alcalines.

Filho et al. (Filho, 2000) ont comparé l'effet de l'immersion de fibres de sisal et de coir dans de l'eau à pH 8.3, du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à pH 12 et du NaOH à pH 11 afin de distinguer l'effet du pH et la présence des ions calcium sur la durabilité des fibres végétales. Les résultats obtenus ont montré que:

- après 210 jours d'immersion dans la solution d'hydroxyde de calcium, la résistance en traction résiduelle des fibres de sisal et de coco représente respectivement 33.7 et 58.7% de leur résistance initiale ;
- après immersion dans la solution de soude, les résistances résiduelles sont nettement plus élevées, à savoir 72.7 et 60.9 % de la résistance initiale après 420 jours d'immersion.

Cette différence est attribuée par l'auteur à la cristallisation de chaux dans les pores des fibres immergées dans la solution d'hydroxyde de calcium ce qui affecte leur résistance en traction.

Cette hypothèse avait déjà été faite par Gram (Gram, 1983) qui relève une action spécifique des ions calcium par rapport à l'immersion de fibres dans des solutions d'hydroxyde de sodium ou de potassium.

Des expériences comparables ont été menées par Kriker et al. (Kriker, 2008) sur des fibres de palmier dattier. Les résistances résiduelles après 6 mois d'immersion sont légèrement plus élevées pour la solution de NaOH que pour celle de Ca(OH)_2 . De plus, l'auteur identifie, par observation des fibres au microscope électronique à balayage, deux modes d'action distincts de dégradation. Tandis que l'attaque par le Ca(OH)_2 semble diffuse et relativement uniforme (la fibre est recouverte entièrement d'un dépôt de Ca(OH)_2 , qui pénètre dans tous les pores de la fibre), l'attaque par NaOH est localisée (des trous apparaissent à la surface des fibres, et des dépôts sont visibles localement).

La perte de résistance dépend certes de la solution agressive mais également des propriétés intrinsèques des fibres. Ainsi, Kriker et al. mettent en évidence le fait que plus le diamètre de la fibre est faible, plus la chute de résistance est intense.

Ramakrishna et al. (Ramakrishna, 2005) comparent les effets de l'immersion ou de la soumission à des cycles humidification/séchage dans de l'eau, du Ca(OH)_2 ou du NaOH sur les propriétés de fibres de coir, de sisal, de jute et d'hibiscus cannabinus. Les résultats obtenus sont relativement différents en fonction de la nature des fibres, et montrent que:

- le mode de dégradation le plus agressif semble être les cycles d'humidification/séchage avec la solution d'hydroxyde de calcium, pour laquelle, à l'issue de 30 cycles, les fibres de sisal, de jute et d'hibiscus cannabinus sont totalement détruites. Pourtant, avec ce même mode d'attaque, les fibres de coir conservent entre 20 à 40% de leur résistance originale. L'auteur a fait l'hypothèse que cette différence provient des différences de porosité entre les fibres, il a constaté que celles du sisal, de la jute et de l'hibiscus cannabinus, sont plus importante que celle du coir, ce qui a permis la cristallisation de produits issus de la solution alcaline dans leur pores, ce qui a entraîné leur fragilisation ;
- le résultat de l'immersion dans l'eau dépend également du type de fibres. Les fibres de coir et de sisal conservent respectivement 50 à 60% et 60 à 70% de leur résistance initiale, tandis que les fibres de jute et d'hibiscus cannabinus ne conservent au maximum que 20% de leur performance initiale. L'auteur attribue la perte de résistance par immersion dans l'eau pure à une action microbiologique ;
- enfin, l'auteur met en évidence une chute substantielle de la teneur en cellulose (de 20 à 85%) et de l'hémicellulose (de 30 à 70%) des différentes fibres soumises aux différents traitements.

La dégradation des fibres en milieu alcalin serait donc due à la dissolution partielle ou totale de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine qui les composent.

Gram (Gram, 1988), à travers une étude qu'il a menée, a conclu que la première cause de dégradation des fibres de sisal est la décomposition chimique de la lignine et de l'hémicellulose de la lamelle mitoyenne. Dans un milieu alcalin, la liaison entre les fibres individuelles est brisée comme l'illustre la figure 1.61. Gram relève également que le lumen, vide central des fibres de sisal, est rempli d'hydroxyde de calcium et perd ainsi sa flexibilité.

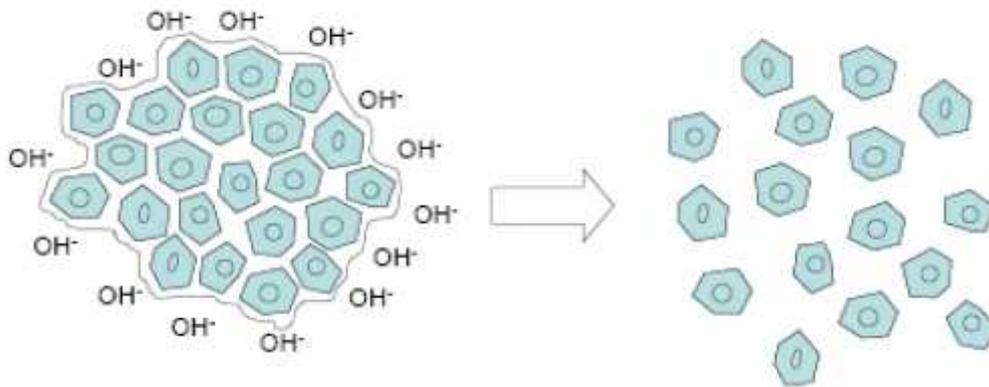


Fig. 1.61 : Représentation schématique de la décomposition des fibres de sisal en milieu alcalin (Gram, 1988).

Le phénomène de fragilisation des fibres végétales en milieu basique n'explique pas à lui seul les pertes de performances au cours du temps des composites renforcés par ces fibres. Ainsi, plusieurs auteurs attribuent la perte de ductilité au cours du temps à la modification de la zone de transition existant autour des fibres. Cette zone qui est large de 50 à 100 micromètres environ (Filho, 2000), est plus poreuse et plus fissurée que le reste de la matrice. Filho et al. associent la rupture ductile du composite aux faibles performances mécaniques de cette zone qui peut aisément rompre ou se fissurer (Filho, 2000).

D'après Savastano et al. (Savastano, 1999), au cours du temps et/ou après avoir subi plusieurs cycles de vieillissement, cette zone se densifie et les fibres subissent un phénomène de minéralisation par pénétration des produits d'hydratation dans leurs pores ou leur lumen. Cette zone se rigidifie, les fibres perdent leur flexibilité et leur capacité de déformation, ce qui expliquerait la perte de ductilité du composite d'une part et l'amélioration de la résistance à la première fissure d'autre part.

1.16 Méthodes d'amélioration de la durabilité des composites renforcés par des fibres végétales

Différents travaux ont été réalisés afin de pallier à la dégradation des composites à base de fibres végétales. On peut distinguer deux familles de solutions, soit par modification des propriétés des fibres (par imprégnation avec des agents bloquants ou traitants), soit en diminuant l'agressivité de la matrice envers les fibres.

a. Traitement des fibres

Plusieurs travaux ont montré l'amélioration des propriétés mécaniques des fibres de cellulose après alcalisation avec différentes concentrations de NaOH (Knill, 2003 ; Valadez, 1999 ; Zhang, 2005, OUA 05]. Mwaikambo et Ansell ont traité du chanvre, du jute et des fibres de kapok avec plusieurs concentrations de NaOH et ont montré que la concentration optimale en masse correspondait à 6 % (Mwaikambo, 2002). A ce taux, la plupart des composants non celluloses sont dégradés, la cellulose reste sous forme cristalline et l'adhésion fibre/matrice est améliorée. Okano et al. estiment quant à eux que cette transformation s'effectue au dessus de 6 % en masse (Okano, 1984). Le traitement à la soude à 6 % en masse permet ainsi d'enlever partiellement les matériaux amorphes présents à la surface de la fibre (cires, graisses..), ce qui modifie la composition chimique et la morphologie de la fibre et entraîne une augmentation de la rugosité ainsi que l'exposition de microfibrilles de cellulose (Valadez, 1999).

Mais Gram (Gram, 1988) relève l'échec des méthodes d'imprégnation par des substances supposées réagir avec les fibres pour former des composés insensibles à l'attaque alcaline (silicates de sodium, sulfites de sodium et sulfates de magnésium notamment).

En revanche, les méthodes d'imprégnation par des agents hydrophobants comme des résines époxy et polyester, des produits bitumineux, de l'huile de lin ou de noix de cajou, ou encore des stéarates de calcium ou de l'acide stérique, permettent, dans certains cas, de ralentir ou de retarder la fragilisation des fibres mais jamais de l'inhiber totalement. Cependant, Gram souligne que ces méthodes d'imprégnation ont tendance à réduire la liaison fibre/matrice et donc à diminuer les performances à court terme.

Des agents protecteurs de ce type ont également été testés par Juarez et al. (Juarez ,2005) pour diminuer la sensibilité des fibres d'agave à l'environnement alcalin. Les agents traitants envisagées sont des substances organiques hydrophobes sans danger pour le

composite, non toxiques, économiques et faciles à tester : l'huile de lin, la paraffine, le mélange huile de lin/colophane, et le mélange paraffine/colophane.

Juarez et al. (Juarez ,2005) ont constaté que la paraffine se révèle la plus efficace pour diminuer l'absorption d'eau des fibres (-37% par rapport aux fibres non traitées) et leur perte de résistance (maintien de 53% de la résistance initiale contre environ 31% pour les autres traitements). Il en est de même pour la ductilité puisque l'allongement à la rupture des fibres traitées par de la paraffine représente 47% de la valeur initiale tandis que celui des fibres traitées par les autres substances ne conserve qu'entre 17 et 27% de cette valeur.

Filho et al. (Filho, 2000) proposent un autre type de traitement par immersion des fibres dans une boue de fumée de silice avant leur incorporation dans la matrice. Ainsi, les vides inter et intra fibres sont comblés par des particules de microsilice, ce qui permet de créer postérieurement une zone de bas pH autour des fibres au sein de la pâte. Ceci permet d'éliminer ou du moins de limiter l'attaque alcaline et la croissance de produits d'hydratation à l'intérieur des fibres (maintien de 85 à 94% de la ténacité du témoin après 322 jours d'immersion et de vieillissement en extérieur). Les auteurs, en concordance avec Gram (Gram, 1988), ont constaté une diminution des propriétés du composite à 28 jours de 30 à 40% du fait d'une plus faible liaison au niveau de l'interface fibres/matrice.

b. Modification de la matrice

La deuxième option envisagée par les chercheurs pour améliorer le comportement à long terme des composites renforcés par des fibres végétales consiste à transformer la matrice afin de réduire son agressivité envers les fibres.

Comme nous l'avons vu précédemment, cette agressivité est en partie liée au pH fortement basique du milieu interstitiel et à la présence d'hydroxyde de calcium amené à diffuser vers les fibres et à y reprecipiter en causant leur minéralisation.

Différents auteurs ont donc choisi de substituer une partie de la matrice cimentaire par des pouzzolanes afin de réduire son alcalinité. On peut citer ici Soroushian et al. (Soroushian, 1994) qui ont montré également que la substitution de 30% du ciment par de la fumée de silice permet de contrôler efficacement les mécanismes de vieillissement pour des échantillons soumis à des cycles d'humidification-séchage-carbonatation. Ils ont attribué ce résultat à la réduction du pH de la matrice, à la diminution de la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et à sa plus faible perméabilité.

Ces résultats sont confirmés par Filho et al. (Filho, 2003) qui notent que la substitution de 10% du ciment par de la fumée de silice conduit au maintien des propriétés des composites soumis à différents cycles de vieillissement.

1.17 Conclusion

Le présent chapitre a mis l'accent sur l'emploi des fibres d'une manière générale et les fibres naturelles en particulier comme renfort dans le matériau terre, que ce soit comme terrain de fondation ou comme matériau de construction. Dans cette étude, l'intérêt est porté sur la stabilisation des blocs de terre comprimée (BTC) par les fibres.

A travers cette recherche bibliographique, on a remarqué que plusieurs travaux de recherches ont confirmé que l'emploi des liants minéraux (ciment et chaux) et le bitume comme stabilisants améliore la résistance mécanique et l'insensibilité à l'eau des BTC. Mais la stabilisation des BTC par des fibres et en particulier les fibres végétales n'a pas eu le consensus de tous les chercheurs. Il y a des recherches qui n'ont pas recommandé l'utilisation des fibres végétales dans la fabrication du BTC à cause de son incompatibilité avec le mode de compactage des BTC, alors que d'autres reconnaissent les fibres végétales comme une importante catégorie de stabilisants des BTC. Donc la synthèse sur les travaux antérieurs a mis en évidence les besoins d'expérimentation sur l'effet de l'introduction des fibres, et en particulier les fibres végétales, sur les propriétés mécaniques et hygroscopiques du bloc de terre comprimée. C'est dans ce cadre que l'étude a été élaborée dans cette thèse.

DEUXIÈME PARTIE
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE 2 :
MATÉRIAUX DE L'ÉTUDE
ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

2.1 Introduction

À travers la synthèse bibliographique, on a pu voir que les phénomènes physico-chimiques jouent un rôle déterminant sur le comportement mécanique des blocs de terre comprimée et sur leur durabilité. Donc une recherche sur les matériaux et les procédures en vue d'améliorer la qualité du BTC s'avère indispensable.

La nature du sol et celle des liants utilisés comme stabilisants ainsi que la nature des fibres employées et la contrainte de compactage sont des paramètres fondamentaux qui influent sur le comportement du BTC. Donc pour étudier correctement les propriétés du BTC fibré, on devra faire appel aux caractéristiques de ses constituants.

Dans ce chapitre, outre la caractérisation des matériaux, on présentera aussi l'ensemble des formulations à étudier, ainsi que les procédures des essais.

2.2 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette recherche sont: le sol, le sable concassé, le ciment, la chaux vive, les fibres de surface des palmiers dattiers mâles, la paille d'orge hachée et les fibres de polypropylène.

2.2.1 Sol

2.2.1.1 Origine du sol

Le sol utilisé provient de la région de Biskra (Algérie), il est choisi sur la base de sa disponibilité et son abondance dans la région.

2.2.1.2 Caractéristiques physiques du sol

Avant de soumettre le sol aux essais, il est écrêté à 2 mm. Houben (Houben, 1994) a indiqué que les éléments les plus fins ne doivent pas être autorisés à former des nodules de taille supérieure à 10 mm; la présence de 50% des nodules ayant une taille supérieure à 5 mm pourrait réduire de moitié la résistance à la compression.

a. Composition granulaire

La composition granulaire du sol est déterminée à travers deux essais : l'analyse granulométrique et la sédimentométrie selon les normes NF P 18-560 et NF P 94-057 successivement. Les résultats des essais sont présentés sur la figure 2.1.

On constate selon la courbe granulométrique du sol, qu'elle se situe bien dans le fuseau limite recommandé par la norme des blocs de terre comprimée XP P 13-901. Cette norme recommande pour un sol destiné à la fabrication du BTC, qu'il ne doit pas être trop argileux au risque d'entraîner des fissurations de retrait fragilisant les blocs ($\% 2\mu\text{m} < 30\%$) (figure 2.2).

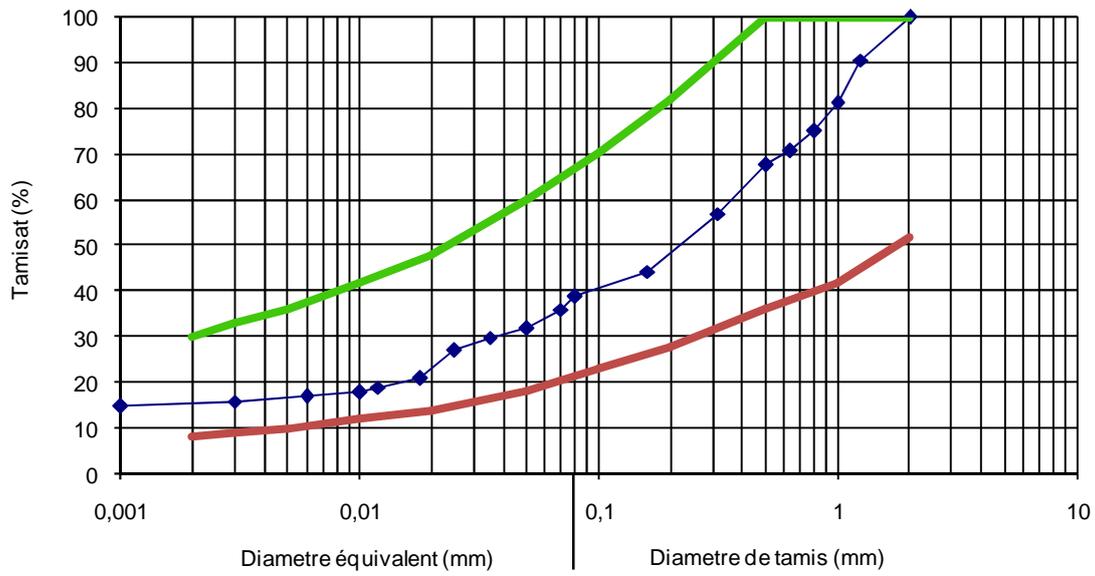


Fig. 2.1 : La courbe granulométrique du sol

b. Les masses volumiques

Le tableau 2.1 montre les masses volumiques apparente et absolue du sol étudié.

Tableau 2.1 : Les masses volumiques du sol

Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)
1210	2579

c. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg permettent d'analyser les variations de consistance des sols fins en fonction de la teneur en eau. Comme pour la granularité, des études statistiques ont été faites afin de définir les limites d'Atterberg les mieux adaptées pour les blocs de terre et de prévoir rapidement les possibilités constructives d'un sol (Doat, 1979). Les essais définis par Casagrande s'effectuent sur le mortier de sol ($d < 0,4$ mm) selon la procédure de la norme NF P 94 051. Les résultats des essais sont présentés sur le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Les limites d'Atterberg du sol

Limites d'Atterberg		
Limite de liquidité LL (%)	Limite de plasticité LP (%)	L'indice de plasticité IP (%)
36	23	13

Les résultats obtenus pour notre sol, montrent que les limites de plasticité sont presque dans les limites les mieux adaptés pour les blocs de terre comprimée (la norme XP P 13-901) (figure 2.2). La norme recommande que le sol doit présenter un minimum de plasticité assurant une cohésion entre les grains du matériau lors du compactage ($\% 2\mu\text{m} > 5\%$).

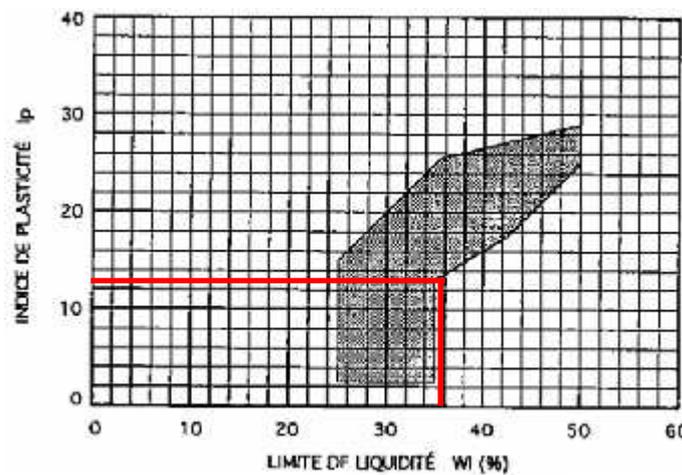


Fig. 2.2 : Diagramme de plasticité (la norme XP P 13-901)

d. Classification géotechnique

Selon la classification du "triangle des textures" de l'INRA (Doat, 1979), on peut dire qu'il s'agit d'un sol sablo-limoneux et il est en général bien adapté pour la stabilisation des sols (Tableau 2.3).

La terre doit posséder, après façonnage, une bonne cohésion naturelle, c'est-à-dire que la teneur en argile doit être suffisamment élevée : supérieure à 10 % (c'est le cas de notre sol qui a 16 % d'argile). Elle doit également contenir un squelette minéral (sable-gravier) assurant une action efficace du ciment.

Tableau 2.3 : Granularité du sol.

échantillon	Sable %	Limon %	Argile %	Nature du sol
Sol de Biskra	71	23	16	Sablo-limoneux

2.2.1.3 Analyse chimique et minéralogique

L'analyse chimique permet de déterminer la teneur en éléments nocifs tels que les sulfates. Le sulfate le plus fréquemment rencontré dans les sols naturels est le sulfate de calcium (anhydrite et gypse). On associe sa présence à des dégradations de construction en terre. Le fort gonflement lié à l'hydratation de l'anhydrite et la solubilité de différents composés sont alors mis en cause. Dans le cas des blocs de terre comprimée et stabilisée, les sulfates peuvent également attaquer le ciment durci à l'intérieur du matériau particulièrement lorsque celui-ci est mis en contact avec de l'eau. Dans ce cas, une étude spécifique pour les terres contenant plus de 2 à 3 % de sulfates doit être faite (Doat, 1979).

L'analyse minéralogique, elle aussi, est indispensable pour différencier les sols argileux.

Les analyses des compositions chimiques et minéralogiques sont effectuées au laboratoire CETIM à Boumerdès (Algérie).

L'analyse chimique élémentaire effectuée par fluorescence X sur ce sol, a révélé la composition chimique qui figure sur le tableau 2.4:

Tableau 2.4 : La composition chimique du sol

Composition chimique (%)										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Perte au feu	TiO ₂
33.33	2.99	1.39	26.45	0.88	14.21	0.5	0.13	0.06	19.85	0.21

L'analyse par diffraction de rayons X a permis de déterminer la composition minéralogique présentée sur le tableau 2.5.

Tableau 2.5 : La composition minéralogique du sol

Minéraux	Quartz	Gypse	Calcite	Muscovite	feldspath k	Kaolinite	Minéraux ferrugineux + fond RX
Teneurs (%)	29.5	30.5	29.5	-	3	6.5	1

A travers l'analyse chimique du sol, on voit bien que le sol contient un taux important de trioxyde de soufre (anhydride sulfurique) SO₃ (14.21 %) dépassant 3%, qui est la limite justifiant une étude spécifique d'après Doat et al. (Doat, 1979).

L'analyse minéralogique a révélé la présence d'un taux élevé de gypse (30.5 %) ce qui explique le taux élevé de trioxyde de soufre contenu dans le sol. Le sol contient aussi des taux considérables en quartz et en calcite, alors que la teneur en Kaolinite est peu importante.

2.2.1.4 Matière organique

Les sols peuvent contenir des matières organiques (micro-organisme, humus,...), certains acides humiques sont néfastes en cas de stabilisation, car ils retardent ou annulent la prise des liants hydrauliques. La constitution des matières organiques n'étant pas compressible, elles sont à éviter en trop forte quantité car cela réduirait notablement la compressibilité du sol, même non stabilisé (CDE, 2000).

En règle générale, tant que des connaissances plus sûres n'auront pas été acquises, il a été admis de ne pas utiliser de terre contenant plus que 2 % de matières organiques et considéré comme risquée l'utilisation d'une terre contenant 1 % de matières organiques (Doat, 1979). Un autre seuil est proposé par Vénuat (Vénuat, 1980) : « fixant faute de mieux à 2 % la limite à ne pas dépasser pour le traitement d'un sol ». Cette limite correspond à une teneur en matières organiques totale. Kujala (Kujala, 1996) propose un seuil en humus de l'ordre de 2 % pour des retards de prise et de 3,5 % pour une inhibition. Tremblay (Tremblay, 1998) indique comme limite de stabilisation une teneur de 3 % en matières organiques.

L'analyse de notre sol a révélé la présence d'un taux de 1.91 % en matières organiques, ce taux ne dépasse pas 2 %, qui représente la limite recommandée par Doat (Doat, 1979) et Vénuat (Vénuat, 1980).

2.2.1.5 Analyse physico-chimique

a. Mesure de pH

Cette mesure a été déterminée à l'aide d'un pH-mètre sur une suspension de 10 grammes de matériau sec dans 100 millilitres d'eau déminéralisée. La mesure du pH peut fournir de précieux renseignements sur la prédominance de matières organiques évoluées ou carbonates. L'analyse de notre sol a montré que son pH est de 8.3. D'après Vilenkina (Vilenkina, 1956 ; cité par Guettala, 2003) pour qu'un sol soit convenable à la stabilisation, il doit avoir un pH supérieur à 6. Si le pH est inférieur à 6 un pré-traitement du sol est indispensable.

En général, les sols dont le pH est grand auront de meilleures résistances, c'est le cas de notre sol.

b. Essai au bleu de méthylène dit essai à la tache (ANF P 18-592)

L'essai au bleu de méthylène permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction argileuse d'un sol en mesurant la surface interne et externe des grains argileux.

Pour ce faire, on fixe sur les grains d'argile des molécules de bleu de méthylène et par test simple, on évalue la quantité de bleu fixé. On en déduit la valeur au bleu du sol, ou V_{BS} , qui est un indicateur essentiel dans la classification des sols concernés par les travaux de terrassement.

Les résultats de l'essai de bleu de méthylène sont résumés dans le tableau 2.6.

Tableau 2.6 : Valeur du bleu de méthylène

Echantillon	Valeur du Bleu V_{BS}	Classification du sol
Sol de Biskra	1.36	Sablo-limoneux

2.2.2 Sable concassé

Le sable utilisé dans tous les mélanges des blocs est un sable concassé (0/3) provenant des carrières de la région de Biskra (Algérie). Il a été utilisé essentiellement pour la correction granulaire du sol. Les caractéristiques physiques du sable déterminées selon les normes AFNOR, sont présentées sur le tableau 2.7. La composition granulaire du sable est représentée sur la figure 2.3.

Tableau 2.7 : Les caractéristiques physiques du sable concassé

MV_{app} (kg/m^3)	MV_{abs} (kg/m^3)	Distribution de la taille des grains (%)			M_f	ES (%)	
		0.01-0.08 mm	0.08-1.25 mm	1.25-5 mm		visuel	au piston
1445	2600	3.25	52.83	43.92	3.08	66.2	62.5

MV_{app} : Masse volumique apparente ;

MV_{abs} : Masse volumique absolue ;

M_f : Module de finesse ;

ES : Equivalent de sable

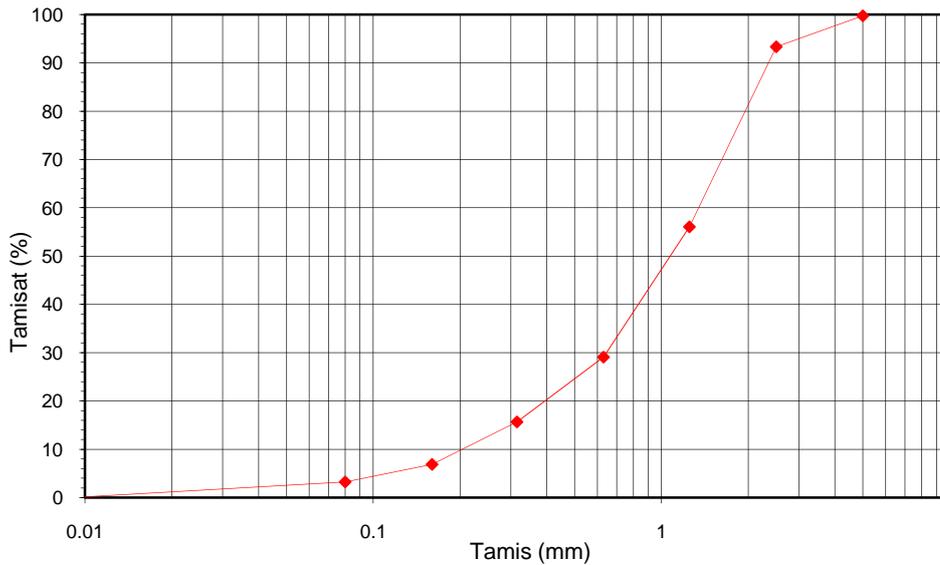


Fig. 2.3 : La courbe granulométrique du sable concassé

2.2.3 Ciment

Vu l'importante teneur en sulfates que contient le sol étudié, et pour avoir une bonne durabilité des blocs, on a utilisé le ciment CPA-CEM I 42.5 ES (ciment résistant aux sulfates CRS), qui est composé de 95 % de clinker et 5 % de gypse. L'analyse chimique du clinker montre qu'il est conforme à la norme NFP 15-301. La composition chimique et minéralogique du clinker est présentée sur les tableaux 2.8 et 2.9. La composition minéralogique potentielle du clinker est calculée selon la formule empirique de Bogue (Bogue, 1955).

Tableau 2.8 : La composition chimique du clinker (%).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl	K ₂ O	Na ₂ O	Chaux libre	Perte au feu	Résidu insoluble
22.17	4.53	5.04	64.55	1.02	1.34	0.00	0.42	0.21	1.09	0.94	0.80

Tableau 2.9 : La composition minéralogique du clinker (%).

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
51.20	21.16	3.10	12.42

Les valeurs des masses volumiques (apparente et absolue) du ciment utilisé sont présentées dans le tableau 2.10:

Tableau 2.10 : Les masses volumiques du ciment utilisé.

Désignation du ciment	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Masse volumique absolue (g/cm ³)
CPA-CEM I 42.5 ES	1.144	3.232

2.2.4 La chaux

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

Dans cette étude on a utilisé la chaux vive produite par l'unité de chaux de Saida (Algérie). La composition chimique de la chaux vive, selon la fiche technique élaborée par l'unité de production, est présentée dans le tableau 2.11.

Tableau 2.11 : La composition chimique de la chaux vive
(selon la fiche technique élaborée par l'unité de production de chaux de Saida , Algérie)

Oxides	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Teneurs (%)	1.35	82.77	10.63	1.83	3.27	0.11	0.151	0.064

2.2.5 L'eau

L'eau utilisée dans les mélanges est une eau qui contient peu de sulfate et ayant une température de 20 ± 1 ° C. Sa qualité est conforme aux exigences de la norme NFP 18-404.

2.2.6 Fibres

2.2.6.1 Fibres de palmier dattier

Dans cette étude, on a utilisé des fibres de surface de palmier dattier mâle (lif) (FSPDM), qui sont maillées naturellement. Elles sont dégagées du tronc du palmier sous forme d'une toile presque rectangulaire (300 à 500 mm de longueur et 200 à 300 mm de largeur), qui est composée de trois couches superposées (figure 2.4). Il est facile de les séparer en fibres individuelles d'un diamètre de 0,1 à 0.8 mm dans l'eau (figure 2.5). Ces fibres sont finalement découpées en morceaux de longueurs entre 20 et 35 mm (figure 2.6).



Fig. 2.4 : Le lif après son arrachement du palmier dattier.



Fig. 2.5 : Les fibres résultant de la décomposition du lif



Fig. 2.6 : Les fibres découpées en morceaux

L'analyse par spectrochimie de la poudre des fibres après calcination à 400 °C, réalisée par Kriker (Kriker, 2005) au laboratoire « INSA Lyon, France », a donnée les résultats présentés sur le tableau 2.12. Les caractéristiques physiques et mécaniques des fibres sont données sur les tableaux 2.13 et 2.14. Le tableau 2.16 montre les valeurs supérieures, inférieures et moyennes des propriétés physiques de FSPDM, tandis que le tableau 2.14 donne les valeurs des propriétés mécaniques de FSPDM (Kriker, 2005). Il faut signaler que les fibres sont utilisées à leur état brut, donc aucun traitement préalable n'est appliqué.

Tableau 2.12: Analyse chimique de la poudre des fibres calcinées à 400 °C (Kriker, 2005).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Ti ₂ O	P ₂ O ₅	Perte au feu
48,04	6,12	2,51	0,05	4,88	14,21	1,81	2,80	0,42	0,45	18,04

Tableau 2.13 : Les propriétés physiques des fibres FSPDM (Kriker, 2005).

Propriété	Supérieure - Inférieure	Moyenne
Diamètre (mm)	0.1-0.8	0.45
Masse volumique apparente (kg/m ³)	512-1089	900
Masse volumique absolue (kg/m ³)	1300 - 1450	1383
Teneur en eau naturelle (%)	9.5-10.5	10
Absorption d'eau après 5 mn sous l'eau (%)	60 – 84	74
Absorption d'eau de saturation (%)	97 – 203	132.5

Tableau 2.14: Les propriétés mécaniques des fibres FSPDM (Kriker, 2005).

Type de fibres	Longueur des échantillons (mm)	Résistance à la traction (MPa)	Allongement (%)	Module d'élasticité (GPa)
FSPDM (sèches)	100	170±40	16±3	4.74±2
	60	240±30	12±2	5.00±2
	20	290±20	11±2	5.25±3

2.2.6.2 La paille d'orge hachée

La paille d'orge est abondante dans la région de Biskra. La longueur initiale de la paille variait entre 5 et 60 cm. On compte 5 à 6 nœuds sur la plante à maturité. Les entre-nœuds, qui représentent environ 50% de la masse de la paille, lui donnent sa résistance mécanique alors que les nœuds et les feuilles qui contiennent plus de minéraux et moins de cellulose que les entre-nœuds ont une tenue mécanique moins bonne (Montane, 1998).

La paille est conservée au laboratoire (figure 2.7), dans les mêmes conditions de conservation du sol. Les caractéristiques physiques de la paille sont présentées sur le tableau 2.15.



Fig. 2.7 : La paille d'orge hachée

Tableau 2.15 : Caractéristiques physiques de la paille d'orge hachée.

Caractéristiques	Unité	Valeurs
Masse volumique apparente	Kg/m ³	215
Absorption d'eau	%	422
Diamètre	mm	1-4
Longueur	mm	10-40

2.2.6.3 Les fibres de polypropylène

Les fibres utilisées sont des fibres de polypropylène (figure 2.8) commercialisées par la société algérienne « GRANITEX ». Les caractéristiques générales des fibres sont données sur le tableau 2.16.

Tableau 2.16 : Les caractéristiques générales des fibres de polypropylène (d'après la fiche technique de GANITEX).

Longueur de la fibre (mm)	24
Densité	0.9
Point de fusion (°C)	150
Allongement à la rupture (%)	50
Section de la fibre (microns ²)	30



Fig. 2.8 : Les fibres de polypropylène.

2.3 Confection des blocs

2.3.1 Matériel spécifique

Pour la confection des éprouvettes nécessaires au programme d'essai, on a conçu un moule selon le modèle de Guettala et al. (Guettala, 2006). Il est en acier trempé, et il est composé de 5 éléments formant après montage un volume de $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$. Le moule est muni d'un piston pour assurer la transmission de la contrainte de compactage de la presse au mélange.

Le schéma du moule dans la presse est présenté sur la figure 2.9.

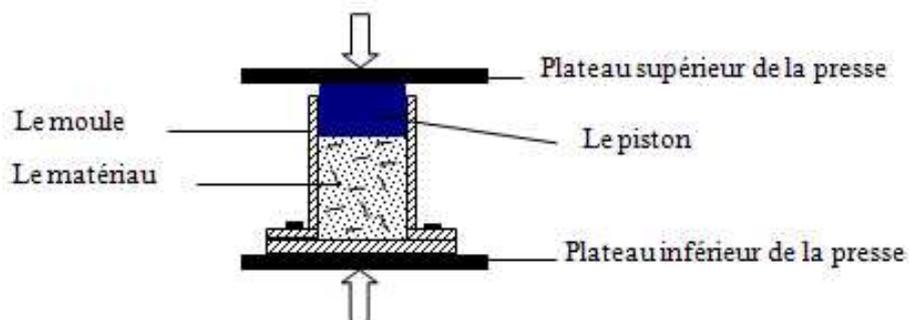


Fig. 2.9: Le schéma du moule utilisé pour la fabrication des BTC

2.3.2 Mélanges

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

compactage n'est pas la même que celle d'un compactage statique utilisé pour la fabrication du BTC. Ceci nous a poussé à utiliser la presse directement, en appliquant le compactage statique selon la méthode proposée par le Centre pour le développement de l'entreprise (CDE) (CDE, 2000).

Pour la préparation des mélanges, on s'est basé aussi sur l'étude réalisée par Guettala et al. (Guettala, 1997), qui a montré que la concentration du sable dans les BTC a peu d'influence sur la résistance mécanique, mais des dosages entre 25 % et 40 % ont données les meilleurs résultats. Par suite, on a introduit 30 % de sable concassé dans tous les mélanges utilisés dans cette étude.

Le poids du mélange global sec pour chaque bloc est maintenu constant durant toutes les étapes de cette étude, il est pris égale à 2 Kg.

La composition des mélanges employés dans cette étude est présentée sur la figure 2.10 et le tableau 2.17.

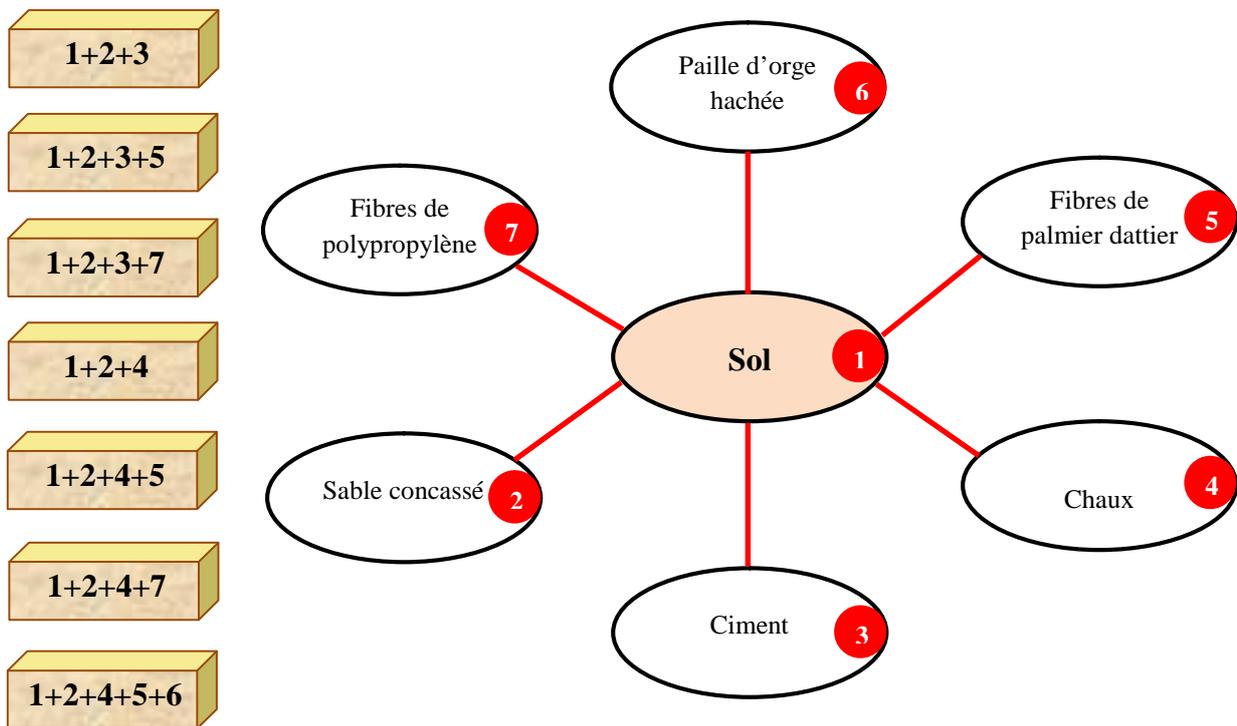


Fig. 2.10 : Combinaison des mélanges des blocs

Tableau 2.17 : Composition des différents mélanges employés dans cette étude.

Numéro du mélange	Sol (%)	Sable concassé (%)	Fibres (%)			Ciment (%)	Chaux (%)
			Fibres de palmier dattier	Paille d'orge hachée	Fibre de polypropylène		
			par rapport au mélange sec (sol-sable)				
1	70	30	0	0	0	5	0
2			0.05				
3			0.1				
4			0.15				
5			0.2				
6	70	30	0	0	0	6.5	0
7			0.05				
8			0.1				
9			0.15				
10			0.2				
11	70	30	0	0	0	8	0
12			0.05				
13			0.1				
14			0.15				
15			0.2				
16	70	30	0	0	0	0	8
17			0.05				
18			0.1				
19			0.15				
20			0.2				
21	70	30	0	0	0	0	10
22			0.05				
23			0.1				
24			0.15				
25			0.2				
26	70	30	0	0	0	0	12
27			0.05				
28			0.1				
29			0.15				
30			0.2				
31	70	30	0	0	0.05	8	0
32					0.1		
33					0.15		
34					0.2		
35	70	30	0	0	0.1	0	10
36			0.05	0.05	0	0	10
37			0	0.1			

2.3.3 Codification des mélanges

Les mélanges utilisés lors de cette étude sont codifiés dans cette thèse afin de faciliter la lecture. Le système de codification retenu est composé d'un groupe de lettres majuscules, à titre d'exemple, BCSF désigne un bloc de terre comprimée à base de ciment sans fibres. La codification de l'ensemble des mélanges étudiés est présentée sur le tableau 2.18.

Tableau 2.18 : Codification des mélanges.

Code	Désignation
BCSF	Bloc de terre comprimée à base de ciment sans fibres
BXSF	Bloc de terre comprimée à base de chaux sans fibres
BCPD	Bloc de terre comprimée à base de ciment avec fibres de palmier dattier
BXPD	Bloc de terre comprimée à base de chaux avec fibres de palmier dattier
BCPP	Bloc de terre comprimée à base de ciment avec fibres de polypropylène
BXPP	Bloc de terre comprimée à base de chaux avec fibres de polypropylène
BXPO	Bloc de terre comprimée à base de chaux avec paille d'orge hachée
BXPDPO	Bloc de terre comprimée à base de chaux avec fibres de palmier dattier et paille d'orge hachée

2.3.4 Préparation des mélanges

D'après Michel (Michel, 1976), les meilleures conditions de malaxage sont réunies lorsqu'on dispose d'un sol sec. Cela nécessite un séchage préalable du sol. Alors, après avoir séché le sol et le sable dans l'étuve pendant 24 h à 65 °C, les matériaux (sol + sable + liant) sont d'abord mélangés à sec puis malaxés avec l'eau dans un malaxeur à ciment de 5 litres avec une vitesse de 139 tr/min. L'homogénéisation des mélanges à sec est effectuée pendant trois minutes pour le mélange de ciment et cinq minutes pour celui de la chaux. Le malaxage avec l'eau a été effectué pendant deux minutes. Finalement on procède à l'ajout des fibres en faisant le malaxage manuellement. Le matériau est mis en place et compacté juste après le malaxage.

2.3.5 Optimisation de la teneur en eau

La teneur en eau a une action primordiale sur le comportement des matériaux. Pour tous les matériaux testés, naturels ou reconstitués, surtout lorsqu'ils sont fins, une variation de 2 à 3 points autour de l'optimum de compactage statique entraîne toujours une chute de la résistance à sec de 30 à 50 % (Guettala, 1997).

Pour obtenir une fabrication homogène, il est donc indispensable de déterminer cette teneur en eau optimale pour chaque composition.

Les blocs sont fabriqués à l'aide d'une presse hydraulique à force imposée selon la procédure du Centre pour le développement de l'entreprise CDE (CDE, 2000).

Voici les étapes de la procédure :

- prendre une quantité de matériau humide avec un taux de liant donné (ciment ou chaux) à une teneur en eau de environ $W = 6$ à 9 % ;
- fabriquer trois blocs à l'aide de la presse ;
- mesurer la masse à l'état humide (m_h en g) et les dimensions de chaque bloc (longueur L , largeur l et épaisseur h en cm);
- calculer la masse volumique sèche de chaque bloc :

$$MVS = 100 \times m_h / (L \times l \times h \times (100 + W)) ;$$
- préparer des quantités de matériaux de teneurs en eau d'environ 1 à 2 % de plus que la précédente et répéter les opérations, jusqu'à obtenir des blocs trop humide (visuellement) au démoulage ;
- tracer le diagramme des masses volumiques sèches en fonction de la teneur en eau ;
- en observant le diagramme, on détermine la teneur en eau optimale (TEO) correspondant à la masse volumique sèche maximale (MVS_{max}).

La figure 2.11 montre l'optimisation obtenue pour les mélanges 11 (8 % de ciment) et 21 (10 % de chaux) pris comme références (voir tableau 2.17). Pour le reste des mélanges, on a procédé à un réajustement de la teneur en eau selon le cas étudié.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2.19.

Tableau 2.19 : Optimisation de la teneur en eau.

mélange n°	liant (%)		Mvsmax (g/cm ³)	TEO (%)
	ciment	chaux		
11	8	0	2.04	10
21	0	10	1.93	12

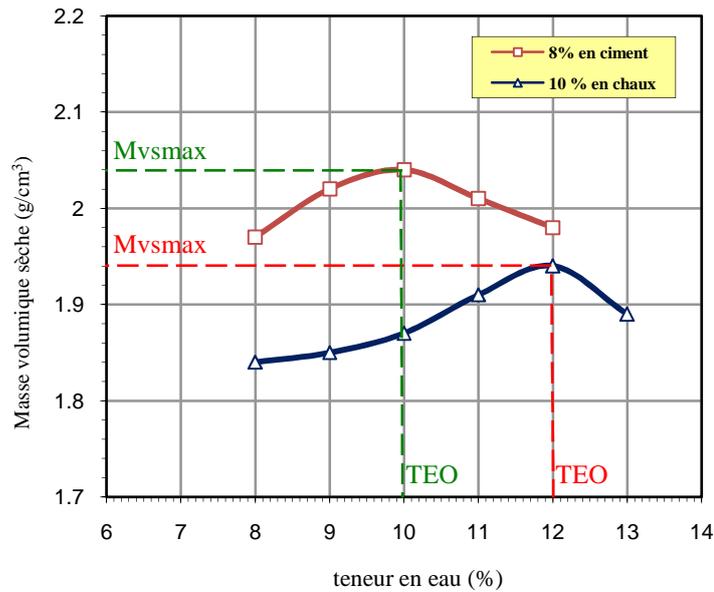


Fig. 2.11: Optimisation de la teneur en eau

2.3.6 Compactage des mélanges

Les mélanges sont compactés selon le mode statique à simple effet par le biais d'une presse hydraulique : le plateau inférieur de la presse se déplace entraînant l'ensemble - moule + mélange + piston, le plateau supérieur reste fixe. L'opération est conduite jusqu'à l'affichage sur l'écran de lecture de la pression voulue. Durant toute cette étude on a appliqué trois contraintes de compactage (1.5 MPa, 5 MPa et 10 MPa), tout en respectant le programme présenté dans le tableau 2.20.

Tableau 2.20 : La contrainte de compactage des mélanges

Le mélange	La contrainte de compactage (MPa)	Ciment (%)	Chaux (%)
sol+sable concassé+ciment sans fibres	5 et 10	5, 6.5 et 8	0
sol+sable concassé+ciment sans fibres	1.5	5	0
sol+sable concassé+chaux sans fibres	10	0	8,10 et 12
sol+sable concassé+ciment + fibres de palmier	5 et 10	5, 6.5 et 8	0
sol+sable concassé+ciment + fibres de palmier	1.5	5	0
sol+sable concassé+ciment + fibres de polypropylène	10	8	0
sol+sable concassé+chaux + fibres de polypropylène	10	0	10
sol+sable concassé+chaux+ fibres de palmier	10	0	8, 10 et 12
sol+sable concassé+chaux + paille d'orge hachée	10	0	10
sol+sable concassé+chaux + fibres de palmier+ paille d'orge hachée	10	0	10

- Le démoulage se fait immédiatement après le compactage.

2.4 La cure des blocs

Comme pour le béton, la résistance d'un sol-liant croît avec l'âge. Tous les sols n'ont pas un comportement identique, mais une période de cure de 7 jours est indispensable.

Pendant cette période, on maintiendra le matériau en atmosphère humide, à l'abri du soleil, en prenant garde au vent; ceci afin d'éviter un dessèchement trop rapide. Dans les conditions de conservation réelles, les blocs doivent être protégés avec du plastique durant les premiers jours avant leur utilisation.

Après le démoulage, le bloc est pris manuellement avec précaution, en évitant de toucher les arêtes à cause de la fragilité du bloc, il est ensuite couvert d'un film en plastique de manière à assurer son étanchéité. Pour favoriser au maximum l'hydratation du liant, le bloc est conservé au laboratoire à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 24 heures avant d'être soumis aux différents modes de cure.

Pour étudier l'influence du mode de cure, les BTC sont curés selon trois modes :

- au laboratoire;
- à l'étuve ;
- Le traitement naturel par étuvage à la vapeur sous rayonnements solaires.

Finalement, après la période de cure et avant de soumettre les BTC aux essais, ils doivent être dessécher à l'étuve jusqu'à masse constante.

2.4.1 Conservation au laboratoire

Tous les blocs étudiés, sauf ceux qui sont cités dans les deux autres modes, sont conservés au laboratoire à une température $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 28 jours (figure 2.12). Les blocs concernés par ce mode sont : BCSF, BXSf, BCPD, BXPD et BCPP.



Fig. 2. 12: Conservation des blocs au laboratoire

2.4.2 Cure à l'étuve

Les blocs couverts sont conservés à l'étuve à une température $T = 65 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant des durées différentes (figure 2.13). Les blocs concernés par ce mode sont : BXSf, BXPd, BXPP, BXPO et BXPdPO pendant 7 jours. Pour étudier l'effet du temps de cure sur les propriétés mécaniques du BTC, le BXPd est curé pendant 1, 3, 5 et 7 jours.



Fig. 2. 13 : Cure à l'étuve des BTC.

2.4.3 Cure à vapeur naturelle

Ce mode de cure a été réalisé selon la procédure de Benammar et al. (Benammar, 2013). Dans cette procédure, les éprouvettes sont mises dans une enceinte métallique (couvertes de peinture ou d'une toile en plastique noir afin d'absorber les rayons solaires) (figure 2.14). Donc on assiste à un traitement naturel par étuvage à la vapeur sous rayonnements solaires, ce nous donne lorsque la température à l'air libre est de 30°C , dans l'enceinte elle dépasse les 50°C (Mezghiche, 1994).

Après l'enlèvement de la couverture en plastique, les blocs sont curés pendant une durée de 7 jours. Les blocs concernés sont ceux fabriqués de mélanges à base de 10 % en chaux avec l'ajout de fibres de palmier dattier (BXPd).

La température relevée à l'intérieur de l'enceinte d'étuvage durant la période de cure est :

- $30 \pm 5^\circ\text{C}$ à 10h00 ;
- $55 \pm 5^\circ\text{C}$ à 13h00 ;
- $45 \pm 5^\circ\text{C}$ à 16h00.



Fig. 2. 14: Enceinte métallique pour l'étuvage naturel des BTC, selon la procédure de Benammar et al. (Benammar, 2013).

2.5 Propriétés mécaniques

On s'intéresse dans cette étude à déterminer les caractéristiques mécaniques suivantes : la résistance en compression des BTC à l'état sec et à l'état humide par le biais de l'essai de compression simple, et la résistance à la traction sèche en réalisant l'essai de traction par fendage. Pour chaque essai, trois blocs ont été testés.

2.5.1 Essai de compression simple

2.5.1.1 Résistance à la compression sèche

Cet essai permet de déterminer la résistance nominale en compression simple des blocs de terre crue compressée selon la norme XP P 13-901. Il s'agit de soumettre un échantillon constitué de deux demi-blocs superposés et collés par un joint de mortier de ciment à une compression simple jusqu'à la rupture (figure 2.15, figure 2.16).

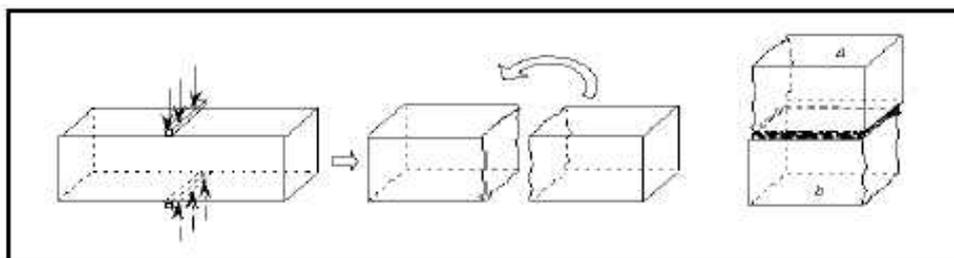


Fig.2.15 Coupe du bloc en deux demi-blocs et superposition de ces derniers (norme XP 13-901)

La résistance à la compression est donnée par la formule

$$R_c = 10 \times \frac{F}{S} \quad (2.1)$$

Où :

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

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

S : Surface moyenne des faces d'essai en cm^2



Fig.2.16 : Le bloc après écrasement

2.5.1.2 Résistance en compression à l'état humide

Les blocs humides ont des caractéristiques mécaniques (résistance à la traction et à la compression) plus faibles qu'à l'état sec. Il est donc utile de les tester à l'état humide afin de connaître leurs caractéristiques minimales dans le cas le plus défavorable.

Cet essai est identique à l'essai de résistance à la compression sèche, excepté le fait que les deux demi-blocs sont immergés complètement dans l'eau durant deux heures (XP P 13-901).

2.5.2 Essai de traction par fendage:

Cet essai est dérivé de l'essai de traction par fendage (essai Brésilien). Il s'agit de soumettre le bloc après une cure à une compression le long de deux baguettes situées de part et d'autre d'un bloc, ce qui se traduit en une contrainte moyenne de traction suivant une facette verticale passant entre ces deux baguettes. Cet essai est réalisé selon la procédure de Centre pour le développement de l'entreprise CDE (CDE ,2000) (figure 2.17).



Fig. 2.17: l'essai de traction par fendage (CDE ,2000).

La résistance à la traction par fendage des blocs est donnée par la formule suivante :

$$R_t = 0.9 \times 10 \frac{2 F}{f . l . h} \quad (2.2)$$

Où :

R_t : Résistance à la traction des blocs en Méga Pascal (MPa).

F : Charge maximale supportée par les deux demi- blocs en KN

l : Largeur du bloc en centimètres (cm).

h : Epaisseur du bloc en centimètres (cm).

2.6 Absorption totale

Cet essai consiste à immerger le bloc dans un bac à eau pendant des durées différentes : 1, 2, 3 et 4 jours, et mesurer l'augmentation du poids P_h par rapport au poids du bloc à l'état sec P_s . L'absorption totale est déterminée par la formule suivante :

$$A \% = (P_h - P_s) \cdot 100 / P_s \quad (2.3)$$

2.7 Gonflement

La mesure du gonflement du BTC se fait selon la procédure suivante (norme XP 13-901) :

- Sceller sur chaque bloc à l'aide d'une résine époxyde deux plots de mesure selon la figure 2.18.

- mesurer la distance entre plots : l_0 .
- Placer les blocs dans un bac d'eau selon la figure 2.19.
- Après 96 heures d'immersion, laisser égoutter les blocs pendant 10 min, puis mesurer la distance entre plots : l_1 .
- L'amplitude du gonflement de chaque bloc est donnée par la formule suivante :

$$\Delta l_g \text{ (mm/m)} = (l_1 - l_0) / l_0 \quad (2.4)$$

l_0 : la distance avant immersion

l_1 : la distance après immersion

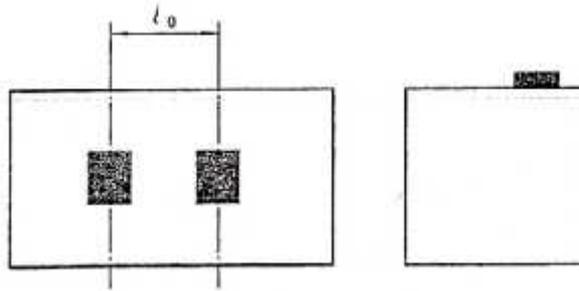


Fig.2.18 : Blocs pour mesure du gonflement (norme XP 13-901)

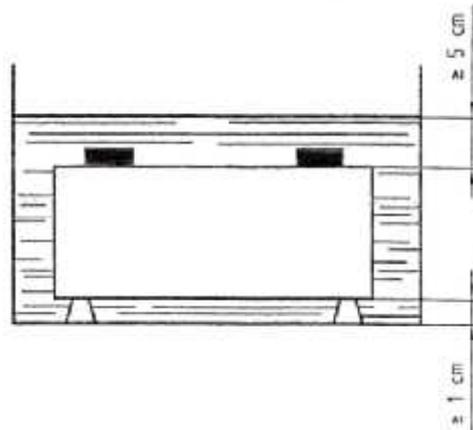


Fig.2.19 : L'immersion des blocs pour mesurer le gonflement (norme XP 13-901)

2.8 Comportement mécanique

Vu la non disponibilité au laboratoire d'un dispositif de mesure de déformation par le biais de jauges de déformation et une station d'acquisition de données, et en vue d'estimer le comportement en compression des blocs de terre comprimée renforcée par des fibres, on a utilisé un dispositif simple composé de comparateur (montre numérique) pour la mesure des déplacements fixé par le biais d'un bras magnétique au bâti de la presse hydraulique (figure 2.20). La mise à zéro de l'appareil de mesure des déplacements est effectuée une fois le BTC est maintenu entre les deux plateaux de presse.

On s'intéresse dans cette étude seulement à la mesure des déformations axiales des BTC. Pour le déroulement de l'essai, les déplacements verticaux sont mesurés avec l'application d'une charge de compression progressive suivant un pas de 10 kN. Les résultats nous permettent de dessiner la courbe contrainte – déformation et par suite la détermination du module de déformation longitudinale (module de Young).

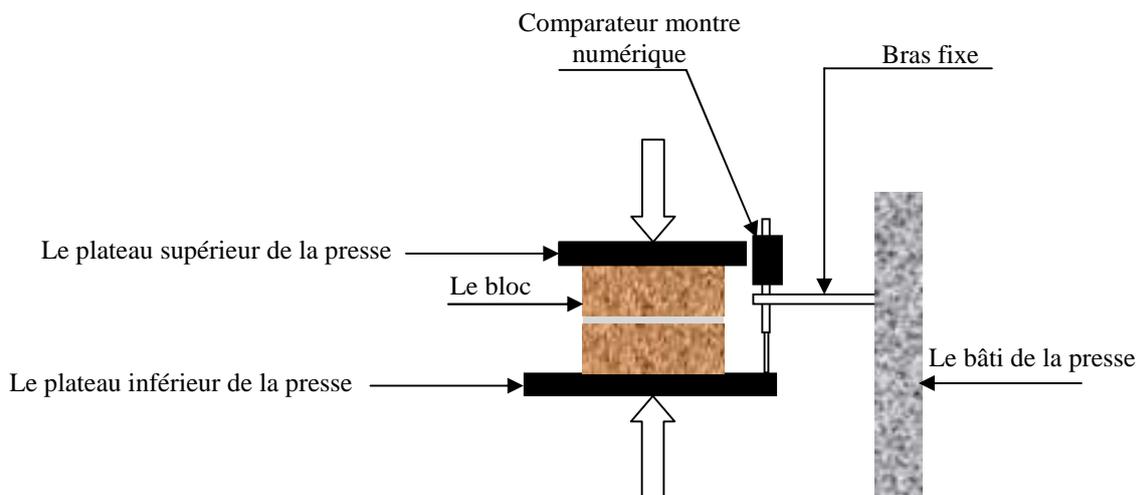


Fig. 2.20: Schéma de principe du dispositif de mesure des déformations

2.8 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 concassé, le ciment, la chaux et les fibres. Les fibres utilisées dans cette étude sont d'origine végétales (fibres de palmier dattier mâle et la paille hachée) et synthétiques (fibres de polypropylène).

Les données présentées dans ce chapitre sont issues de la bibliographie ou des essais de caractérisation menés lors de notre étude.

La présentation de la composition des mélanges et les procédures de fabrication des BTC dans ce chapitre, va nous permettre de mieux analyser les résultats et d'avoir une meilleure compréhension de l'influence des différents paramètres étudiés sur les propriétés du BTC fibré.

CHAPITRE 3 :

PRÉSENTATION ET

DISCUSSION DES RÉSULTATS

3.1 Introduction

La synthèse bibliographique a mis en évidence les besoins d'expérimentation pour étudier l'effet des fibres sur les propriétés du bloc de terre comprimé BTC. Dans ce cadre, ce chapitre est consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats d'un programme expérimental, qui a comme but, l'étude de l'effet de la présence des fibres sur:

- ✓ la masse volumique apparente du BTC ;
- ✓ la résistance mécanique du BTC, à savoir : la résistance à la compression à l'état sec RCS et humide RCH, la résistance à la traction à l'état sec RTS;
- ✓ l'insensibilité du BTC à l'eau, à savoir l'absorption totale à l'eau ATE et le gonflement ;
- ✓ le comportement mécanique du BTC.

Il faut signaler que l'étude de l'influence de la cure sur les propriétés mécaniques du BTC à base de chaux a été réalisée, en vue de faire un bon choix du mode et temps de cure pour le reste de l'étude.

Dans cette étude expérimentale, outre le matériau terre et le sable concassé, trois teneurs en ciments (5, 6.5 et 8 %), trois teneurs en chaux vive (8, 10 et 12 %), trois types de fibres (les fibres de palmier dattier mâle, la paille d'orge hachée et les fibres de polypropylène), quatre teneurs en fibres (0.05, 0.1, 0.15 et 0.2 %) du poids du mélange sec et trois contraintes de compactage (1.5, 5 et 10 MPa) sont utilisées dans cette étude.

Mais malgré l'utilisation dans cette étude d'un certain nombre de types de fibres, il faut dire que la majeure partie de l'étude est consacrée aux fibres de palmier dattier, vu son abondance et ses impacts socioéconomique et environnemental, alors que les autres types de fibres sont utilisés à titre de comparaison.

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

D'après Neville (Neville,2000), la cure est l'ensemble des procédures utilisées pour favoriser l'hydratation du ciment qui consiste en un contrôle de la température et des mouvements de l'humidité autour et à l'intérieur du béton. Les études réalisées sur les bétons et les mortiers, ont justifié l'importance de la cure pour atteindre de bonnes résistances.

Dans cette étude, étant donné que le bloc de terre comprimée est stabilisé chimiquement soit par le ciment soit par la chaux, donc il est composé d'une matrice cimentaire exigeant une cure adéquate afin de compléter la réaction chimique.

Pour les BTC à base de ciment, la cure par couverture d'un film en plastique pendant une durée de 28 jours dans un climat modéré est très suffisante pour que la résistance du bloc atteigne une valeur acceptable, puisque la réaction pouzzollanique du ciment est plus au moins rapide comparée à celle de la chaux qui est lente. La réaction pouzzollanique lente de la chaux se traduit par une faible résistance à court et à moyen terme. 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).

Donc pour éviter le problème de stockage des BTC pendant une longue durée une cure accélérée est indispensable.

3.2.1 Effet du mode de cure :

L'étude de l'effet du mode de cure a été faite sur les BTC à base de 10% de chaux et 0.1% de fibres de palmier dattier (BXDP) et sous l'influence d'une contrainte de compactage de 10 MPa. La figure 3.1 présente la variation des résistances à la compression sèche et humide en fonction du mode de cure (cure au laboratoire, cure à l'étuve et cure à vapeur naturelle).

Les résultats montrent que les blocs curés à l'étuve présentent la meilleure résistance à la compression (RCS et RCH) comparativement aux deux autres modes de cures. La RCS du mode de cure à l'étuve dépasse celles de la cure au laboratoire et la cure à vapeur naturelle de 46.2 % et 29,3 % successivement. Alors que le dépassement de RCH est de 18.64 % et 12.9 % successivement. Dans le même contexte, la résistance à la traction sèche RTS du mode de cure à l'étuve, dont les résultats sont présentés sur la figure 3.2, dépasse celles de la cure au laboratoire et la cure à vapeur naturelle de 27.3 % et 16,7 % successivement.

Ceci nous présente l'avantage de la cure à l'étuve sur le plan de la réduction du temps de conservation des BTC, mais au détriment de l'économie de consommation d'énergie.

Mais en comparant les valeurs de RCS, RCH et RTS du mode de cure à vapeur naturelle au mode de cure au laboratoire, on constate un dépassement de 13 %, 5.1 % et 9.1 % successivement. A travers cette comparaison, on remarque un gain de résistance en faveur du mode de cure à vapeur naturelle, ce qui se traduit par une réduction de la durée de conservation des blocs sans aucune consommation d'énergie.

Ces résultats issus du traitement thermique des BTC, sont en concordance avec ceux de Al-Mukhtar et al. (Al-Mukhtar,2010), qui ont constaté qu'un sol stabilisé à la chaux soumis à une cure à température élevée accélère la réaction pouzzolanique, et cause par suite un développement rapide de la résistance mécanique. Houben (Houben,2006) a mentionné aussi que des recherches menées à l'Université du Danemark ont montré que l'on obtient de très bons produits avec une cure de 24 h en chambre de haute pression de vapeur à 60-97°C et à 100% H.R. Des résultats similaires sont obtenus par Bell (Bell,1996), Rao et al. (Rao,2005), Ciancio et al. (Ciancio,2014) .

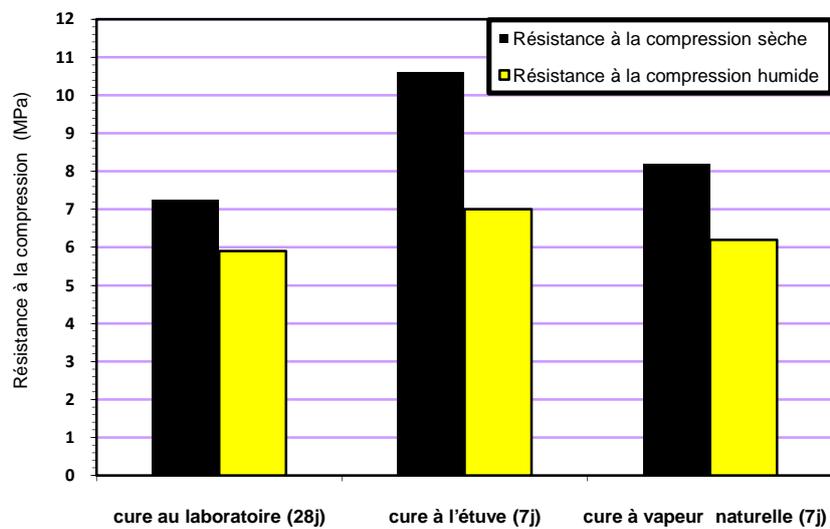


Fig. 3.1: Résistances à la compression sèche et humide du BXPB à base de 10% en chaux et 0.1% de fibres en fonction du mode de cure.

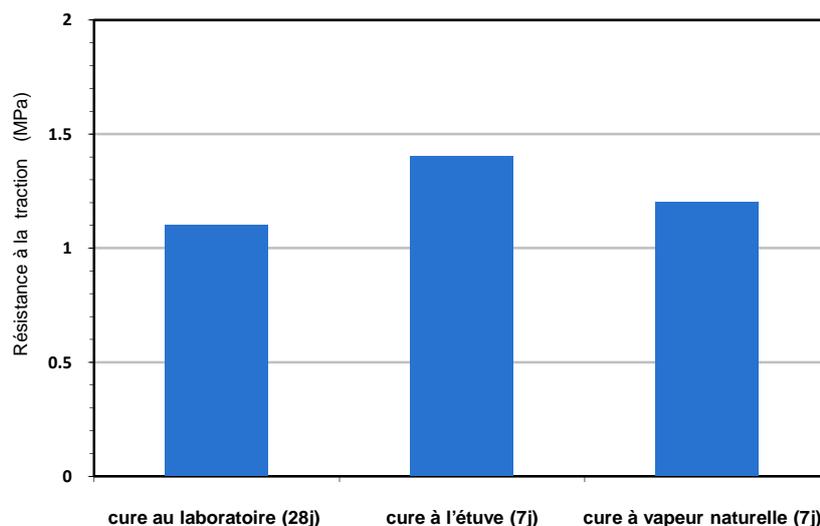


Fig. 3.2: La résistance à la traction sèche du BXPB à base de 10% en chaux et 0.1% de fibres en fonction du mode de cure.

3.2.2 Effet du temps de cure (cure à l'étuve)

La figure 3.3 présente les valeurs de la résistance à la compression sèche du BXPB à base de 10% en chaux et 0.1% de fibres pour chaque durée de cure à l'étuve.

L'analyse des résultats présentés sur cette figure montre que la plus faible et la plus grande valeur de la résistance est obtenue pour 1 jour et 7 jours de cure successivement.

D'après la figure 3.3 on voit bien que la RCS augmente avec l'augmentation du temps de cure. On remarque aussi qu'après 5 jours de cure l'évolution de la résistance est atténuée comparativement à la phase précédente. La résistance des blocs après 7 jours de cure dépasse celle des blocs curés à 1, 3 et 5 jours de 66,1 %, 35 % et 8 % successivement.

L'évolution de la résistance à la traction sèche en fonction du temps de cure est présentée sur la figure 3.4. Cette figure nous montre une évolution de RTS moins rapide que celle de la compression. On enregistre aussi que la RTS après 7 jours de cure dépasse celles des blocs curés à 1, 3 et 5 jours de 37,2 %, 18,6 % et 3,7 %.

Cette augmentation de la résistance mécanique en fonction de la durée de cure est attribuée à la formation d'une nouvelle minéralogie, à savoir l'apparition de C-S-H (silicates de calcium hydratés) en quantités évoluant dans le temps surtout sous une température élevée.

Ces résultats confirment ceux de Bell (Bell,1996), Al-Mukhtar et al. (Al-Mukhtar,2010) et Millogo et al. (Millogo,2012). Bell a constaté qu'à part les éprouvettes confectionnées avec 10 % d'eau, le reste des cas (> 10 % d'eau) a révélé que la résistance à la compression confinée augmente avec l'augmentation de la durée de cure. L'étude d'Al-Mukhtar et al. a montré aussi que la résistance à la compression confinée augmente avec le dosage en chaux et avec le temps de cure à une température de 50°C. Ils ont remarqué aussi que la majeure partie de la résistance à la compression confinée est atteinte pour 7 jours de cure pour 2 % et 4 % en chaux, alors que pour 6 %, 8 %, 10 % et 20 % en chaux, la résistance à la compression confinée continue à augmenter avec la durée de cure. Millogo et al. ont prouvé que la résistance à la compression et à la traction augmente avec la durée de cure, ce qui prouve d'après eux, que la réaction pouzzolanique est liée étroitement à la durée de cure.

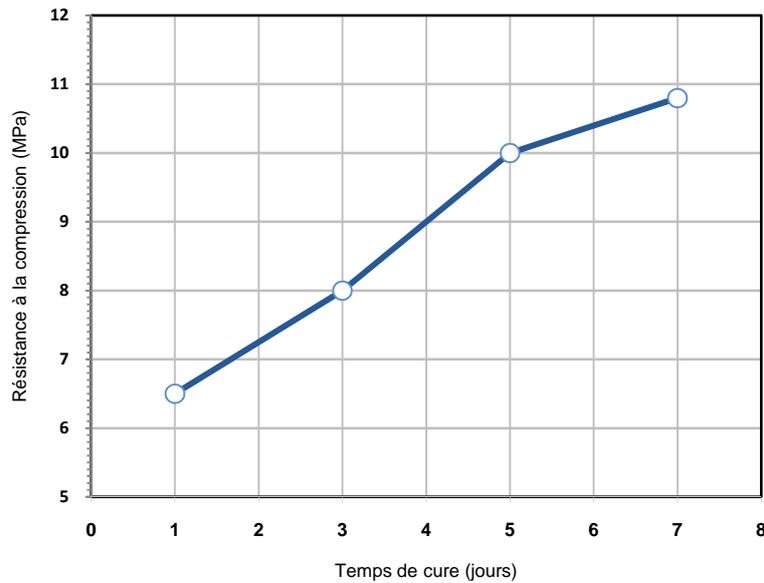


Fig. 3.3 : La résistance à la compression sèche du BXPB à base de 10% en chaux et 0.1% de fibres en fonction du temps de cure.

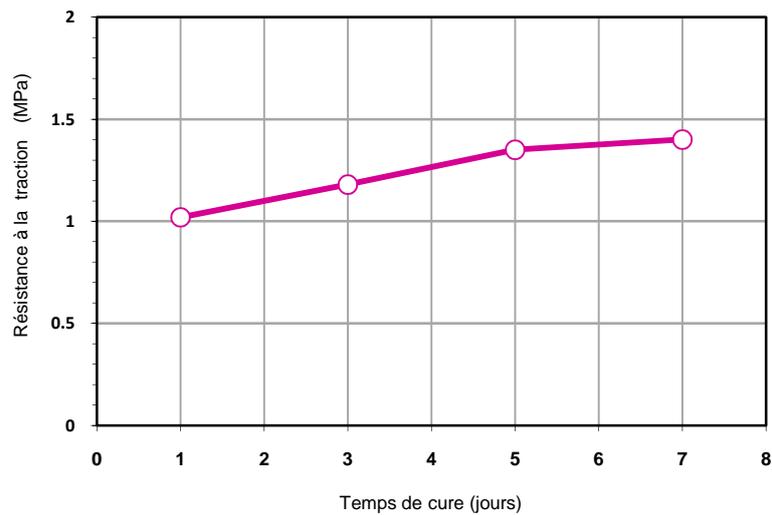


Fig. 3.4 : La résistance à la traction sèche du BXPB à base de 10% en chaux et 0.1% de fibres en fonction du temps de cure.

3.3 Effet de la teneur en fibres de palmier dattier sur la masse volumique du BTC

La masse volumique est une caractéristique intrinsèque du matériau qui dépend de plusieurs paramètres : la composition, le malaxage, la cure et autres.

Les mesures de la masse volumique des BTC à base de 10 % de chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa) sont montrées sur la figure 3.5.

première vue, on voit bien d'après la figure 3.1 qu'il y a une réduction de la masse volumique avec l'augmentation de la teneur en fibres. Mais malgré cette observation, on doit mentionner que la réduction de la masse volumique des BXPB est très faible comparativement à celle du BTC sans fibres BXS. titre d'exemple la plus faible réduction de la masse volumique qui correspond à 0.2 % en fibres est égale à 3.4 %. Ceci nous montre l'effet dominant du compactage appliqué durant la phase de fabrication du BTC devant celui des fibres. Il faut aussi mentionner que la valeur de la masse volumique de l'ensemble des cas étudiés est très importante, elle s'étale entre 1922 kg/m^3 et 1990 kg/m^3 , ceci va se répercuter sur la résistance mécanique, comme on va le voir ultérieurement.

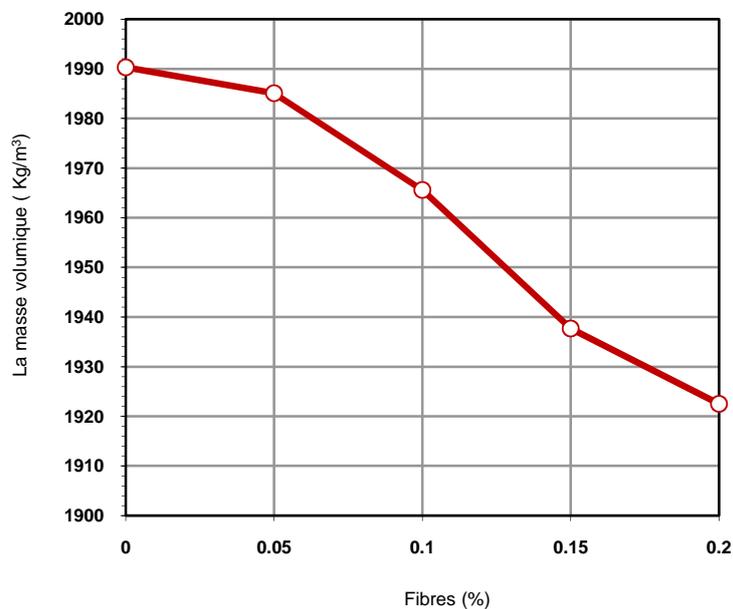


Fig. 3.5 : La masse volumique du BTC à base de 10 % de chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa)

3.4 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.

3.4.1 La résistance à la compression sèche

3.4.1.1 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 3.6.

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 (C_2S et C_3S) 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.

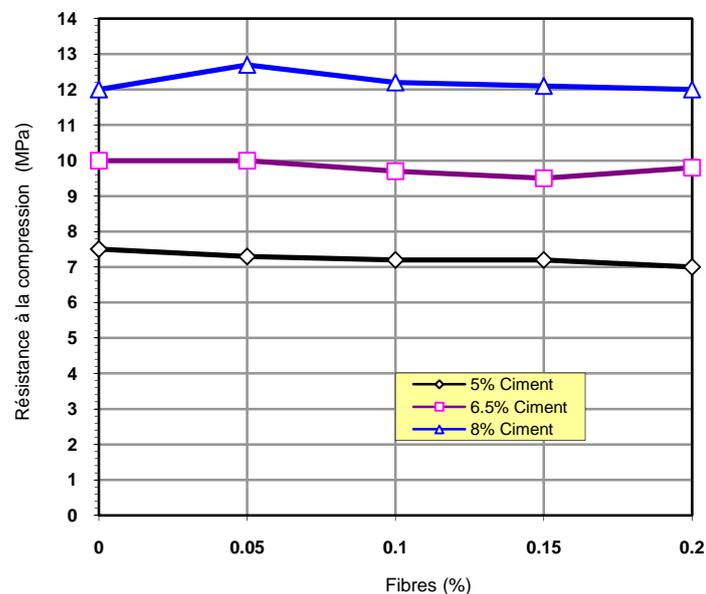


Fig. 3.6 : Résistance à la compression sèche du BCPD en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa)

3.4.1.2 Les BTC à base de chaux

Comme dans le cas du ciment, Pour étudier l'influence de la teneur en fibres sur les propriétés mécaniques du BTC à base de chaux, nous avons fait varier la teneur en fibres de 0.05 % jusqu'à 0.2 % du poids du mélange sec.

Tout d'abord on va discuter de l'effet de la chaux à travers les résultats de la variation de la résistance à la compression sèche en fonction de la teneur en chaux qui sont présentés sur la figure 3.7. D'après cette figure, l'augmentation de la teneur en chaux de 8 % à 10 % a conduit à une augmentation de la résistance de l'ordre de 5 %, alors qu'avec une augmentation de la teneur en chaux de 10 % à 12 % on observe une réduction de la résistance de 8,15 %. On remarque que la variation de la résistance est peu importante, cela est dû à la durée de cure qui est aussi peu importante (28 jours) et à la température qui n'est pas élevée, qui sont les conditions d'une réaction pouzzolanique lente de la chaux. Ceci a été confirmé par Le Roux (Le Roux,1969), qui a prouvé Il a montré que la stabilisation à la chaux (avec des dosages de 3 à 7 % et 90 jours de cure) permet la formation de nouveaux minéraux par réaction pouzzolanique : des silicates et aluminates calciques hydratés sont formés à partir des argiles. Cette réaction pouzzolanique est une réaction lente qui demande, à température ordinaire, plusieurs mois avant que ses résultats puissent être appréciés.

Pour l'interprétation des résultats de la figure 3.8, on s'est basé sur l'étude de Millogo et al. (Millogo,2008) réalisée sur les briques d'adobe stabilisées à la chaux. D'après les auteurs, l'augmentation de la résistance pour une teneur en chaux $< 10\%$ est due à la formation d'une importante quantité de CSH devant une faible quantité de calcite et de portlandite, alors que pour une teneur en chaux $> 10\%$ on assiste à la formation d'une quantité de calcite et de portlandite plus importante que celle de CSH, ce qui a conduit à la réduction de la résistance.

Pour l'étude de l'influence de la teneur des fibres sur la RCS du BXPDP, on analyse les résultats de la figure 3.8. Cette figure nous montre que les valeurs de la résistance à la compression sèche s'étalent entre 7,85 MPa et 6,57 MPa. En comparant ces valeurs avec celles des BCPDP, on constate une réduction générale de l'ordre de 34 %. Cette réduction est due à l'influence de la nature du liant et sa réaction avec le matériau terre, ainsi que les conditions de cure.

Pour l'effet de l'addition des fibres au mélange, la figure 3.8 montre que dans l'ensemble des cas étudiés, comparativement au BXSf, il y a une faible réduction de la RCS du BXPd avec l'augmentation de la teneur en fibres, qui va de 3.61 % pour 0.05 % jusqu'à 12 % pour 0.2 % pour le cas de 8 % en chaux, 3.82 % pour 0.05 % jusqu'à 11.21 % pour 0.2 % pour le cas de 10 % en chaux et 2.91 % pour 0.05 % jusqu'à 10.21 % pour 0.2 % pour le cas de 12 % en chaux. La plus faible et la plus grande résistance du BXPd est successivement enregistrée pour les cas de 0.05 % en fibres et 10 % en chaux et 0.2 % en fibres et 12 % en chaux. L'explication donnée pour la diminution de RCS pour le cas des BCPd à base de ciment est valable pour le cas de BXPd, sauf que pour le cas de la chaux, la différence entre la plus faible valeur de la résistance et sa valeur la plus élevée est plus importante, ceci est due à la quantité du CSH qui est moins importante que celle produite dans le cas du ciment, donc moins de résistance à l'effet du comportement élastique des fibres sur la matrice après déchargement. On remarque aussi que la RCS du BXPd a subi presque la même variation en fonction de la teneur en chaux, c'est -à- dire que la teneur en chaux optimale coïncide avec la teneur 10 %.

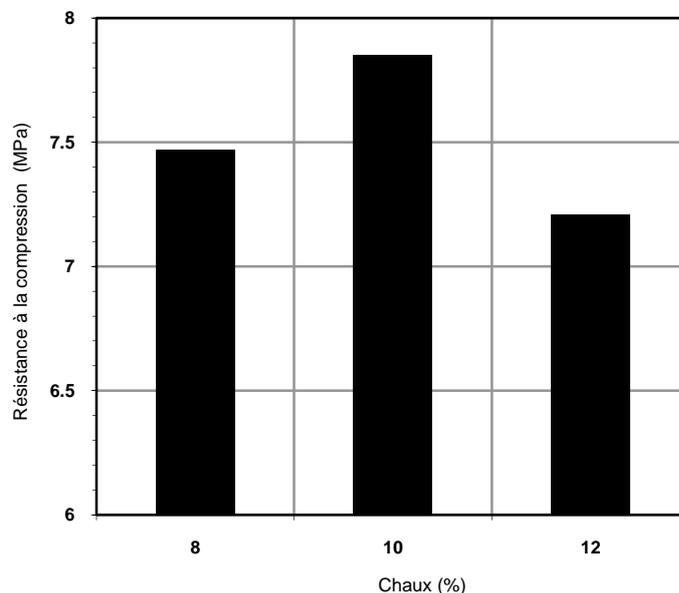


Fig. 3.7 : Résistance à la compression sèche du BTC à base de chaux sans fibres curé 28 jours au laboratoire en fonction de la teneur en chaux (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).

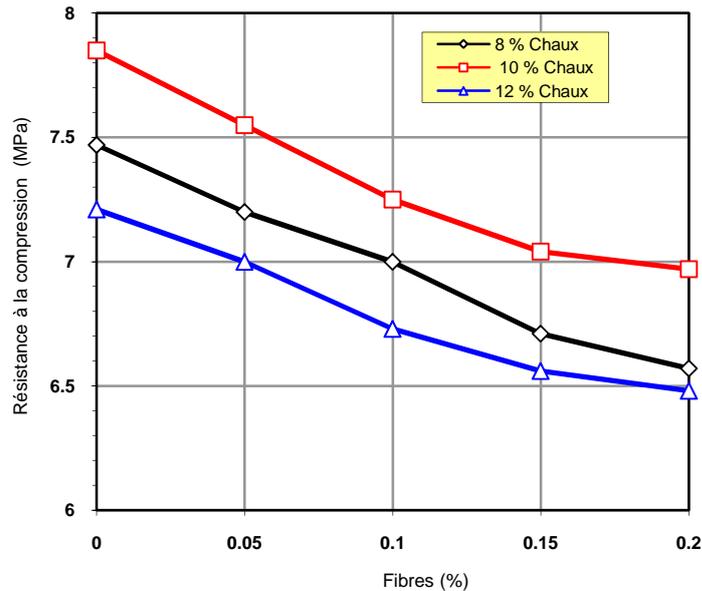


Fig. 3.8 : Résistance à la compression sèche du BXPB curé 28 jours au laboratoire en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).

3.4.2 La résistance à la compression humide

3.4.2.1 Les BTC à base de ciment

La variation de la résistance à la compression humide du BCPD en fonction de la teneur en fibres est représentée sur la figure 3.9. Comme on peut le constater, il y a une diminution de la résistance avec l'augmentation de la teneur en fibres pour tous les blocs testés comparativement aux blocs sans fibres. Donc la présence de fibres dans des blocs a un effet négatif sur la RCH. La diminution de la résistance varie entre 3 % et 20% pour tous les blocs testés. Les valeurs de la RCH pour les blocs sans fibres sont : 5 MPa ; 6,9 MPa et 9,2 MPa pour une teneur en ciment (t_c) respectivement de : 5%, 6.5% et 8 %. La différence entre RCS et RCH est d'environ 50 % (5% t_c), 45 % (6,5 % t_c) et 30 % (pour 8 % t_c) . Ceci montre que plus la teneur en ciment est grande, moins est la différence entre RCS et RCH d'un BTC. Ces résultats confirment ceux d'autres chercheurs, qui ont montré que l'augmentation de la teneur en stabilisant est la manière la plus économique d'augmenter la résistance à la compression humide du BTC (Lunt, 1980). La figure 3.10 montre que le plus grand rapport de la résistance à la compression sèche sur la résistance à la compression humide (RCS / RCH) est égal à 1,87 et se trouve à 0,2 % en fibres et 5 % en ciment. Cette valeur n'a pas dépassée 2, valeur limite recommandée par plusieurs chercheurs (Houben,

1996). Il faut mentionner que la valeur de RCH pour l'ensemble des BTC testés est supérieure à la valeur minimale recommandée, qui est entre 1.2 MPa et 2.8 MPa (Houben, 1994).

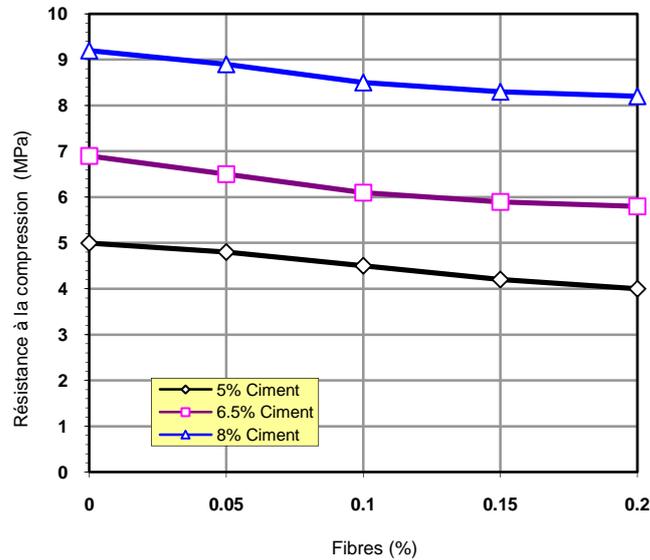


Fig. 3.9 : Résistance à la compression humide du BCPD en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).

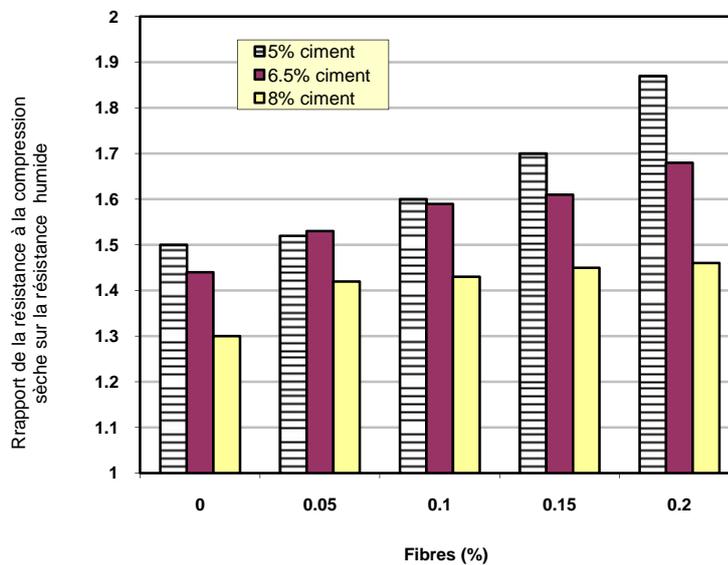


Fig. 3.10 : Rapport de la résistance à la compression sèche sur la résistance humide (RCS/RCH) du BCPD en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).

3.4.2.2 Les BTC à base de chaux

La détermination de la résistance à la compression humide contribue à l'étude du degré d'insensibilité des BTC à l'eau en présence des fibres et en utilisant des stabilisants chimiques (ciment, chaux). On présente sur la figure 3.11 les résultats de la variation de la résistance à la compression humide du BXPDP en fonction de la teneur en fibres.

On constate aussi, comme pour le cas de la stabilisation au ciment, qu'il y a une réduction de la RCH du BXPDP avec l'addition des fibres de palmier dattier, qui est due à l'effet défavorable de la décompression du bloc après compactage durant la phase de fabrication et par suite une résistance plus faible, malgré que le caractère hydrophile des fibres végétales peut contribuer dans la stabilité du bloc en réduisant la teneur en eau de la matrice par absorption. La valeur maximale de RCH des BXPDP est enregistrée pour le cas de 10 % en chaux et 0.05 % en fibres, alors que la valeur la plus faible coïncide avec le cas de 8 % en chaux et 0.2 % en fibres. Il faut mentionner que malgré la diminution de la RCH, elle reste importante comparativement aux résultats obtenus par Khedari et al. (Khedari,2005) à l'état sec. La figure 3.11 montre que les résultats des BXPDP à base de 10 % en chaux sont meilleurs que ceux obtenus pour 8 % et 12 % en chaux.

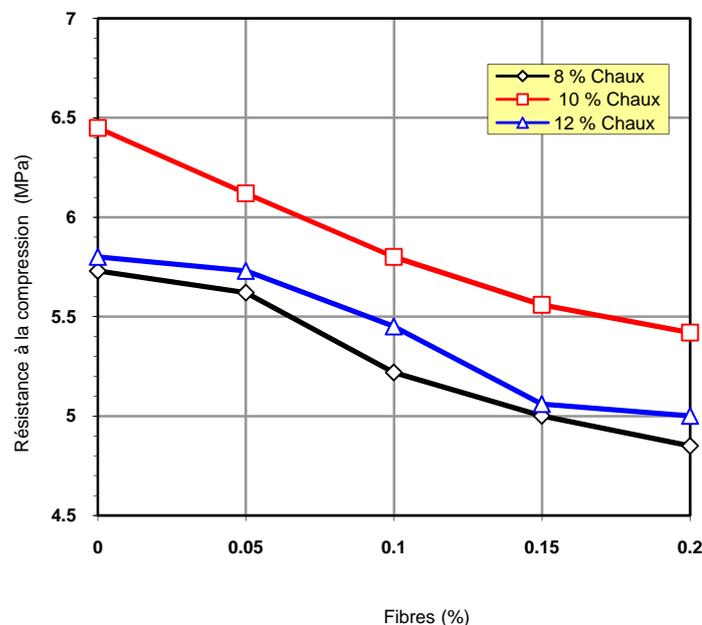


Fig. 3.11 : Résistance à la compression humide du BXPDP curé 28 jours au laboratoire en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).

La figure 3.12 illustre la variation du rapport de la résistance à la compression sèche sur la résistance à la compression humide (RCS / RCH) du BXPB en fonction de la teneur en fibres. On voit bien que le rapport RCS / RCH augmente avec la teneur en fibres, et ce rapport est plus faible pour les BTC à base de 10 % comparativement à ceux de 8 % et 12 % en chaux. Mais d'une manière générale, le rapport RCS / RCH est inférieur à 2, qui est la valeur limite à ne pas dépasser.

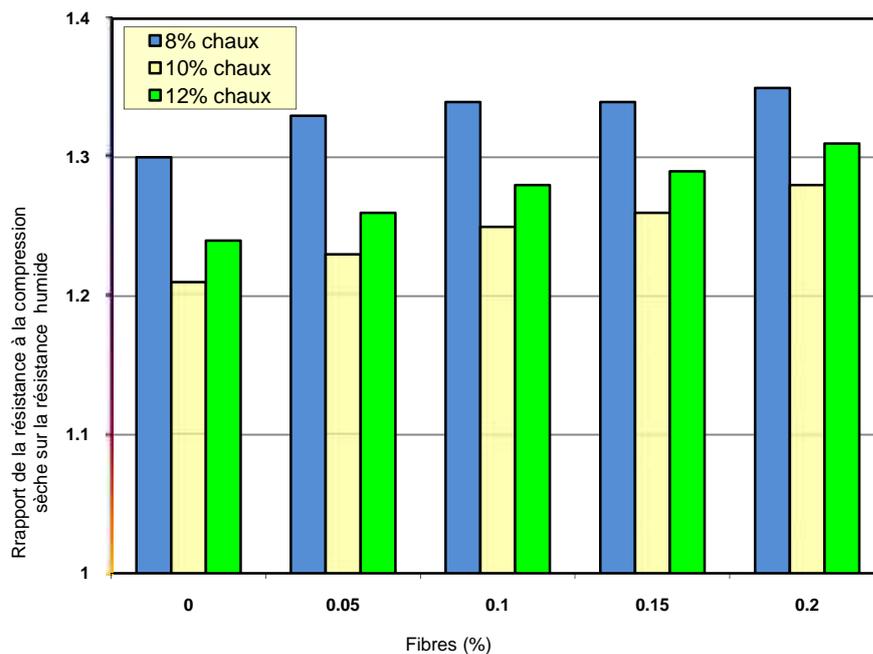


Fig. 3.12 : Rapport de la résistance à la compression sèche sur la résistance humide (RCS/RCH) du BXPB en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).

3.4.3 la résistance à la traction sèche

3.4.3.1 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 clair 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).

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 obtenus 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. 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 cannabinus 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.

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.

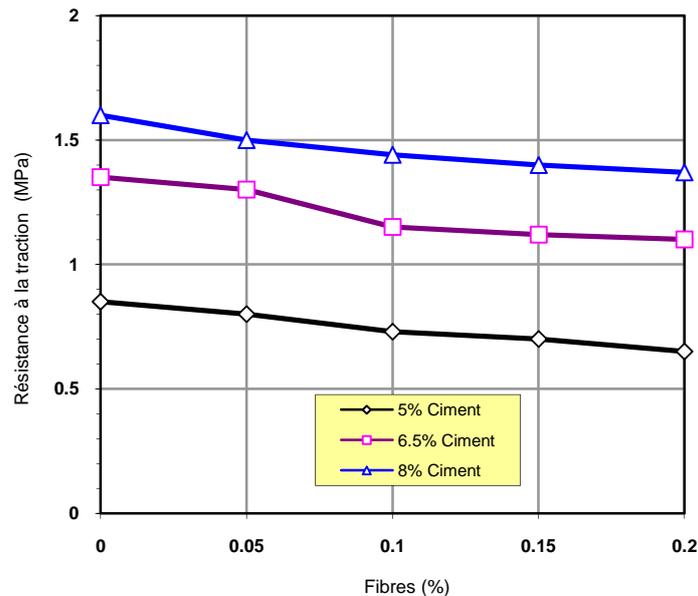


Fig. 3.13 : Résistance à la traction sèche du BCPD en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa)

3.4.3.2 Les BTC à base de chaux

Dans la figure 3.14 on observe, en variant la teneur en fibres de palmier dattier, que la résistance à la traction sèche du BXPDP présente une faible augmentation pour 0.05 % en fibres, qui est de 4.5 % et 3.4 %, pour 8 % et 12 % successivement. Alors que pour le reste des cas étudiés, il n'y a aucune amélioration de la RTS, au contraire, on a enregistré une réduction de cette résistance comparativement au BXPDP. Ceci nous montre que la présence des fibres a un effet négatif sur les propriétés mécaniques des BTC, suite à la faible transmission des charges au niveau de l'interface fibres /matrice, en plus de l'augmentation de la porosité causée par la décompression après déchargement. On constate aussi que la RST du BTC à base de 10 % en chaux (pour l'ensemble des teneurs en fibres) présente des valeurs un peu supérieures à celles des BTC à base de 8 % et 12 %. titre d'exemple, pour 0.1 % en fibres, la résistance à la traction pour 10 % en chaux est 6.7 % et 3 % supérieure à celle de

8 % et 12 % successivement. Mais d'une manière générale, le développement de la résistance est faible à moyen terme (cure à 28 jours), à cause de la lenteur de la réaction pouzzolanique de la chaux (Le Roux,1969). On constate aussi que la résistance à la traction est 530 % de moins que la résistance à la compression sèche.

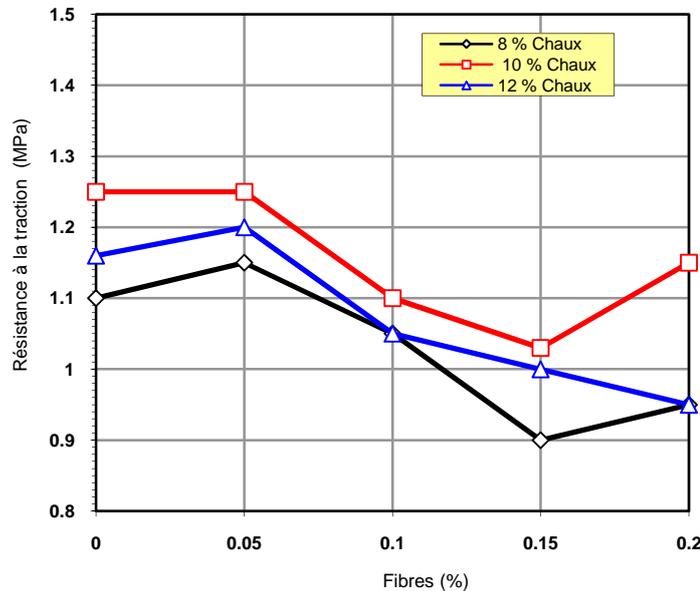


Fig. 3.14 : Résistance à la traction sèche du BXPDP curé 28 jours au laboratoire en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa)

3.4.4 L'absorption totale

La connaissance de la valeur de l'absorption totale d'eau (ATE) d'un bloc est importante, car elle peut être utilisée pour avoir une idée sur la porosité d'un bloc. En général, moins est l'absorption d'eau d'un bloc, meilleure est sa performance mécanique (Kerali, 2001).

3.4.4.1 Les BTC à base de ciment

Les résultats illustrés dans la figure 3.15 montrent qu'il existe une diminution de l'absorption totale d'eau après un jour d'immersion avec l'augmentation de la teneur en ciment. D'une manière générale, cette diminution est d'environ 10% en variant la teneur en ciment de 5% à 8%. Il a été constaté aussi que l'ATE du BTC après un jour d'immersion se situe entre 9,2% et 11,2%.

Les valeurs obtenues de l'absorption totale de l'eau sont admissibles par rapport à celles des matériaux suivant : briques d'argile 0-30 % ; blocs de béton 4-25 % ; briques de silicate de calcium 6-16 % (Jackson, 1996). On a constaté aussi à travers les résultats obtenus qu'il y a une augmentation de l'absorption d'eau avec l'augmentation de la teneur en fibres.

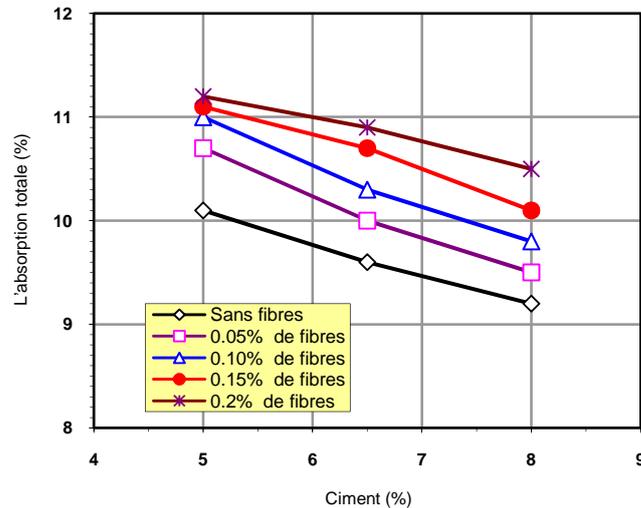


Fig. 3.15 : La variation de l'absorption totale du BCPD en fonction de la teneur en ciment et la teneur en fibres après un jour d'immersion dans l'eau (pour une contrainte de compactage de 10 MPa)

On peut voir à travers les résultats présentés sur les figures 3.16 a-c, que le BCSF est caractérisé par une absorption totale inférieure à celle du BCPD durant toute la période d'immersion dans l'eau, et pour toutes les teneurs en ciment étudiées. Les résultats montrent que l'ajout de fibres dans les mélanges augmente légèrement l'absorption totale d'eau, cela signifie qu'il y a plus d'infiltrations d'eau dans les échantillons. Ceci est attribué à la capacité d'absorption d'eau des fibres et l'effet néfaste de la présence des matières étrangères, telles que les fibres, sur la capacité de liaison du mélange (Weng, 2003). Cette absorption est expliquée aussi par l'effet de la nature des fibres. Les fibres cellulosiques sont plus hydrophiles, parce qu'elles contiennent la plus grande quantité de groupes OH dans sa composition chimique, et tout matériau renforcé avec ces fibres à l'état brut a tendance à avoir un caractère plus absorbant à l'eau.

Cette capacité des fibres à absorber l'eau est due à sa structure poreuse et à son caractère fortement hydrophile en raison des groupes hydroxyles de la cellulose et des hémicelluloses. L'eau absorbée par les fibres, est soit sous forme d'eau retenue entre les interstices des paquets de microfibrilles, soit qu'elle est liée à la surface des microfibrilles (Sbiai, 2011).

Ces résultats sont en concordance avec ceux de Salehan et Yaacob (Salehan, 2011), qui ont constaté que les résultats des essais d'absorption d'eau ont indiqué une légère augmentation de l'absorption d'eau avec l'augmentation de la teneur en fibres de palmier. Mais malgré cette augmentation les valeurs de l'absorption totale d'eau restent modérées selon la norme britannique BS 5628 Partie 1 (British standards, 1985). D'après cette norme, les valeurs ATE en dessous de 7% sont considérées comme étant faibles, tandis que celles plus de 12% sont considérées comme élevées.

Les figures 3.16 a-c nous ont permis de constater qu'il y a une légère augmentation de l'ATE en allant du premier jusqu'au quatrième jour d'immersion pour l'ensemble des teneurs en ciment et en fibres. La valeur la plus élevée de ATE pour tous les BCPD testés est de 11,8%, et ceci pour 0,2% de teneur en fibres et à 5% de la teneur en ciment après 4 jours d'immersion dans l'eau. Malgré l'augmentation de l'absorption totale des BCPD, elle reste inférieure à celle trouvée par Villamizar et al. (Villamizar, 2012), en fabriquant des BTC avec des pelures de manioc. Nous devons signaler ici l'importance de l'effet de la contrainte de compactage sur l'absorption totale de l'eau, parce que le compactage du sol modifie sa densité, sa résistance mécanique, sa perméabilité et sa porosité (Rigassi, 1995).

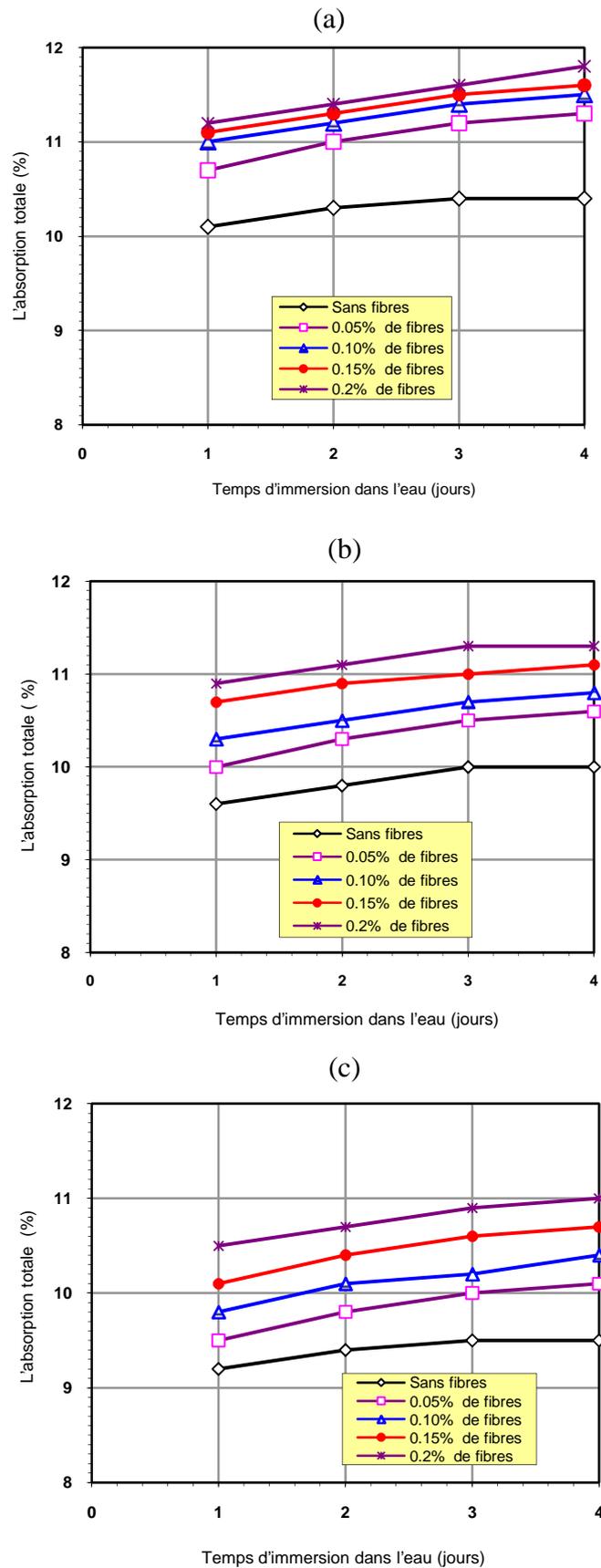


Fig. 3.16 : Effet de la teneur en fibres sur l'absorption totale d'eau du BCPD (pour une contrainte de compactage de 10 MPa) :
 (a) 5% en ciment ; (b) 6,5% en ciment ; (c) 8% en ciment ;

3.4.4.2 Les BTC à base de chaux

La sensibilité à l'eau du matériau terre stabilisé à la chaux défère du cas de la stabilisation au ciment. La figure 3.17 illustre la variation de l'absorption totale à l'eau du BXPDP (ATE) en fonction de la teneur en chaux et la teneur en fibres après un jour d'immersion dans l'eau (pour une contrainte de compactage de 10 MPa). Les résultats obtenus montrent que les valeurs de l'ATE s'étalent entre 9.9 % et 14.47 %, et que la plus grande valeur de l'ATE est enregistrée pour 0.2 % en fibres et 12 % en chaux. Selon la norme britannique BS 5628 Partie 1 (British standards, 1985), une partie de ces valeurs sont considérées élevées, surtout celles des BTC à base de 12 % en chaux. Les valeurs de l'ATE avec la stabilisation à la chaux sont plus importantes que celles obtenus en utilisant le ciment comme stabilisant, mais malgré cela, elles n'ont pas dépassées la valeur maximale permise par l'organisation suisse « International Labour Organisation », qui est 15 % (ILO, 1987).

La figure 3.17 montre que, pour toutes les teneurs en fibres utilisés, lorsque la teneur en chaux passe de 8 % à 10 % l'ATE présente une faible diminution, alors qu'après 10 % on constate une augmentation significative de l'ATE. Ce résultat concorde avec celui obtenu par Millogo et al. (Millogo, 2008) dans une étude sur les propriétés de l'adobe stabilisé à la chaux. On peut voir aussi sur la figure 3.17 que l'ATE augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres. Ceci peut être expliqué par le fait que les fibres de palmier dattier possèdent un caractère hydrophile, en plus de la présence de plus de vides avec l'introduction de plus de fibres.

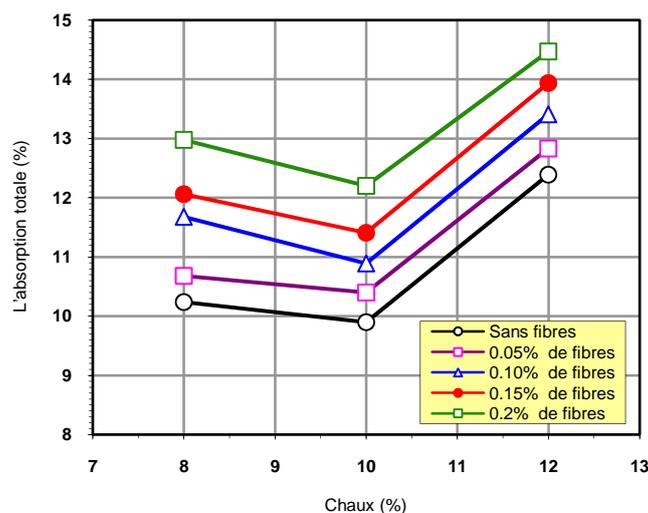


Fig. 3.17 : La variation de l'absorption totale du BXPDP curé 28 jours au laboratoire en fonction de la teneur en chaux et la teneur en fibres après un jour d'immersion dans l'eau (pour une contrainte de compactage de 10 MPa)

Pour voir le comportement vis-à-vis de l'eau dans le temps du BXPB, des mesures de l'ATE du BTC ont été enregistrées pendant 4 jours d'immersion à l'eau. Les figures 3.18 a-c présentent l'absorption totale dans le temps du BXPB en fonction de la teneur en fibres, pour 8%, 10% et 12% en chaux successivement.

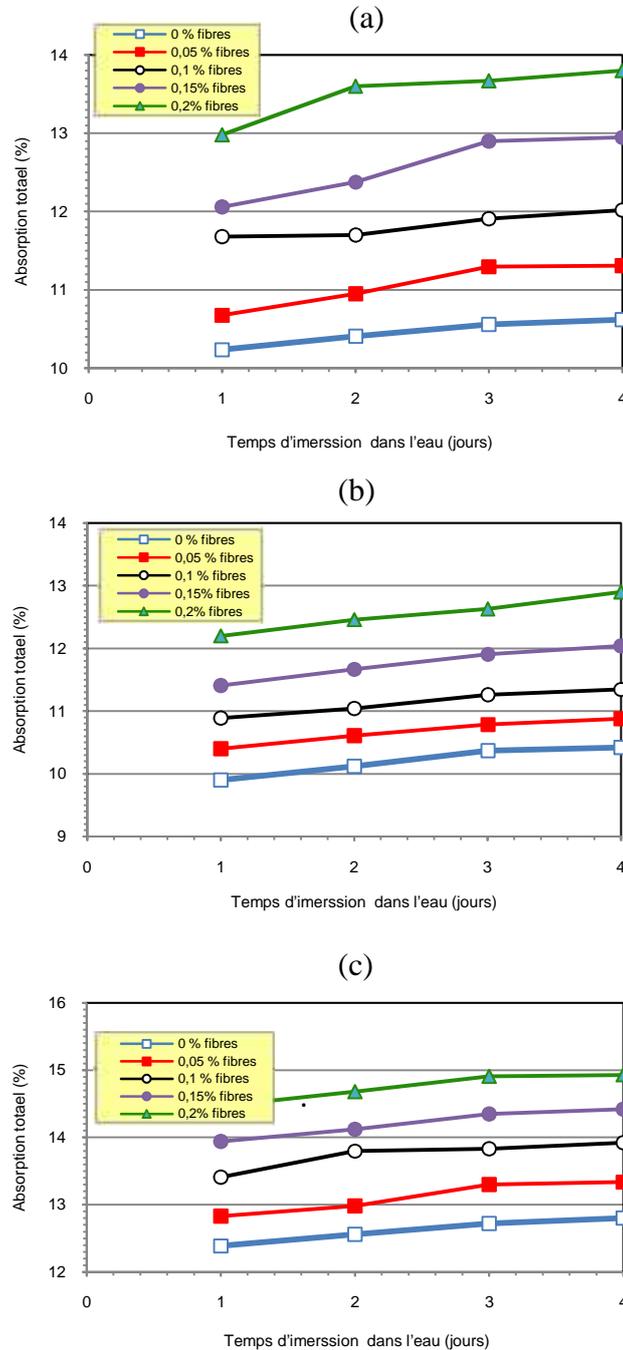


Fig. 3.18 : Effet de la teneur en fibres sur l'absorption totale d'eau du BTC à base de chaux curé 28 jours au laboratoire (pour une contrainte de compactage de 10 MPa) : **(a)** 8 % en chaux ; **(b)** 10 % en chaux ; **(c)** 12 % en chaux ;

On peut tirer des trois figures précédentes, que L'ATE est importante le premier jour, et qu'elle augmente avec le temps d'immersion dans l'eau, mais cette augmentation est peu importante. L'augmentation de l'ATE avec l'augmentation de la teneur en fibres est enregistrée. Ces résultats confirment ceux obtenus par de Salehan et Yaacob (Salehan, 2011).

3.4.5 Le gonflement

3.4.5.1 Les BTC à base de ciment

Les courbes représentées sur la figure 3.19 illustrent la variation du gonflement par immersion des BCPD en fonction de la teneur en fibres. A travers cette figure, on voit que le gonflement des blocs augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres. Le gonflement de l'ensemble des blocs soumis à l'essai est compris entre 0,18 % à 0,53 %. Les valeurs les plus basses du gonflement sont celles des BTC ayant 0,05% de fibres et 8% de ciment, alors que les valeurs les plus élevées correspondent aux BTC à base de 0,2 % en fibres et 5% en ciment. Le gonflement des blocs augmente avec la diminution de la teneur en ciment. Les valeurs du gonflement des BCSF sont de 0,19%, 0,14 % et 0,1% pour une teneur en ciment respectivement de : 5%, 6,5 % et 8 %. Par conséquent, la stabilisation au ciment réduit l'ampleur du gonflement, ceci a été mentionné par Rigassi (Rigassi, 1995).

Le gonflement enregistré dans cette étude est due à la fois à l'effet de l'eau sur les propriétés physico-chimiques du sol, qui se compose de (gypse, calcite, quartz et de kaolinite) et les variations dimensionnelles des fibres végétales suite à l'absorption d'eau due à son caractère hydrophile, produisant une pression sur les particules du mélange (matrice), ce qui modifie sa microstructure. Après séchage, les fibres perdent l'eau absorbée, ce qui se traduit par une réduction de leurs volumes, ce qui conduit à la formation d'un réseau poreux plus important tout au tour de la fibre affectant défavorablement l'adhérence fibre /matrice. Ces résultats sont confirmés par (Gavami, 1999 ; Segetin, 2007).

3.4.5.2 Les BTC à base de chaux

Le gonflement à l'humidité des produits en terre à base de chaux est une des propriétés les plus importantes pour l'évaluation de la durabilité des constructions en terre. La figure 3.20 présente l'effet de la teneur en fibres de palmier dattier sur le gonflement à l'eau du BXPD. D'après cette figure, le gonflement des BXSF a sa plus faible valeur pour 10 % en chaux, alors que sa plus grande valeur coïncide avec le cas de 12 % en chaux. Ce résultat est

la conséquence de l'effet de l'absorption d'eau sur la terre stabilisée (Oti,2009). On remarque aussi le gonflement augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres, et la plus grande valeur coïncide avec le cas de 0,02 % en fibres avec un gonflement de 0,55 %, 0,43 % et 0,66 % pour 8 %, 10 % et 12 % successivement. En comparant ces résultats avec ceux de la stabilisation au ciment, on constate que les BXPB sont plus sensible à l'eau.

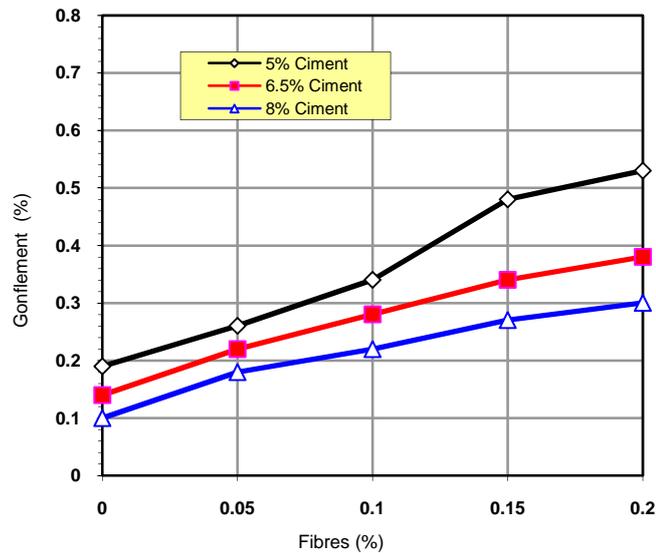


Fig. 3.19 : Le gonflement du BCPD par immersion à l'eau en fonction de la teneur en fibres pour une contrainte de compactage de 10 MPa).

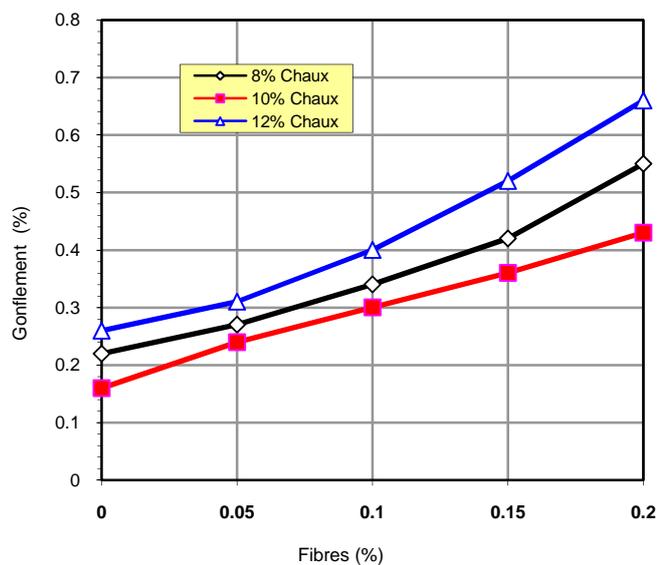


Fig. 3.20 : Le gonflement par immersion à l'eau du BXPB curé 28 jours au laboratoire en fonction de la teneur en fibres pour une contrainte de compactage de 10 MPa).

3.5 Effet de la teneur en fibres de polypropylène sur les propriétés mécaniques du BTC

Pour objectif de comparaison avec l'effet l'utilisation des fibres de palmier dattier, cette partie s'est focalisée sur les BTC à base de 8 % en ciment avec une contrainte de compactage de 10 MPa.

3.5.1 La résistance à la compression sèche

La figure 3.21 présente la variation de la résistance à la compression sèche du BCPP en fonction de la teneur en fibres de polypropylène. Au départ on remarque que la valeur de RCS s'étale entre 12 MPa et 14.4 MPa. On constate de cette figure que la résistance du BCPP est meilleure que celle du BCSF, contrairement à ce qu'on a obtenu pour le cas des fibres de palmier dattier. Comparativement au BCSF, l'augmentation de RCS est 10 %, 16.6 %, 18.3 % et 20 % pour une teneur en fibres successivement de : 0.05 %, 0.1 %, 0.15 % et 0.2 %.

Ce résultat confirme celui obtenu par Cai et al. (Cai,2006) et Elenga et al. (Elenga, 2011). Maher et al. (Maher,1994) et Jadhao et al. (Jadhao,2008) ont montré que l'introduction des fibres de polypropylène avec une distribution aléatoire conduit à une augmentation significative de la résistance à la compression, de la résistance à la flexion et de la ductilité du sol et du mélange sol /cendres volantes. Cette augmentation de la résistance est due au faible comportement élastique que les fibres de polypropylène donnent au mélange après déchargement, à cause de la faible section de la fibre (30 microns²). Cette interprétation est soutenue par l'avis de Binici et al. (Binici,2005), qui ont attribué à l'amélioration de la résistance à la compression à la géométrie des fibres. Une autre raison a été citée par Prasad et al. (Prasad,2012), il s'agit de la résistance à l'arrachement des fibres.

3.5.2 La résistance à la traction sèche

La figure 3.22 illustre la variation de la résistance à la traction sèche en fonction du BTC à base de ciment en fonction de la teneur en fibres de polypropylène. On constate d'après ces résultats, comme pour le cas de RCS, que la RTS augmente significativement avec l'augmentation de la teneur en fibres de polypropylène. On enregistre une augmentation 25 %, 33.7 %, 33.1 % et 38.7 % pour une teneur en fibres successivement de : 0.05 %, 0.1 %, 0.15 % et 0.2 %. La résistance à la traction maximale du BCPP est de 2.22 MPa pour le cas de 0.2 % en fibres, alors que celle du BTC sans fibres est la plus faible avec 1.6 MPa. On remarque (figure 3.22) qu'il y a peu de variation de la résistance entre 0.15 % et 0.2 % en fibres, ce qui nous indique qu'une augmentation de la teneur en fibres ne veut pas dire une

augmentation automatique de la résistance, mais elle nécessite une étude plus approfondie. Pour la justification de cette augmentation de la RTS, on peut se fier aux mêmes arguments cités dans le cas de la résistance à la compression. Ces résultats confirment ceux de Maher et al. (Maher,1994) et Jadhao et al. (Jadhao,2008) obtenus sur la résistance à la flexion.

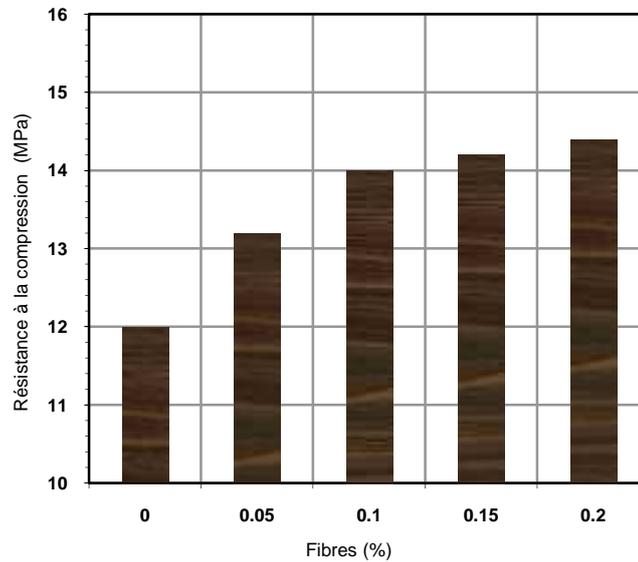


Fig. 3.21 : Résistance à la compression sèche du BCPP à base de 8 % en ciment en fonction de la teneur en fibres de polypropylène (pour une contrainte de compactage de 10 MPa)

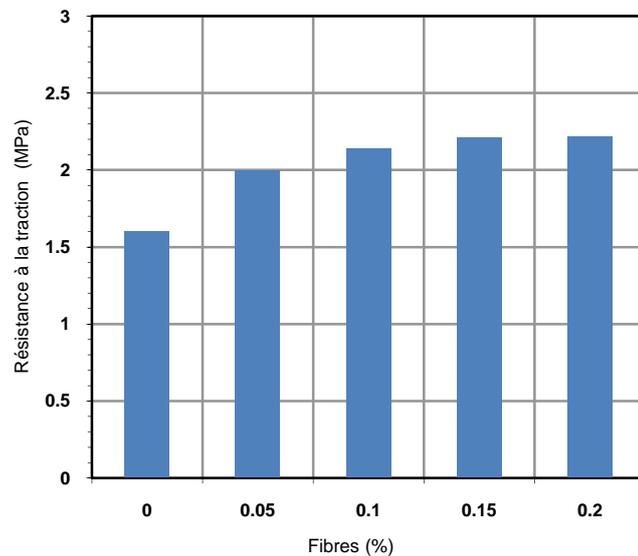


Fig. 3.22 : Résistance à la traction sèche du BCPP à base de 8 % en ciment en fonction de la teneur en fibres de polypropylène (pour une contrainte de compactage de 10 MPa)

3.6 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.

3.6.1 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 3.23.

On constate à partir de figure 3.23 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.

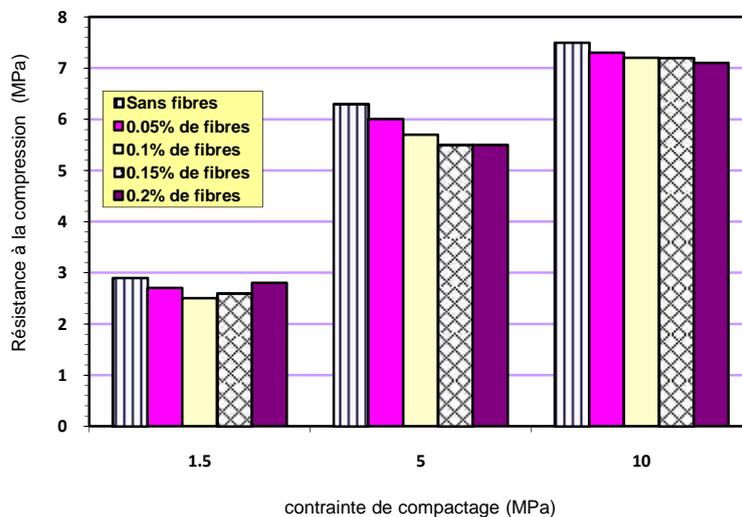


Fig. 3.23: Effet de la contrainte de compactage sur la résistance à la compression sèche du BCPD à base de 5% de ciment.

3.6.2 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).

Pour les blocs fibrés, on constate à partir de la figure 3.24 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 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 (R_{CS} / R_{CH}) avec la contrainte de compactage. Pour tous les BTC testés, on a constaté une diminution du rapport R_{CS} / R_{CH} 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.

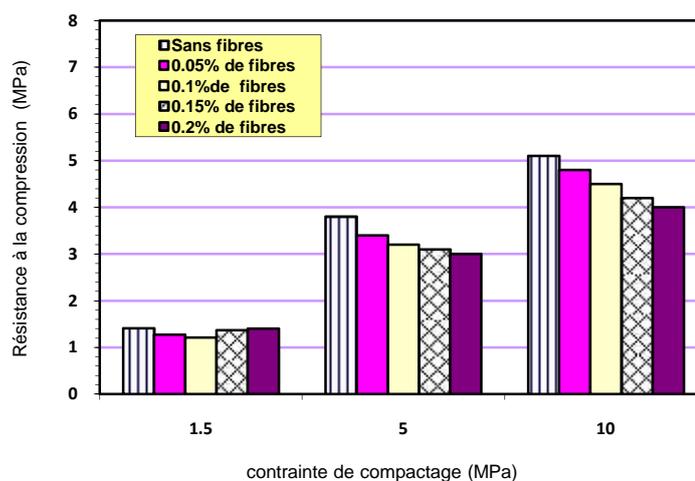


Fig. 3.24: Effet de la contrainte de compactage sur la résistance à la compression humide du BCPD.

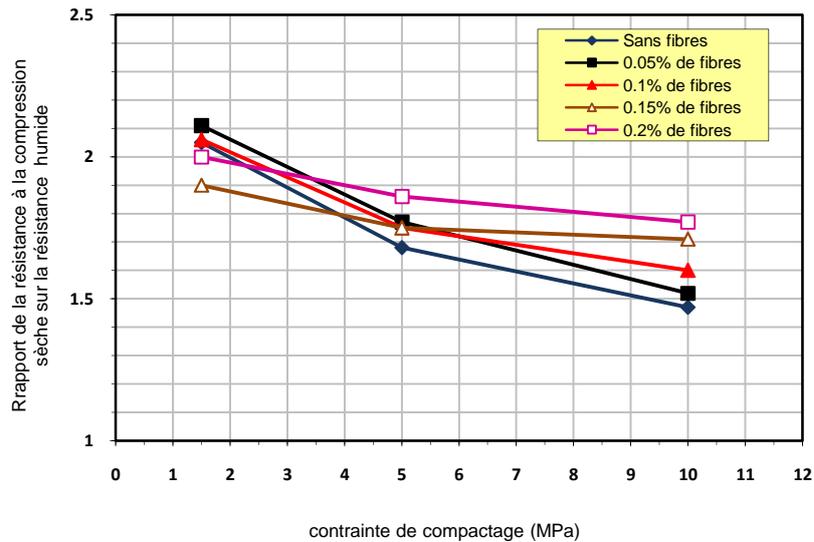


Fig. 3.25 : Effet de la contrainte de compactage sur le rapport de la résistance à la compression sèche sur la résistance humide du BCPD à base de 5% de ciment.

3.6.3 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.

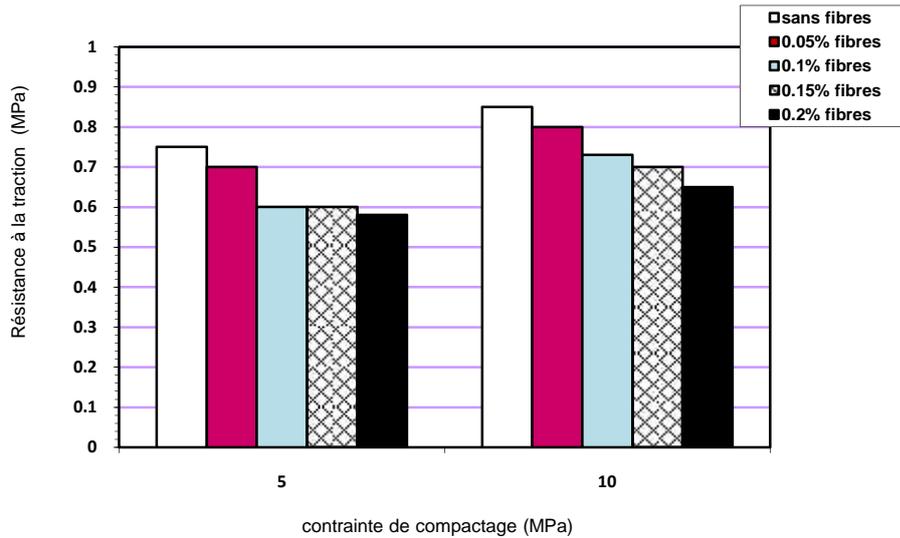


Fig. 3.26: Effet de la contrainte de compactage sur la résistance à la traction sèche du BCPD à base de 5% de ciment.

3.6.4 L'absorption totale

On constate à travers les résultats illustrés sur la figure 3.27, que les valeurs de l'absorption totale d'eau pour les BCPD ont dépassé le seuil de 12 % pour une contrainte de compactage de 5 MPa, qui est considérée par la norme britannique (British Standards, 1985) comme la limite des valeurs modérées. La figure 3.27 montre une diminution de l'absorption totale d'eau avec l'augmentation de la contrainte de compactage. Cette diminution de l'ATE qui s'étale entre 11 % et 13.17 %, est attribuée à la diminution de la porosité suite à l'augmentation de la contrainte de compactage.

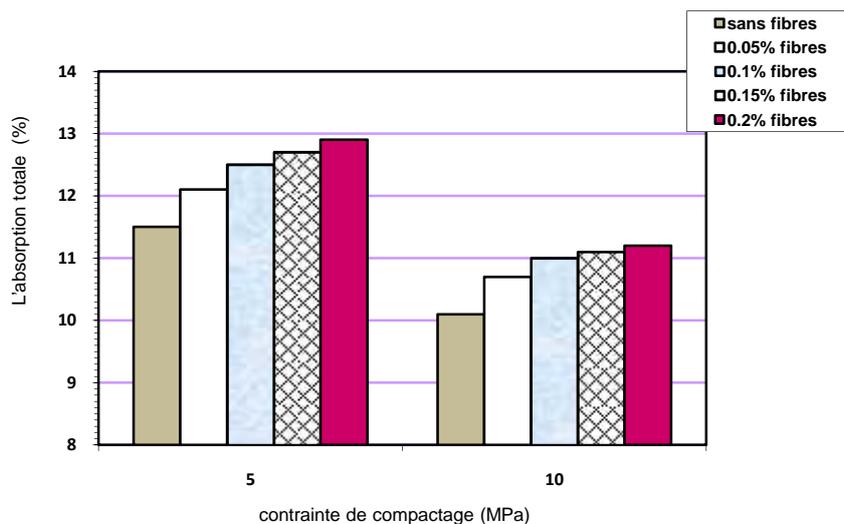


Fig. 3.27: Effet de la contrainte de compactage sur l'absorption totale du BCPD à base de 5% de ciment après un jour d'immersion dans l'eau.

3.6.5 Le gonflement

Effet de la contrainte de compactage sur le gonflement du BTC avec fibres à base de 5% de ciment est présenté sur la figure 3.28.

Les résultats de la figure 3.28 nous montrent une diminution du gonflement avec l'augmentation de la contrainte de compactage. Pour les BCSF, on constate une diminution du gonflement d'un taux de 32 %, alors que les BCPD ont subi une diminution du gonflement des taux suivants : 35 %, 39 %, 39,2 % et 37 % pour une teneur en fibres successivement de : 0.05 %, 0.1 %, 0.15 % et 0.2 %.

Cette diminution est expliquée à la fois par, la diminution du taux d'absorption d'eau et aussi par la réduction du volume des fibres après l'augmentation de la contrainte de compactage.

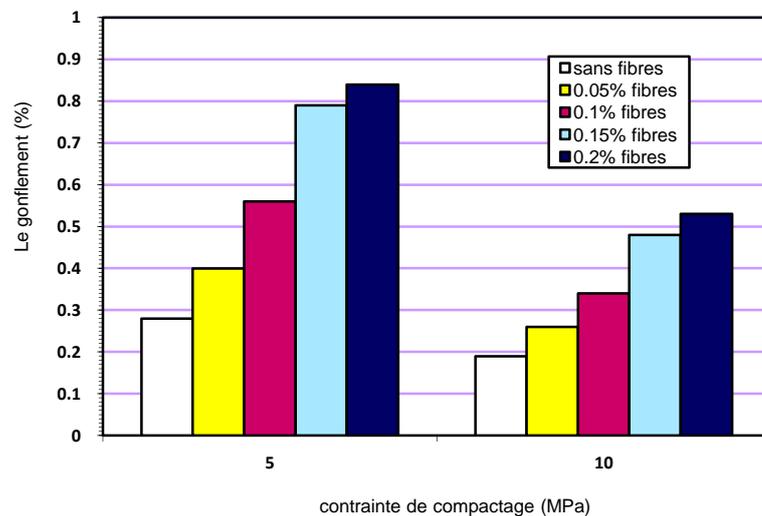


Fig. 3.28 : Effet de la contrainte de compactage sur le gonflement par immersion à l'eau du BCPD à base de 5% de ciment.

3.7 Effet du traitement chimique des fibres de palmier dattier sur les propriétés du BTC

D'après la recherche bibliographique effectuée au chapitre 1, un traitement alcalin à la soude pour enlever la lignine (généralement présente dans la lamelle mitoyenne), la pectine et les cires recouvrant la surface externe provoque une augmentation de la rugosité de surface, un gonflement, une stabilisation des fibres et une réduction de la tendance hydrophile, comme l'a constaté Baley (Baley,2004). Dans ce contexte, et en vue d'améliorer les caractéristiques adhésives de la surface des fibres en éliminant les impuretés, on s'est basé sur l'étude de Alsaed et al. (Alsaed, 2013), en traitant les fibres de palmier dattier dans une solution de soude avec une concentration de 6% à la température ambiante du laboratoire pendant 24h.

L'étude s'est intéressée seulement aux propriétés mécaniques des BTC, à savoir les résistances RCS, RCH et RST.

3.7.1 La résistance à la compression sèche

L'étude des BTC à base de chaux, stabilisés avec des fibres de palmier dattier brutes et traitées, a révélé les résultats illustrés sur la figure 3.29, qui présente la variation de la résistance à la compression sèche en fonction de la teneur en fibres. On constate qu'à l'exception du cas de 0.05 en fibres, où on observe une faible augmentation de RCS qui est de l'ordre de 4% comparativement à la résistance d'un BTC sans fibres, le traitement chimique des fibres n'a pas amélioré la résistance, au contraire, on a enregistré une baisse de cette résistance pour le reste des cas étudiés, malgré que ces résultats soient légèrement supérieurs à ceux des BTC stabilisés avec des fibres brutes. On enregistre aussi que la plus faible valeur de RCS coïncide avec 0.2 % en fibres brutes ou traitées.

Ceci nous montre que malgré les résultats favorables obtenus par Alsaeed et al. (Alsaeed, 2013), en utilisant le traitement des fibres de palmier dans une solution de soude avec une concentration de 6% dans une étude menée sur un composite de fibres de palmier dattier avec une matrice polymère, on constate dans notre étude l'inefficacité du traitement des fibres végétales à la solution de soude à améliorer l'adhérence fibres/sol stabilisé à la chaux, affectée défavorablement avec l'application du mode de compactage. Ces résultats confirment l'avis de Rigassi (Rigassi, 1995).

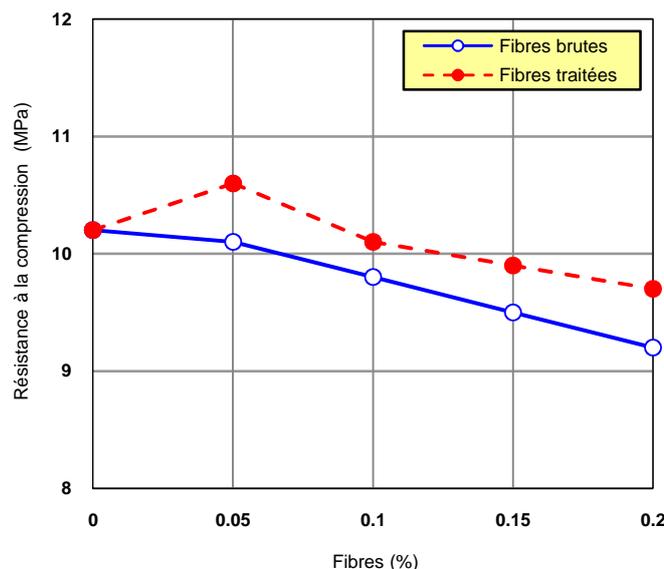


Fig. 3.29 : Résistance à la compression sèche du BXPB à base de 10 % en chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibres de palmier dattier brutes et traitées (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).

3.7.2 La résistance à la compression humide

En vue d'étudier la sensibilité à l'eau du bloc de terre comprimée à base de chaux stabilisée par des fibres de palmier dattier traitées, on a soumis les blocs à l'essai de compression selon la norme XP P 13-901. Les résultats des essais sont présentés sur la figure 3.30 sous forme de variation de la résistance à la compression humide RCH en fonction de la teneur en fibres.

Comme pour le cas de la compression à l'état sec, la présence des fibres traitées a provoqué une baisse de RCH comparativement au BXSf, mais cette fois pour l'ensemble des teneurs en fibres utilisées, ce qui confirme une autre fois que le traitement des fibres de palmier dattier n'a aucun effet dans l'amélioration du taux de transfert de charges de la matrice au fibres, ce qui veut dire que le problème de la faible adhérence dans l'interface fibre/matrice persiste toujours. On remarque aussi que les valeurs de RCH des BTC avec fibres traitées dépassent celles des BXPd avec fibres brutes avec les taux suivants: 3 %, 8 %, 8.3 % et 6.5 % pour une teneur en fibres successivement de : 0.05 %, 0.1 %, 0.15 % et 0.2 %.

Mais malgré cette diminution de RCH du BTC avec fibres traitées ou brutes, la RCH est toujours supérieure à la valeur minimale recommandée qui est entre 1.2 MPa et 2.8 MPa (Houben,1994).

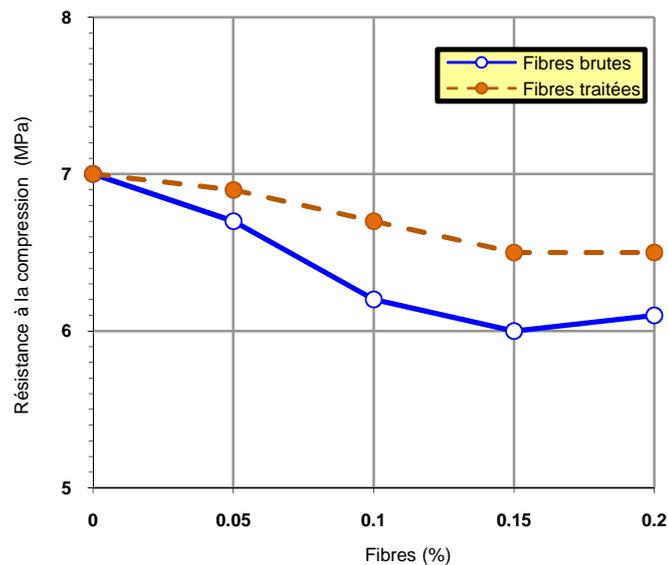


Fig. 3.30 : Résistance à la compression humide du BXPd à base de 10 % en chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibres de palmier dattier brutes et traitées (pour une contrainte de compactage de 10 MPa)

3.7.3 La résistance à la traction sèche

La figure 3.31 illustre la variation de la résistance à la traction sèche du BTC à base de 10 % en chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibres de palmier dattier brutes et traitées (pour une contrainte de compactage de 10 MPa).

En analysant les résultats obtenus, on constate que la RTS du BXSf est 7 fois plus faible que la RCS. La figure 3.31 montre que, comparativement au BXSf, la RTS des BXPD présente une légère baisse pour l'ensemble des teneurs en fibres utilisées. La plus faible valeur de RTS est enregistrée pour 0.2 % en fibres, avec 6.7 % en fibres brutes et 4.1 % fibres traitées. On remarque aussi que les BTC renforcés par des fibres traitées sont caractérisés par une RTS peu élevée par rapport à celle des BTC avec des fibres brutes.

Avec un traitement à la solution de soude, on s'attendait à obtenir des fibres qui possèdent des caractéristiques adhésives de la surface en éliminant les hémicelluloses, cires et graisses, laissant ainsi apparaître des fibrilles de cellulose parfaitement alignées. La surface des fibres apparaît donc chimiquement plus homogène et également plus rugueuse, donc une meilleure résistance à la traction ou à la flexion, comme il a été montré par la littérature du composite (Hamada, 1994), (Valadez, 1999), (Joshy, 2007) et (Alsaed, 2013), mais les résultats obtenus ont une tendance adverse. On pense que cette faible adhésion des fibres à la matrice est le résultat de la décompression après décharge du mélange sol/fibres compacté, comme mentionné par Rigassi (Rigassi, 1995).

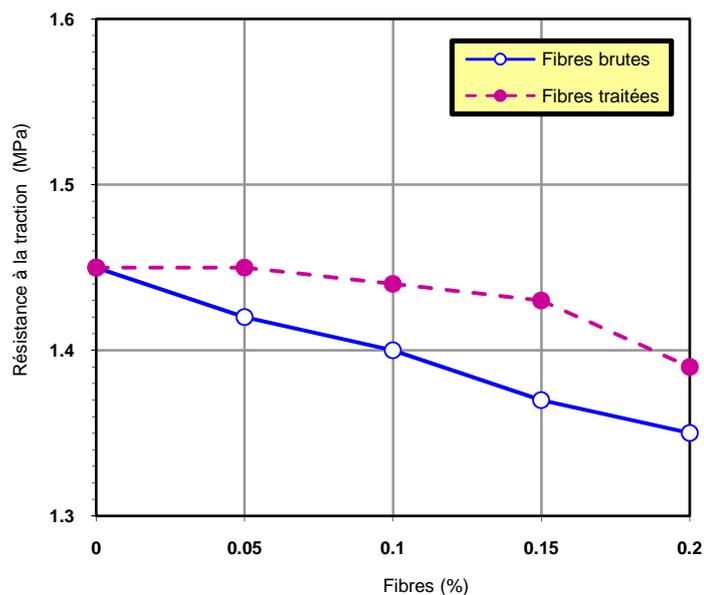


Fig. 3.31 : Résistance à la traction sèche du BTC à base de 10 % en chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibres de palmier dattier brutes et traitées (pour une contrainte de compactage de 10 MPa)

3.8 Comportement mécanique du BTC fibré

En vue de voir la contribution des fibres au comportement en compression du BTC fibré à base de ciment ou de chaux, on s'est intéressé à étudier l'utilisation des fibres de palmier dattier brutes ou traités, ainsi avec des fibres de polypropylène. Cette étude nous a permis de déterminer pour blocs étudiés le module d'Young qui est déterminé à partir de la partie élastique de la courbe, il correspond au coefficient directeur de la pente à l'origine.

3.8.1 Fibres de palmier dattier

3.8.1.1 Fibres brutes

Tout d'abord on commence par l'étude du comportement du BCPD à base de 8 % en ciment et avec l'utilisation de différents teneurs en fibres de palmier dattier brutes, avec une contrainte de compactage de 10 MPa.

La figure 3.32 illustre l'évolution des contraintes de compression en fonction de la déformation pour différents teneurs en fibres. La loi de comportement du BTC non fibrée est également présentée à titre de témoin. Concernant la phase élastique, pour l'ensemble des BTC étudiés, on observe pour le BCSF un comportement linéaire avec une pente peu différente de celle des BCPD, donc on peut dire que dans cette phase, c'est la matrice qui reprend presque la totalité des efforts à cause de la faible adhérence entre la matrice et le renfort. Avec l'augmentation des contraintes on observe un comportement non linéaire jusqu'à la contrainte de rupture. On remarque qu'il y a peu de variation de la contrainte de rupture avec l'augmentation de la teneur en fibres, sauf pour le cas de 0.05 % en fibres. Le BCSF est le sujet d'une rupture juste après qu'il a atteint une contrainte maximale, ce qui veut dire qu'il a un caractère fragile. La déformation à la rupture pour l'ensemble des blocs étudiés s'étale entre 1.6 % et 2.2 %. Malgré l'effet négatif de l'incorporation des fibres sur la contrainte de rupture du composite, on constate qu'il y a une amélioration du comportement post-contrainte de rupture du BTC, en augmentant sa ductilité par rapport au comportement fragile de la matrice seule. Ceci peut être expliqué par la redistribution des efforts internes de la matrice vers les fibres (Galán-Marín, 2010).

La figure 3.33 présente la variation du module d'élasticité longitudinale (module de Young E) du BTC à base de ciment en fonction de la teneur en fibres de palmier dattier. Les résultats montrent que la valeur du module de Young varie entre 930 MPa et 1063

MPa. Ces valeurs se trouvent dans l'intervalle destiné pour les produits en terre qui s'étale entre 700 MPa et 7000 MPa (Doat, 1979). On constate aussi que le module de Young pour le BTC avec 0.05 % en fibres dépasse celui de du BTC non fibré de 14,3 %.

3.8.1.2 Fibres traitées

Ce paragraphe est consacré à l'étude de l'effet du traitement chimique à la soude des fibres de palmier dattier (fibres végétales) sur le comportement mécanique du BXPD à base de 10 % en chaux. Les résultats obtenus, présentés sur la figure 3.34, illustre l'évolution des contraintes de compression en fonction de la déformation pour 0.1 % en fibres brutes et traitées, cette figure présente aussi les résultats du BXSf comme témoin et elle nous montre que la présence de 0.1 % en fibres brutes ou traitées n'a pas amélioré la rigidité du composite ou la contrainte de rupture. Ce phénomène est probablement dû au mode de compactage appliqué en fabriquant les blocs. Le seul avantage des fibres, notamment les fibres traitées, c'est qu'elles confèrent au composite un comportement ductile. On observe aussi que le composite à base de fibres traitées est plus ductile qu'avec l'incorporation des fibres brutes et présente aussi une contrainte de rupture légèrement supérieure. On constate d'après la figure 3.34, que la contrainte résiduelle des fibres traitées est supérieure à celle des fibres brutes.

Ce résultat n'est pas en adéquation avec celui obtenu par LE Troedec (LE Troedec, 2009). L'auteur a constaté que le traitement à la soude des fibres de chanvre a permis d'accroître la contrainte maximale du composite de 17 %, comme il a permis également d'améliorer de 39 % la rigidité des matériaux par rapport à des fibres non traitées. Mais il faut mentionner un détail très important, il s'agit de l'absence totale du compactage lors de la fabrication des échantillons.

Dans le même contexte, la figure 3.35 présente la variation du module de Young selon que les fibres sont traitées ou non. On constate aussi sur cette figure que la rigidité de la matrice seule dépasse respectivement de 8.6 % et 13 % celle du composite à base de fibres traitées et brutes.

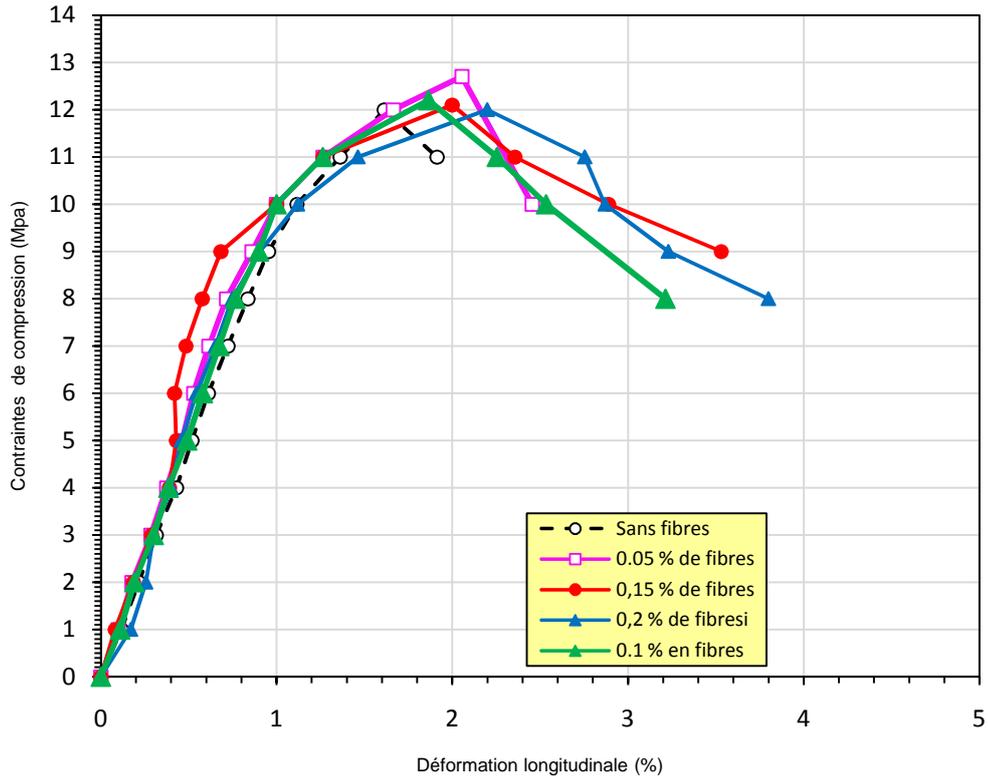


Fig. 3.32 : Diagramme contrainte- déformation du BCPD à base de 8% en ciment renforcé avec fibres brutes.

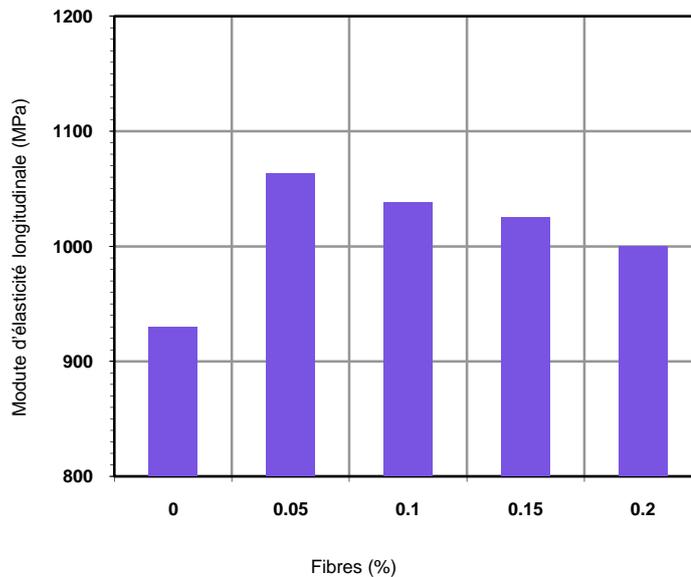


Fig. 3.33: Variation du module d'élasticité longitudinale du BCPD à base de 8% en ciment et fonction de la teneur en fibres de palmier dattier brutes.

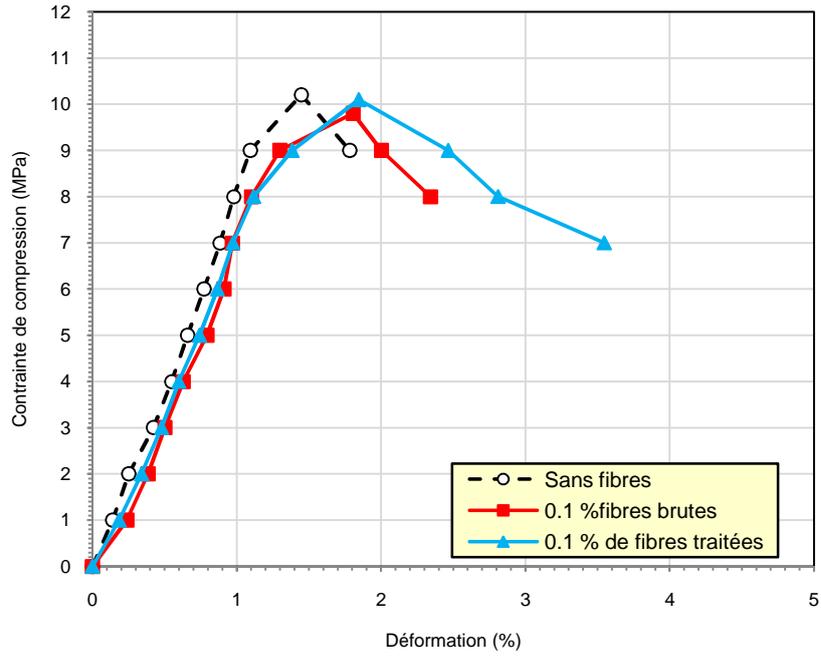


Fig. 3.34 : Diagramme contrainte- déformation du BXP à base de 10 % en chaux renforcé avec 0.1 % de fibres de palmier dattier brutes et traitées.

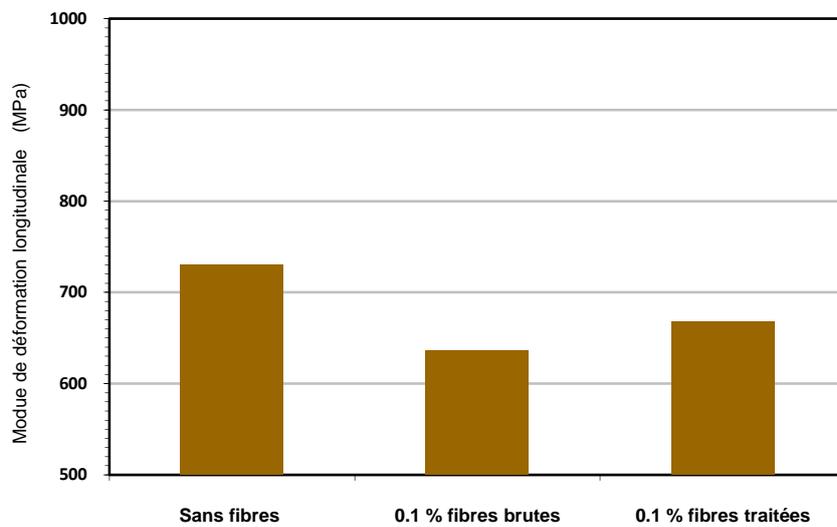


Fig. 3.35 : Variation du module d'élasticité longitudinale du BXP à base de 10 % en chaux en fonction de la teneur en fibres de palmier dattier brutes et traitées.

3.8.2 Fibres de polypropylène

Contrairement au BTC renforcé par des fibres de palmier dattier (brutes ou traitées), le bloc à renfort en fibres de polypropylène dont le diagramme contrainte-déformation est présenté sur la figure 3.36, nous montre que la contrainte de rupture augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres. On constate aussi sur cette figure, qu'avec l'augmentation de la contrainte, on observe une augmentation de la déformation jusqu'à l'atteinte de la contrainte de rupture. On remarque aussi que l'introduction des fibres dans le mélange réduit la fragilité du bloc, donc elles augmentent sa ductilité. La déformation à la rupture s'étale entre 1.6 % et 3.27 %. On observe aussi une augmentation de la résistance résiduelle en augmentant la teneur en fibres. Comparativement avec le BTC à base de fibres de palmier dattier, celui des fibres de polypropylène présente des déformations plus importantes avant que le matériau se rompe, par conséquent il présente une ductilité meilleure.

La figure 3.37 illustre la variation du module de Young E en fonction de la teneur en fibres. L'analyse de cette figure nous montre que la présence des fibres de polypropylène améliore la valeur du module de Young E, par conséquent le composite est plus rigide qu'avec la matrice seule. La valeur du module de Young enregistrée varie entre 930 MPa et 1941 MPa.

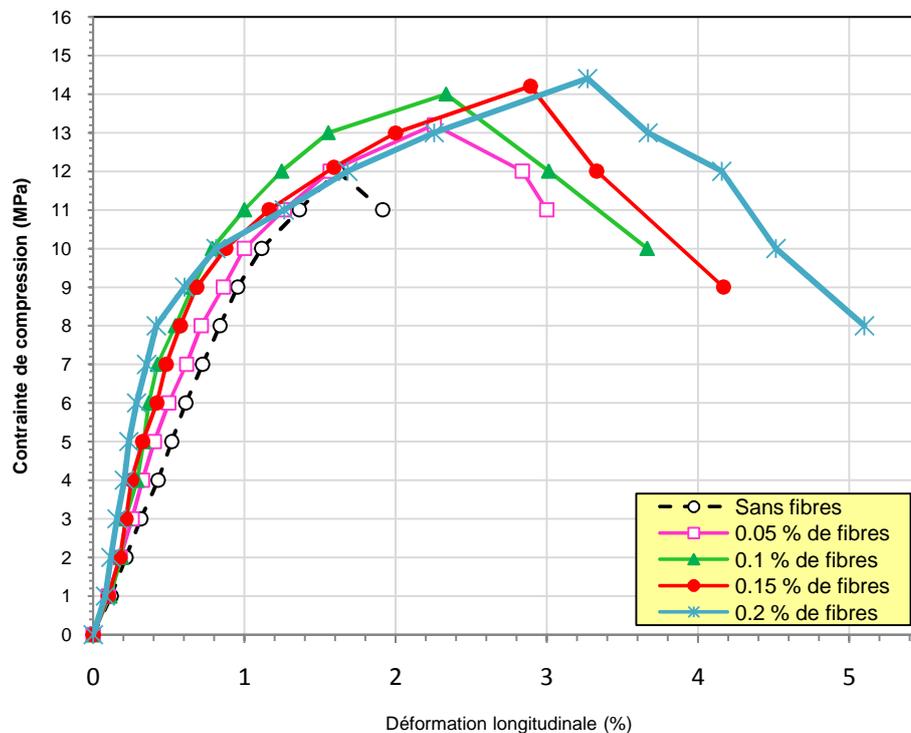


Fig. 3.36 : Diagramme contrainte- déformation du BCPP à base de 8% en ciment renforcé avec des fibres de polypropylène.

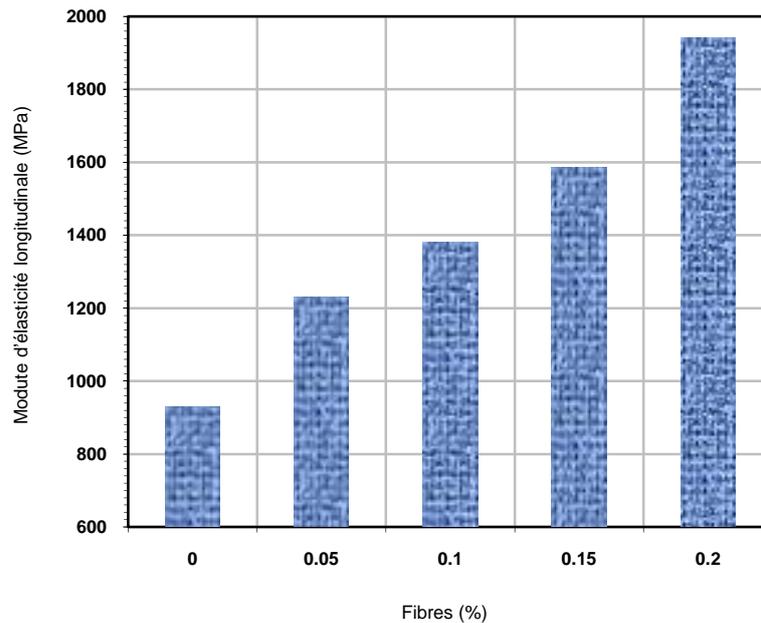


Fig. 3.37: Variation du module d'élasticité longitudinale du BCPP à base de 8% en ciment en fonction de la teneur en fibres de polypropylène.

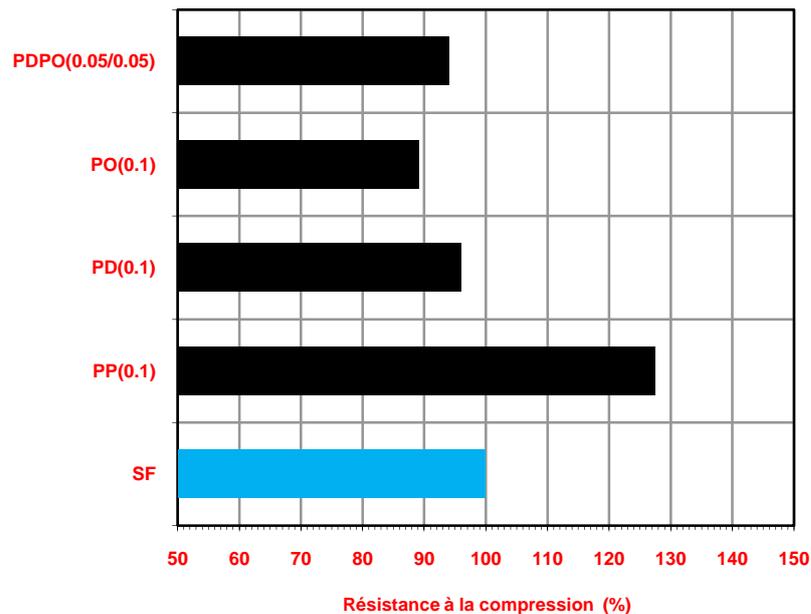
3.9 Effet du type de fibres sur les propriétés mécaniques du BTC à base de chaux

Nous avons étudié jusqu'ici d'une manière indépendante, l'effet de la présence des fibres de palmier dattier et des fibres de polypropylène sur le BTC. Et pour mieux comprendre l'efficacité des fibres naturelles ou synthétiques les unes par rapport aux autres, on propose d'étudier outre l'effet des fibres citées précédemment, l'effet de la paille d'orge hachée sur la résistance à la compression et à la traction sèche du BTC à base de 10 % en chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa). Pour que la comparaison soit logique, on a maintenu 0.1 % comme teneur en fibres pour l'ensemble des composites réalisés.

3.9.1 La résistance à la compression sèche

La figure 3.38 illustre la variation de la résistance à la compression sèche du BTC à base de 10 % en chaux en fonction des différents types et teneurs en fibres. En examinant cette figure, on constate que la RCS maximale est donnée par le composite à base de polypropylène dépassant de 27.45 % la RCS du BTC sans fibres utilisé comme témoin, alors que la plus faible RCS est celle obtenue avec la paille d'orge hachée avec 10.8 % de moins de la RCS du témoin. L'analyse des résultats nous montre que la RCS du BTC avec renfort de

fibres de palmier dattier dépasse de 7.1 % et 2 % celle avec renfort en paille d'orge hachée PO(0.1) et avec une combinaison des fibres de palmier dattier et la paille d'orge hachée PDPO(0.5/0.5). Ce résultat s'explique par l'augmentation de la porosité causée par le diamètre de la paille et son absorption d'eau qui sont plus importants que ceux des fibres de palmier dattier. Donc on peut classer les composites étudiés selon l'ordre décroissant de la RCS comme suit : PP(0.1), PD(0.1), PDPO(0.5/0.5) et PO(0.1).



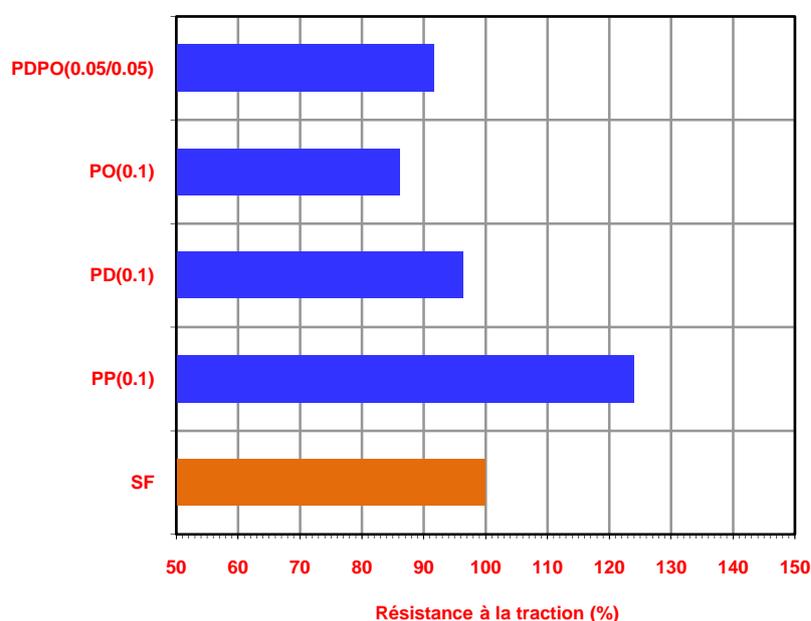
SF : sans fibres ;
 PP(0.1) : 0.1 % de fibres de polypropylène ;
 PD(0.1) : 0.1 % de fibres de palmier dattier ;
 PO(0.1) : 0.1 % de paille d'orge hachée ;
 PDPO(0.05/0.05) : 0.05 % de fibres de palmier dattier + 0.05 % de paille d'orge hachée

Fig. 3.38 : Résistance à la compression sèche du BTC à base de 10 % en chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de différent type et teneurs en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa)

3.9.2 La résistance à la traction sèche

La figure 3.39 présente la variation de la résistance à la traction sèche du BTC à base de 10 % en chaux en fonction de différents types et teneurs en fibres. Il semble que la RTS a suivi presque la même variation observée dans le cas de la compression. Les valeurs de la RTS s'étalent entre de 86,2 % et 124,1 % de la résistance à la traction du BTC non fibré. On

remarque aussi que le composite à renfort en fibre de polypropylène présente la RST la plus élevée comparativement aux autres cas étudiés. Ceci est dû à la résistance à la traction élevée des fibres de polypropylène seules, qui est au voisinage de 350 MPa (Tang,2007) , comparativement à celle des fibres de palmier dattier qui est égale à 170 MPa (Kriker ,2005), et aussi à leur faible diamètre, ce qui atténue l'effet défavorable du compactage sur les fibres. On constate aussi que les composites à renfort en fibres végétales sont caractérisés par une RTS plus faible que celle de la matrice seule. Les résultats de la figure 3.39 montrent que la RST du composite à renfort en palmier dattier est légèrement supérieure à celle du composite à renfort en paille d'orge hachée ou la combinaison des deux.



SF : sans fibres ;
PP(0.1) : 0.1 % de fibres de polypropylène ;
PD(0.1) : 0.1 % de fibres de palmier dattier ;
PO(0.1) : 0.1 % de paille d'orge hachée ;
PDPO(0.05/0.05) : 0.05 % de fibres de palmier dattier + 0.05 % de paille d'orge hachée

Fig. 3.39 : Résistance à la traction sèche du BTC à base de 10 % en chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibres (pour une contrainte de compactage de 10 MPa)

3.10 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier la possibilité d'améliorer les propriétés mécaniques et le degré d'insensibilité à l'eau du bloc de terre comprimée BTC, en incorporant différents types de fibres (naturelles et synthétiques), mais l'intérêt majeur est donné aux fibres végétales et plus précisément les fibres de palmier dattier. Pour une meilleure stabilisation du BTC, on a utilisé de stabilisants chimiques à savoir le ciment et la chaux. Pour ce dernier stabilisant, sachant qu'il est caractérisé par une réaction pouzzollanique lente, une étude de temps et de mode de cure a été élaborée, en vue de réduire le temps de conservation des BTC à base de chaux en attendant qu'ils atteignent une résistance acceptable pour la construction des murs en terre.

Les résultats de cette étude expérimentale nous ont permis de dégager les conclusions principales suivantes :

- La cure à l'étuve des BTC à base de chaux a donné les meilleures résistances à la compression sèche et humide et à la traction, comparativement à la cure au laboratoire et à la cure à vapeur naturelle;
- La cure à vapeur naturelle a présenté un gain de résistance et de durée de conservation des BTC fibré à base de chaux, comparativement à la cure au laboratoire. Ce résultat a été obtenu sans dépense d'énergie, d'où son intérêt économique comparée à la cure à l'étuve;
- La résistance mécanique du BTC fibré à base de chaux augmente avec l'augmentation du temps de cure, et le meilleur résultat a été enregistré après 7 jours de cure à l'étuve;
- Une réduction de la masse volumique apparente du BTC avec l'augmentation de la teneur en fibres a été observée. Mais malgré cette observation, on doit mentionner que cette réduction est très faible comparativement à celle du BTC sans fibres;
- L'ajout des fibres de palmier dattier a conduit à une légère amélioration de la résistance à la compression sèche RCS, enregistrée pour les blocs renforcés avec 0,05% de fibres, stabilisés avec 8% en ciment et compacté à une contrainte de 10 MPa. Mais pour le reste des cas étudiés, l'ajout des fibres a conduit à une légère baisse de RCS;
- La RCS des BTC fibré augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment;

- L'augmentation de la teneur en chaux de 8 % à 10 % a conduit à une augmentation de la RCS de l'ordre de 5 %, alors qu'avec une augmentation de la teneur en chaux de 10 % à 12 % on assiste à une baisse de la résistance de 8,15 %;
- En comparant la RCS des BTC à base de chaux avec celle à base de ciment, on constate une réduction générale de l'ordre de 34 %;
- Une baisse générale de la RCS du BTC à base de chaux avec l'ajout des fibres de palmier dattier;
- Une baisse générale de la résistance à la compression humide RCH avec l'augmentation de la teneur en fibres pour tous les BTC testés comparativement aux blocs sans fibres, et la valeur la plus faible coïncide avec 0.2 % en fibres pour les différentes teneurs en liant (ciment ou chaux);
- Le rapport de la résistance à la compression sèche sur la résistance à la compression humide pour tous les BTC étudiés n'a pas dépassé 2, qui est la limite recommandée par certains auteurs (Houben,2006);
- Une baisse générale de la résistance à la traction sèche RTS pour les BTC à base de ciment, alors que pour le cas de la chaux, une faible augmentation pour 0.05 % en fibres pour 8 % et 12 % successivement est observée;
- La RTS est environ 700% et 530 % de moins que la RCS pour les BTC à base de ciment et de chaux successivement;
- L'absorption totale d'eau ATE du BTC à base de ciment ou de chaux augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres de palmier dattier, comme elle augmente dans le temps;
- L'ATE des BTC à base de ciment augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment, alors que pour l'utilisation de la chaux comme stabilisant, on remarque une faible diminution lorsque la teneur en chaux passe de 8 % à 10 % l'ATE, alors qu'après 10 % on constate une augmentation significative de l'ATE;
- L'ATE de tous les BTC étudiés n'a pas dépassé 15 %, qui est la limite recommandée par l'organisation suisse « International Labour Organisation » (ILO, 1987);
- Le gonflement des BTC augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres et diminue avec l'augmentation de la teneur en ciment. Pour le cas de la chaux, le gonflement le plus faible est enregistré pour une teneur de 10 % en chaux;

- Une augmentation de la RCS et de la RTS avec l'augmentation de la teneur en fibres est enregistrée, pour des BTC à base de 8 % en ciment et à renfort en fibres de polypropylène;
- L'augmentation de la contrainte de compactage a conduit à une augmentation de la RCS, de la RCH et la de RTS et une diminution de l'absorption totale d'eau ATE et le gonflement des BTC à base de ciment et de fibres de palmier dattier ;
- l'exception du cas de 0.05 en fibres, où on observe une légère augmentation de la RCS comparativement à la résistance du BTC non fibré à base de chaux, le traitement à la solution de soude des fibres de palmier dattier n'a pas amélioré la résistance mécanique des BTC fibré (RCS, RCH et RTS), au contraire, on a enregistré une baisse de cette résistance pour le reste des cas étudiés, malgré que ces résultats soient légèrement supérieurs à ceux des BTC stabilisés avec des fibres brutes ;
- L'incorporation des fibres de palmier dattier brutes, d'une part a un effet négatif sur la contrainte de rupture du BTC fibré à base de ciment, et d'autre part elle a un effet positif sur le comportement post-contrainte de rupture du BTC, en augmentant sa ductilité par rapport au comportement fragile de la matrice seule;
- Le module de Young pour le BCPD avec 0.05 % en fibres dépasse celui de du BCSF de 14,3 %;
- Le composite à base de fibres traitées est plus ductile qu'avec l'incorporation des fibres brutes et présente aussi des contraintes de rupture et résiduelle légèrement supérieures;
- La module de Young de la matrice seule dépasse respectivement de 8.6 % et 13 % celle du composite à base de 0.1 % en fibres de palmier dattier traitées et brutes.
- titre de comparaison, l'étude du comportement mécanique du BTC à base de ciment et à renfort en fibres de polypropylène, a révélé qu'il y a une augmentation de la contrainte de rupture et de la résistance résiduelle en augmentant la teneur en fibres, en plus le composite a présenté un comportement ductile meilleur que celui du composite à renfort en fibres de palmier dattier;
- Le classement des composites à différents types de fibres selon l'ordre décroissant de la résistance mécanique (RCS et RTS) est comme suit : 0.1 % en fibres de polypropylène, 0.1 % en fibres de palmier dattier, mélange de fibres de palmier dattier et de paille d'orge hachée (0.05 % + 0.05 %), 0.1 % en paille d'orge hachée.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

. La terre crue est utilisée dans la construction depuis les temps les plus reculés, comme en témoigne l'habitat traditionnel en de nombreux points de notre planète, vu son intérêt économique et sa facilité d'exploitation. Après avoir été abandonnée et oubliée avec l'avènement des matériaux de construction industriels, en particulier le béton et l'acier, elle fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt dans les pays en développement comme dans les pays industrialisés.

A travers le patrimoine mondial de construction en terre, on dénombre plusieurs techniques d'utilisation de terre pour la construction : l'adobe, le pisé, le torchis, la terre-paille, la bauge, la terre façonnée, la terre extrudée, la terre comprimée.....etc.

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

Le renforcement des matériaux de construction par des fibres naturelles fut très tôt utilisé dans l'histoire. Les blocs de terre crue renforcée par de la paille est un exemple qui remonte à plusieurs milliers d'années. Pourtant, le passage de ces utilisations traditionnelles à un développement technologique de composites renforcés par des fibres végétales pour des utilisations en bâtiment est relativement récent. Il remonte au début des années 1970. Dès lors, de très nombreuses études ont été menées sur tous les continents pour utiliser des fibres de renforcement d'origine végétale dans les matériaux de construction, en particulier dans les pays en voie de développement, en raison de leur disponibilité, de leur faible coût économique et énergétique ainsi que de la relativement faible technicité nécessaire à leur production.

L'avantage du coût des fibres naturelles par rapport au coût des fibres synthétiques explique en partie la tendance d'utilisation en faveur des fibres naturelles. Mais il faut dire, que l'utilisation des fibres naturelles comme un matériau de construction pose un défi particulier à la science et à la technologie, à savoir : l'adhérence fibre / matrice, la faible résistance, le problème de stockage sur de longues périodes, les fibres sont hydrophiles, les problèmes de compatibilité, la sensibilité à l'humidité, la dégradation des fibres pendant le traitement, l'orientation et la distribution des fibres.

Les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille sont très variées mais on connaît aussi l'emploi de fibres pour construire en torchis, en terrepaille, en bauge ainsi qu'en blocs comprimés et en pisé.

Nous nous intéresserons dans cette thèse à l'amélioration des performances du BTC, en exploitant les matériaux locaux : la terre, les fibres végétales et notamment les fibres de palmier dattier, qui constitue l'une des richesses végétales les plus abondantes en Algérie et qui de nos jours, restent peu exploitées. Pour améliorer l'insensibilité à l'eau du BTC on a fait appel aux liants, à savoir le ciment et la chaux. Donc le but de cette thèse est d'examiner les propriétés mécaniques du bloc de terre comprimée (BTC) avec fibres, en particulier les fibres de palmier dattier. titre de comparaison, la paille d'orge hachée et les fibres de polypropylène sont utilisées aussi. Dans cette thèse, on s'intéresse à l'étude sur la sensibilité à l'eau du BTC fibré, en examinant son absorption totale et son gonflement après immersion dans l'eau. Le comportement mécanique en compression du BTC fibré a fait l'objet aussi de cette étude.

Pour atteindre notre but, l'étude est scindée en trois chapitres :

Le premier chapitre est réservé à une synthèse bibliographique, à travers laquelle nous avons réalisé, un état de l'art approfondi sur l'utilisation du bloc de terre comprimée, et les moyens de stabilisation, en se focalisant sur son renforcement par les fibres d'une manière générale, notamment les fibres végétales, tout en donnant plus d'importance aux fibres de palmier dattier. Le chapitre 1 décrit aussi les résultats sur les mécanismes de la stabilisation sol-ciment, sol-chaux, et sol-ciment-chaux.

Il a été également discuté en chapitre 1 les résultats obtenus par d'autres chercheurs concernant la caractérisation et le choix du sol pour la production du BTC. La littérature a montré que le choix du sol exige la connaissance de quatre propriétés fondamentales de la terre, qui sont:

la texture ou granularité, la plasticité, la compressibilité et la cohésion. Les recherches ont prouvé que le compactage du sol est une opération qui s'accompagne d'une réduction du volume des vides, donc une densité sèche plus importante, par suite une résistance mécanique plus élevée. Il a été démontré aussi qu'un compactage statique est mieux adapté aux sols cohérents que le compactage dynamique, donc il est recommandé d'insister sur la démarche la plus correcte, qui est de trouver la teneur en eau optimum avec la presse à bloc directement.

Pour le bloc de terre stabilisée, un certain nombre de recherches recommande que la teneur en ciment doit être entre 4 et 10%, en spécifiant que le ciment est efficace avec les graves et les sables plutôt qu'avec des limons et des argiles. Pour la chaux, l'efficacité est en faveur de la chaux aérienne avec des dosages de 6 à 12 %. Mais une proportion optimale de chaux existe pour chaque type de terre.

Pour la stabilisation des BTC, plusieurs travaux ont confirmé que l'emploi des liants minéraux (ciment et chaux) et le bitume comme stabilisants améliore la résistance mécanique et l'insensibilité à l'eau des BTC. Mais la stabilisation des BTC par des fibres et en particulier les fibres végétales n'a pas eu le consensus de tous les chercheurs. Alors que des auteurs ont constaté que l'addition des fibres naturelles réduit la taille des fissures causées par le retrait et améliore la durabilité et la résistance à la traction, d'autres auteurs ont montré que l'amélioration des performances du composite est seulement dans certaines limites. Finalement, il y a des chercheurs qui déconseillent l'incorporation des fibres dans le BTC.

Le deuxième et le troisième chapitre constituent la partie expérimentale de la thèse.

Le deuxième chapitre a été consacré à la caractérisation des nombreuses matières premières utilisées dans ces travaux. Il s'agit:

- sol local, composé principalement de quartz, de gypse, de calcite et de kaolinite;
- sable concassé (0/3), pour la correction granulométrique ;
- ciment CPA-CEM I 42.5 ES (ciment résistant aux sulfates CRS), qui est composé de 95 % de clinker et 5 % de gypse;
- chaux vive.
- fibres de palmier dattier mâle, paille d'orge hachée et fibres de polypropylène.

Une fois la problématique définie, le bilan des connaissances réalisé et les matières premières caractérisées, nous avons procédé à l'élaboration des différentes formulations, à la confection des blocs et finalement la phase des essais.

Le troisième chapitre englobe l'ensemble des résultats obtenus et les discussions. Dans ce chapitre on a étudié l'effet de la présence des fibres, notamment les fibres de palmier dattier, sur les propriétés physiques et mécaniques du bloc de terre comprimée, à savoir la masse volumique apparente, la résistance à la compression sèche RCS et humide RCH, la résistance à la traction sèche RTS, l'absorption totale à l'eau ATE et le gonflement. Le comportement mécanique du BTC fibré a été aussi l'objet d'étude.

Les résultats obtenus ont révélé que la résistance mécanique du BTC fibré à base de chaux augmente avec l'augmentation du temps de cure à l'étuve, et que le meilleur résultat a été enregistré après 7 jours de cure. La cure à l'étuve a présenté un gain dans la résistance et la durée de conservation meilleur que celui obtenu en conservant les blocs dans une enceinte à vapeur naturelle ou au laboratoire. Mais la cure à vapeur naturelle est caractérisée par l'absence de dépenses énergétiques, tout en enregistrant un gain de résistance comparativement à la cure au laboratoire.

En analysant les résultats de l'effet de l'incorporation des fibres de palmier dattier mâle sur la résistance mécanique du BTC à base de ciment ou de chaux, on a constaté qu'à part le cas de la RCS pour les blocs à base de 8% en ciment et 0,05% en fibres, et le cas de la RTS pour les blocs à base de 8 % et 12 % en chaux et 0,05% en fibres, ou on a remarqué une légère augmentation, une baisse générale de la résistance mécanique à l'état sec et humide est constatée. Ce résultat est expliqué par l'incompatibilité des fibres végétales avec le mode de compactage des BTC, parce qu'elles rendent le mélange trop élastique.

Il faut signaler qu'une augmentation de la résistance mécanique du BTC à base de ciment avec l'augmentation de la teneur en ciment a été observée, alors que pour la chaux, en variant la teneur de 8 % à 12 % en chaux, 10 % a été enregistrée comme teneur optimale.

Pour évaluer le degré d'insensibilité à l'eau, il a été constaté que l'absorption totale d'eau ATE du BTC à base de ciment augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres et diminue avec la teneur en ciment, comme elle augmente dans le temps. Le même constat est fait pour l'ATE des BTC à base de chaux, sauf que les meilleurs résultats sont obtenus pour 10 % en chaux comparativement à 8 % et à 12 %. L'ATE de tous les BTC étudiés n'a pas dépassé 15 %, qui est la limite recommandée par certaines normes. Pour le gonflement des BTC, il a été observé qu'il y a une augmentation de celui-ci avec l'augmentation de la teneur en fibres et une diminution avec l'augmentation de la teneur en ciment. Pour le cas de la chaux, le gonflement le plus faible est enregistré pour 10 % en chaux.

En remplaçant les fibres de palmier dattier par des fibres de polypropylène, les BTC à base de 8 % en ciment ont présenté des résultats très intéressants, une augmentation de la RCS et de la RTS avec l'augmentation de la teneur en fibres est enregistrée.

L'augmentation de la contrainte de compactage a conduit à une augmentation de la RCS, de la RCH et de la RTS et une diminution de l'absorption totale d'eau ATE et le gonflement des BTC à base de ciment et de fibres de palmier dattier.

Pour le traitement à la solution de soude des fibres de palmier dattier, on s'attendait à ce que ce traitement agissait sur la lamelle moyenne et la paroi primaire des fibres, dégradant les hémicelluloses, cires et graisses, laissant ainsi apparaître des fibrilles de cellulose parfaitement alignées. La surface des fibres apparaît donc chimiquement plus homogène et également plus rugueuse, laissant plus de surfaces accessibles et augmentant ainsi la réactivité de la fibre. La réactivité et l'homogénéisation des groupements de surface de la fibre étant améliorées, le contact fibre/matrice est renforcé. Mais ceci ne s'est pas produit, car les fibres traitées de palmier dattier n'ont pas amélioré la résistance mécanique des BTC, ce qui montre que le problème de la faible adhérence entre la fibre et la matrice, posé par l'utilisation des fibres brutes, persiste toujours.

L'incorporation des fibres de palmier dattier brutes, d'une part a un effet négatif sur la contrainte de rupture du BTC fibré à base de ciment, et d'autre part elle a un effet positif sur le comportement post-contrainte de rupture du BTC, en augmentant sa ductilité par rapport au comportement fragile de la matrice seule. Dans le même contexte, le composite à base de fibres traitées est plus ductile qu'avec l'incorporation des fibres brutes et présente aussi des contraintes de rupture et résiduelle légèrement supérieures. Le module de Young de la matrice seule dépasse légèrement celui du composite à renfort en fibres de palmier dattier (traitées et brutes). Pour le cas du renfort en fibres de polypropylène, l'étude du comportement mécanique du BTC à base de ciment a révélé qu'il y a une augmentation de la contrainte de rupture et de la résistance résiduelle en augmentant la teneur en fibres, en plus le composite a présenté un comportement ductile meilleur que celui du composite à renfort en fibres de palmier dattier.

L'étude de l'effet du type de fibre sur la résistance mécanique (RCS et RTS) a abouti au classement suivant des composites selon l'ordre décroissant de la résistance: fibres de polypropylène, fibres de palmier dattier, mélange de fibres de palmier dattier et de paille d'orge hachée, paille d'orge hachée.

Finalement, on conclue que la présence des fibres végétales dans la fabrication des blocs de terre comprimée est indésirable, si le critère de choix est la résistance. Mais si le critère de choix est l'isolation thermique, tout en assurant une résistance mécanique modérée meilleure que celle de l'adobe par exemple, alors là on peut procéder à une étude appropriée, en optimisant la teneur en fibres végétales utilisée dans le mélange.

RECOMMANDATIONS

Recommandations

1. Si la résistance mécanique est prise comme critère de choix dans la fabrication du bloc de terre comprimée à renfort en fibres végétales, Les fibres doivent subir un traitement préalable ou durant la mise en œuvre de manière à augmenter l'adhérence fibre/matrice.
2. Si l'isolation thermique est prise comme critère de choix dans la fabrication des BTC tout en assurant une résistance mécanique modérée meilleure que celle de l'adobe, alors là on peut procéder à une optimisation de la teneur en fibres végétales.

PERSPECTIVES

Perspectives

1. Amélioration de l'adhérence entre les fibres de palmier dattier et une matrice en terre comprimée stabilisée.
2. Etude des propriétés thermiques du bloc de terre comprimée avec fibres de palmier dattier.
3. Etude de la durabilité du bloc de terre comprimée avec fibres de palmier dattier.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Abtahi M, Okhovat N, Hejazi M.** Using textile fibers as soil stabilizers – new achievements. In: 1st Int and 7th nat conf text eng, Rasht, Iran; 2009.
- ACI 544.** State-of-the-art report on fibre reinforced concrete. Reported by ACI Committee 544.1-96, 1996.
- AFNOR NF P 94-100.** Sols : reconnaissance et essais – Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Essai d'évaluation de l'aptitude d'un matériau au traitement. 1999.
- Aggarwal LK.** Bagasses-reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 17(2):107–12, 1995.
- Akpokodje EG.** The stabilization of some arid zone soils with cement and lime. *Quarterly Journal of Engineering Geology London*, Vol. 18, 173-180, 1985.
- Al-Mukhtar M, Lasledj A, Alcover JF.** Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 50 °C. *Applied Clay Science* 50 , 199–203, 2010.
- Alsaeed T, Yousif BF, Ku H.** The potential of using date palm fibres as reinforcement for polymeric composites, *Materials and Design*, 43 , 177–184, 2013.
- Ausroads.** Guide to stabilisation in roadworks. Ausroads Research Group, Sydney, 1998.
- Azeem A, Ati A.** Erosion and control techniques for slopes of banks and cuttings. In: *Ind geotech conf*, Calcutta; 1992.
- Aziz MA, Paramasivam P, Lee. SL.** *New Reinforced Concretes: 3. Concrete reinforced with natural fibres.* Surrey University Press, 1984.
- Bahar R, Benazzoug M, Kenai S.** Performance of compacted cement stabilised soil. *Cement and Concrete Composites.* Elsevier Applied Science Publishers, U.K., Vol. 25, No 6, pp 633-641, 2004.
- Baley C.** Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. *Les techniques de l'ingénieur*, AM 5 130, 2004.
- Bell FG.** Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology* 42, 223-237, 1996.
- Bell FG.** *Methods of treatment of unstable ground.* Newnes-Butterworth, London, 1975.
- Ben Amor K, Temimi M, Camps JP, Laquerbe M.** Stabilisation à froid de matériaux montmorillonitiques par du ciment Portland. *Materials and Structures*, Vol. 30, pp. 355-361, 1997.
- Benammar B, Mezghiche B, Guettala S.** Influence of atmospheric steam curing by solar energy on the compressive and flexural strength of concretes. *Construction and Building Materials*, Volume 49, p. 511–518, 2013.

Benchabane A. Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles - polymères. Effets de l'ajout de polymères. Thèse de doctorat de l'ULP de Strasbourg I, France, 2006.

Benouali H, Brara A, Mahdad M, Mokhtari F. Caractérisation thermophysique et suivi thermique de deux bâtisses réalisées en blocs de terre comprimés, Actes de la 29^{ème} rencontre de l'Association Universitaire de Génie Civil (AUGC), Tlemcen p. 265, 29-31 , 2011.

Benziouche S. Structure et contraintes de la filière dattes en Algérie. *New Medit*, vol. 11, n° 4, 2012. - p. 49-57, 2012.

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

Binici H, Aksogan O, Shah T. Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material. *Constr Build Mater*; 19(4):313–8, 2005.

Binici H, Aksogan O, Shah T. Investigation of Reinforced Mud Brick as Building Material. *Construction and Building Materials*, 19(4):313-318, 2005.

Bledzki AK, Gassan J. Composites reinforced with cellulose fibres *Progress in Polymer Science*, 24, 221-274, 1999.

Bogue RH. *Chemistry of Portland Cement*. New York, Reinhold, vol. 790, 1955.

Bouhicha M, Aouissi F, Kenai S. Performance of composite soil reinforced with barley straw. *Cem Concr Compos*, 27(5):617–21, 2005.

British Standards Institution. Code of practice for use of masonry. Part 3. Materials and components, design and workmanship (formerly CP 121: Part 1). BS 5628: Part 3: 1985. BSI. London, England, 1985.

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.

Burrough VS. Quantitative Criteria for the Selection and Stabilisation of Soils for Rammed Earth Wall Construction, PhD Thesis , University of New South Wales, Australia, 2001.

Cai Y, Shi B, Ng CWW, Tang CS. Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering Geology* 87 , 230–240, 2006.

Caillère S, Hénin S, Rautureau M. *Minéralogie des argiles*. Masson, Tomes 1 et 2, Paris France, 184p et 189 p, 1982.

Caillère S, HENIN S. La classification des argiles. XX^{ème} congrès Géol. Internat., Mexico, pp. 1-8, 1959.

Centre pour le développement de l'entreprise (CDE). Blocs de terre comprimée: procédures d'essais. Série technologies n°16. CDE, CRATerre-EAG, ENTPE, p. 121, 1982.

Chauquette M. La stabilisation à la chaux des sols argileux du Québec. Thèse de Ph.D.

Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec, Qué. 188 p, 1988.

Ciancio D, Beckett CTS, Carraro JAH. Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth. *Construction and Building Materials* 53, 59–65, 2014.

Coatanlem P, Jauberthie R, Rendell F. Lightweight wood chipping concrete durability. *Construction and Building Materials*, vol. 20, , p. 776-781, Nov. 2006.

Coutts RSP, Ni Y. Autoclaved bamboo pulp fibre reinforced cement. *Cem Concr Compos*;17(2):99–106, 1995.

CRATerre. GATE. Bloc de terre comprimée. Eléments de base. , Eschborn, Allemagne, 28 p, 1991.

Croft JB. The problem in predicting the suitability of soils for cementitious stabilization. *Engineering Geology*, Vol. 2(6), 397-424, 1968.

DeJong-Hughes J, Moncrief JF, Voorhees WB, Swan JB. Soil Compaction: Causes, Effects and Control. University of Minnesota Extension Service. 2001.

Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. Construire en terre. Editions Alternatives et Parallèles, collection AnArchitecture, Paris, France, 265p, 1979.

Eko RM, Offa ED, Ngatcha TY, Minsili LS. Potential of salvaged steel fibers for reinforcement of unfired earth blocks. *Constr Build Mater* ; 35(10):340–6, 2012.

Eko RM, Riskowski G. A Procedure for Processing Mixtures of Soil, Cement, and Sugarcane Bagasse. *Agricultural Engineering Journal: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*, Manuscript BC 99 001, Vol. III, pp. 1-11, 2001.

Elenga RG, Mabilia B., Ahouet L, Goma-Maniongui J, Diris GF. Characterization of Clayey Soils From Congo and Physical Properties of their Compressed Earth Blocks Reinforced with Post-Consumer Plastic Wastes. *Geomaterials*, 1:88-94.2011.

Errais E. Réactivité de surface d'argiles naturelles : étude de l'adsorption de colorants anioniques. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, France, 2011.

Estabragh AR, Bordbar AT, Javadi A A. Mechanical Behavior of a Clay Soil Reinforced with Nylon Fibers. *Geotech Geol Eng* , 29:899–908, 2011.

Estabragh AR, Bordbar AT, Javadi AA. Mechanical behavior of a clay soil reinforced with nylon fibers. *Geotech Geol Eng*; 29(5):899–908, 2011.

Filho RDT, Scrivener K, England GL, Ghavami K. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cem Concr Compos* ; 22(2):127–143, 2000.

Galán-Marín C, Rivera-Gómez C, Petric J. Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Construction and Building Materials* 24 , 1462–1468, 2010.

Gandini A, Belgacem MN. La chimie des substances renouvelables. L'actualité chimique,

Pages 6-14, 2002.

Ghavami K, Filho RDT, Barbosa NP. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cem Concr Compos*; 21(1):39–48, 1999.

Ghoumari F. Matériau en Terre Crue Compactée: Amélioration de sa Durabilité à l'Eau. Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France, 1989.

Gooding DEM. Improved processes for the production of soil-cement building blocks. Unpublished doctoral dissertation: Warwick, University of Warwick, 1993.

Gram HE. Durability of natural fibres in concret. CBI Research fo 1-83, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1, 255 pp, 1983.

Gram HE. Durability of natural fibres in concrete. in *Concrete technology and design, Natural fibre reinforced cement and concrete*, N, Swamy, Blackie and Son Ltd, UK, 1988.

Grim RE. Physico-Chemical Properties of Soils, *Journal of Soil Mechanics and Foundations division*. ASCE , vol. 85, n°. SM2, pp. 1-17, 1959.

Guettala A, Houari H., Mezghiche B., Chebili R. Durability of lime stabilized earth blocks. *Courrier du Savoir*, N°02, pp. 61-66, 2002.

Guettala A, Guenfoud M. Béton de Terre Stabilisée Propriétés Physico-Mécaniques et Influence des Types d'argiles. *La technique moderne*, 1–2 :21–26, 1997.

Guettala A. Béton de terre stabilisé: amélioration de sa durabilité à l'eau. thèse de doctorat, Université de Biskra, 203 p, 2003.

Hamada H, Ikuta N, Nishida N, Maekawa Z. Effect of interfacial silane network structure on interfacial strength in glass fibre composites, *Composites*, v.25, p.512, 1994.

Haque MM, Hasan M, Islam MS, Ali ME. Physico-mechanical properties of chemically treated palm and coir fiber reinforced polypropylene composites. *Bioresour Technol* ;100(20):4903–4906, 2009.

Harichéne K, Ghrici M, Belbbaci A. & Meknaci A. Effet de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur le comportement de la plasticité des sols argileux. Séminaire international, Département de Génie Civil, Institut supérieur des études technologiques de Sfax, Tunisie, 2009.

Harrington J J. MicroFibril Angle in Wood. Ed B.G Butterfield ,IAWA/IUFRO. 1998.

Heathcote, K, and Piper R. Strength of Cement Stabilised Pressed Earth Blocks with Low Cement Contents. *J. Proc. Roy. Soc. New South Wales*, vol. 127, pp. 33-37, 1994.

Hejazi SM, Sheikhzadeh M, Abtahi SM, Zadhoush A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Constr Build Mater* 2;30:100–16, 2012.

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

Houben H, Guillaud H. Earth construction—a comprehensive guide. London: Intermediate

Technology; 1994.

Houben H, Guillaud H. Traité de construction en terre. CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, , 355 p, 2006.

Houben H, Rigassi V, Garnier P. Blocs de terre comprimée : équipements de production. CRATerre, Bruxelles, Belgique, 149 p, 1996.

ILO/UNIDO. Small-scale Brickmaking. Technology Series, Memorandum No.6. International Labour Organisation. Geneva, Switzerland, 1987.

Jackson N, Dhir RK. Civil Engineering Materials. 5th ed. England: McMillan Press Ltd., London, England, 1996.

Jadhao PD and Nagarnaik PB. Performance Evaluation of Fiber Reinforced Soil- Fly Ash Mixtures. The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) Goa, India, 2008.

Jarrige JF. Chronology of the Earlier Periods of the Greater Indus as seen from Mehrgrah, Pakistan. pp. 21-28 in South Asian Archaeology, ed. B. Alichin, CambridgeUniversity Press, 1989.

Joshy MK, Mathew L, Joseph R. Studies on interfacial adhesion in unidirectional isora fibre reinforced polyester composites. Composite Interfaces, v.14, n.7-9, p.631-646, 2007.

Juarez C, Dura A, Valdez P, Fajardo G. Performance of “Agave Lecheguilla” natural fiber in portland cement composites exposed to severe environment conditions. Building and Environment, 2005.

Kaniraj R, Gayathri V. Geotechnical behavior of fly ash mixed with randomly oriented fiber inclusions. Geotext Geomembr; 21:123–149, 2003.

Keller A, Leupin M. Influence of the growth stage of industrial hemp on chemical and physical properties of the fibres. Industrial crops and products, 13, 35-48, 2001.

Kerali AG. Durability of Compressed and Cement-Stabilised Building Blocks. Ph.D. Thesis, Development Technology Unit, Warwick University, 2001.

Kézdi A. Stabilized Earth Roads, Developments in geotechnical engineering 19. Elsevier Scientific Publishing Company, New York, NY. 327 p, 1979.

Khedari J, Charoenvai S, Hirunlabh J. New insulating particleboards from durian peel and coconut coir. Build Environ;38(3):245–254, 2003.

Khedari J, Watsanasathaporn P, Hirunlabh J. Development of fibre-based soilcement block with low thermal conductivity. Cem Concr Compos; 27(1):111–116, 2005.

Knill CJ, Kennedy JF. Degradation of cellulose under alkaline conditions. Carbohydrate Polymers, 51, 281-300, 2003.

Kriker A, Bali A, Debicki G, Bouziane M, Chabannet M. Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates. *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, p. 639-648, 2008.

Kriker A, Debicki G, Bali A, Khenfer MM, Chabannet M. Mechanical properties of date palm fibres and reinforced date palm fibre concrete in hot-dry climate. *Cem Concr Compos*;27(5):554–64, 2005.

Kriker A. Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud sec. Thèse de Doctorat d'Etat , ENP ;2005.

Kujala K, Mäkikyrö M, Lehto O. Effect of humus on the binding reaction in stabilized soils. *Grouting and Deep Mixing, Yonkura, Terashi and Shibasaki (eds). Balkema, Rotterdam.* pp 415-420, 1996.

Lambe TW. The Structure of Inorganic Soil, *Proceeding. ASCE, Vol. 79, Separate No. 315,*.49p, 1953.

Le Pluart L. Nanocomposites Epoxyde/amine/montmorillonite : Rôle des interactions sur la formation, la morphologie aux différents niveaux d'échelle et les propriétés mécaniques des réseaux. Thèse de doctorat de L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2002.

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.

Le Roux A. Détermination de l'altérabilité des marnes. Congrès de géologie, Madrid, 4-7 sept., *Asoc. espanola de geologia-aplicada à la ingeniera, session II, vol. 1,* pp. 84-90, 1978.

Le Roux A. Traitement des sols argileux par la chaux. *Bull. liaison Labo P. et ch. Sept.-oct., n° 40,* pp 59-96, 1969.

LE Troedec M. Caractérisation des interactions physico-chimiques dans un matériau composite à base de phyllosilicates, de chaux et de fibres cellulosiques. Thèse de doctorat de l'université de Llimoges, France, 2009.

Little DN. Fundamentals of the stabilization of soil/ with lime. *National Lime Association, Arlington, Virginia. Bulletin 332.* 20 p, 1987.

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, numéro 3.* 10 p, 1990.

Lunt MG. Stabilised soil blocks for building. *Overseas Building Note no. 184. Building Research Establishment, England: Garston;* 1980.

Maher MH, and Ho YC. Mechanical-Properties of Kaolinite Fiber Soil Composite. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 120,(8):1381-1393,* 1994.

Marandi M, Bagheripour H, Rahgozar R, Zare H. Strength and ductility of randomly

distributed palm fibers reinforced silty-sand soils. *Am J Appl Sci*;5:209–20, 2008.

Mckenzie RC. The classification of soil silicates and oxydes. In : Soil components vol. 2 ; Inorganic components. Giesecking J. E. eds. Spring-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, , pp.1-25,1975.

Mesbah A, Morel JC, Olivier M, Comportement des sols fin argileux pendant un essai de compactage statique: détermination des paramètres pertinents, *Matériaux et constructions*, vol 32, N°223, 1999.

Mesbah A, Morel JC, Walker P. and Ghavami Kh. Development of a direct tensile test for compacted earth blocks reinforced with natural fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 95-98, 2004.

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.

Mezghiche B. Traitement naturel des bétons dans les climats chauds, Séminaire International sur la Qualité du Béton en Climat Chaud, Ghardaïa, 24-26 Mars. p 15, 1994.

Michel J. Etude sur la stabilisation et la compression des terres pour leur utilisation dans la construction. *Annales de l'Institut Technique de Bâtiment et des Travaux Publics Série Matériaux N° 339*, pp.22-35, 1999.

Michot A. Caractéristiques thermophysiques de matériaux à base d'argile : évolution avec des traitements thermiques jusqu'à 1400°C. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, 116 p, 2008.

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

Millogo Y, Morel J-C, Aubert JE, Ghavami K. Experimental analysis of pressed adobe blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Constr Build Mater*; 52:71–78, 2014.

Millogo Y, Morel JC, Ouedraogo R. Microstructure, geotechnical and mechanical characteristics of quicklime-lateritic gravels mixtures used in road construction. *Construction and Building Materials* 26, 663–669, 2012.

Minke G. *Earth Construction Handbook*. Boston: WIT Press; 2000.

MITCHELL JK. *Fundamentals of soil behavior*, 2ème édition, John Wiley and sons, New York, 437 pp, 1993.

Moore, R.K. Lime Stabilization. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. State of the art report 5. 59 p, 1987.

Moszkowicz P, Barna R. Stabilisation - solidification des déchets. *Techniques de l'ingénieur*, Article G 2 080, Volume G. 04 . 2001.

Mwaikambo L, Ansell M. Chemical modification of hemp, sisal, jute and kapok fibres by

alkalization. *Applied Polymer Science*, 84, 2222-2234, 2002.

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.

Neville AM. Propriétés des bétons. Editions Eyrolles, Paris, 2000.

NOZAHIC V. Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal. Thèse- Université Blaise Pascal – Clermont II . France, 2012.

Okano T, Sarko A. Mercerization of cellulose I. X-Ray diffraction evidence for intermediate structures. *Journal of Applied Polymer Science*, 29,4175-82, 1984.

Oliver M. and El Gharbi Z. Sisal Fibre Reinforced Soil Masonry. Proceedings of the 4th International Masonry, London, pp. 55-58, Oct. 1995.

Olivier M. et Mesbah A . Le matériau terre : essai de compactage statique pour la fabrication de briques de terre compressées. *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, volume146. : pp 37-43, 1986.

Oti JE, Kinuthia JM, Bai J. Compressive strength and microstructural analysis of unfired clay masonry bricks. *Eng Geol*;109(3–4):230–40,2009.

Oti JE, Kinuthia JM, Bai J. Engineering properties of unfired clay masonry bricks. *Engineering Geology* ,107, 130–139, 2009.

Pedro G. Les minéraux argileux, 47-64, dans *pédologie. 2-Constituants et propriétés du sol.* Eds. Duchaufour Ph. et Southier B. Masson, Paris, France, 665p, 1994.

Perret P. Contribution à l'étude de la stabilisation des sols fins par la chaux : étude globale du phénomène et application. thèse de Dr. Ing. INSA de Rennes, Juillet 1977.

Piattoni Q, Quagliarini E, Lenci S. Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks. *Constr Build Mater*;25(4):2067–75, 2011.

P'KLA A. Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC): Application aux maçonneries « BTC-Mortier de terre. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 2002.

Prabakar J, Sridhar RS. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. *Construction and Building Materials*, 16,123-131, 2002.

Prasad CKS, Nambiar EKK. and Abraham BM. Plastic Fiber Reinforced Soil Blocks as a Sustainable Building Material. *International Journal of Advancements in Research & Technology*, 1(5):42-45, 2012.

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

Roads. 23--26 mai, 1999, Baton Rouge, Louisiana. Transportation Research Record No. 1652, Volume 1. National Academy Press, Washington, D.C. 275 p, 1999.

Puppala J, Musenda C. Effects of fiber reinforcement on strength and volume change behavior of expansive soils. trans res boa. In: 79th Annual meeting, Washington, USA; 2000.

Ramaswamy HS, Ahuja BM, Krishnamoorthy S. Behavior of concrete reinforced with jute, coir, and bamboo fibres. Int J Cem Compos Lightweight Concr;5(1):3–13, 1983.

Rao J. Jute geotextile for improving the performance of highway embankment on soft marine soil. In: Proc nat sem jute based geotextiles, New Delhi, India; 1996.

Rao SM, Shivananda P. Role of curing temperature in progress of lime–soil reactions. Geotech. Geol. Eng. 23 (1), 79–85, 2005.

Ravishankar U, Raghavan S. Coir stabilised lateritic soil for pavements. In: Indian geotech conf, Ahmedabad, India; 2004.

Reinholdt M. Synthèse en milieu fluoré et caractérisation de Phyllosilicates de type Montmorillonite. Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace, 2001.

Reyne M. Technologie Des Composites, Traité des nouvelles technologies. Série Matériaux ; Hermès, v.13, 1990.

Rigassi V. Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRATerre-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne, 104 p, 1995.

Robert ME, Engelbert DO, Thierry YN, Lezin SM. Potential of salvaged steel fibers for reinforcement of unfired earth blocks. Constr Build Mater;35(10):340–6, 2012.

Rogers CDF, Glendinning S, Dixon N. Lime Stabilisation. Proceedings of the seminar held at Loughborough University Civil & Building Engineering Department. 25 septembre, 1996. Thomas Telford, London, England. 183 p, 1996b.

Rogers CDF, Glendinning S. Modification of Clay Soils Using Lime. pp. 99-114. Dans Rogers CDF., Glendinning 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 p, 1996a.

Rowell RM, Jacobson R, O'dell, JL. Proceeding of 3rd ., Use of Natural Fibers in Resine Transfer molding. International Conference on Wood fiber – plastic Composites. Madison, USA, 137-140 p, 1995.

Saiyouri N. Approche microstructurale et modélisation des transferts d'eau et du gonflement dans les argiles non saturées, Thèse doctorat, Ecole Centrale Paris, 228 pp, 1996.

Salehan I, Yaacob Z. Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibers. Pertanika J Sci Technol;19(1):33–43, 2011.

Savastano H, Agopyan V, Nolasco AM, Pimentel L. Plant fibre reinforced cement

components for roofing. *Construction and Building Materials*, Volume 13 , 433-438, 1999

SBIAI A. Matériaux composites à matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier; effet de l'oxydation au tempo. thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2011.

Sedan D, Pagnoux C, Smith A, Chotard T. Interaction fibre de chanvre/ciment : influence sur les propriétés mécaniques du composite. *Matériaux & Techniques*, Volume 5 ,133-142, 2007.

Stulz R, Mukerji K. *Appropriate Building Materials: A catalogue of Potential Solutions.* Swiss Centre for Appropriate Technology, Skat-Publications, Switzerland, 1988.

Swamy N. *New reinforced concretes.* Surry University Press; 1984.

Swamy RN. Vegetable fibre 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 fibres as building materials*, Salvaor, Bahia (Brazil), Chapman and Hall; p. 139-49, 1990.

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

Taha I, Steuernagel L, Ziegmann G. Optimization of the alkali treatment process of date palm fibres for polymeric composites. *Composite Interfaces*, v.14, n.7-9, p.669-684, 2007.

Tang C, Shi B, Gao W, Chen F, Cai Y. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotext Geomembr*;25:194-202, 2007.

Tesoriere G. et al. "Studio sperimentale suile trra. Calce-cemento", *Analisi del comortament meccanico*, *Industria italiana det cemento (ITA)*, 1981, 5, n°6, pp. 435-444.

Thielemans W, Wool RP. Butyrated Kraft lignin as compatibilizing agent for natural fiber reinforced thermoset composites. *Compos Part A: Applied Sci Manuf*;35(3): 327-38, 2004.

Toledo Filho RD, K. Ghavami K, England GL, Scrivener K. Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. *Cement and Concrete Composites*, Volume 25, 185-196, 2003.

TRAN N T. Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière. Thèse de doctorat de l'Université d'Artois, France, 2009.

Tremblay H. Amélioration mécaniques et prédiction de la compressibilité des sols fins du Québec. Thèse de doctorat de l'Université de Laval. 218 p, 1998.

United Nations. *Earth Construction Technology.* United Nations Centre For Human Settlements, Nairobi, Kenya, 200 p, 1992.

USACE. Soil engineering and stabilization. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, 2000.

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 fibres reinforced composites. Composites Part B, 309-320, , 1999.

Vasudev D. Performance studies on rigid pavement sections built on stabilized sulfate soils. Msc thesis, University of Texas at Arlington; 2007.

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.

Venkatrama Reddy BV, Gupta A. Characteristics of soil cement blocks using highly sandy soils. Journal of Materials and Structures, 38, 651-658, 2005.

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.

Verdyen J., Roisin V, Nuyens J. Applications de la mécanique des sols", Dunod Ed. Paris, 1971.

Vergas J, Bariola J, Blondet M. Seismic Strength of Adobe masonry. Materials & Structures, 19, pp. 253-258, 1986.

Vidal H. The principle of reinforced earth. High Res Rec ;282:1–16, 1969.

Vilenkina N. Utilisation de matériau sol dans la construction des bâtiments ruraux, Mouscou, 1956.

Villamizar MCN, Araque VS, Reyes CAR, Silva RS. Effect of the addition of coalash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks. Constr Build Mater;36(11):276–86, 2012.

Walker P. and Stace T. Properties of Some Cement Stabilised Compressed Earth Blocks and Mortars, Materials and Structures Vol 30, pp 545 – 551, 1997.

Walker P. Specifications for Stabilised Pressed Earth Blocks. Masonry International, 10, (1), pp. 1-6, 1996.

Walker, P. Strength, Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil Blocks. Cement & Concrete Composites, 17, 4, pp. 301. 310, 1995.

Webb DJT. Stabilised soil and the built environment. Renewable Energy, Vol. 5, No. 5-8, 1066-1080, 1994.

Weng CH, Lin DF, Chiang PC. Utilization of sludge as brick materials. Adv Environ Res;7(3):679–85, 2003.

Winterkorn HF. Soil stabilization, Chapter 8 in "Foundation Engineering Handbook", Winterkorn, H.F. & Fang, H.-Y., Van Nostrand Reinhold Company, 750 pp, 1975.

Yetgin , Çavdar O, and Çavdar, A. The effects of the fibre contents on the mechanic properties of the adobes. Construction and Building Materials, vol. 22, no. 3, pp. 222-227, 2008.

Zhang W, Okubayashi S, Bechtold T. Fibrillation of cellulosic fibers-Part 4. Effects of alkali pre-treatment of various cellulosic fibers". Carbohydrate Polymers, 61, 427-433, 2005.

Ziegler S, Leshchinsky D, Ling HL, Perry EB. Effect of short polymeric fibres on crack development in clays. Soils Found;38(1):247–53, 1998.

ANNEXES

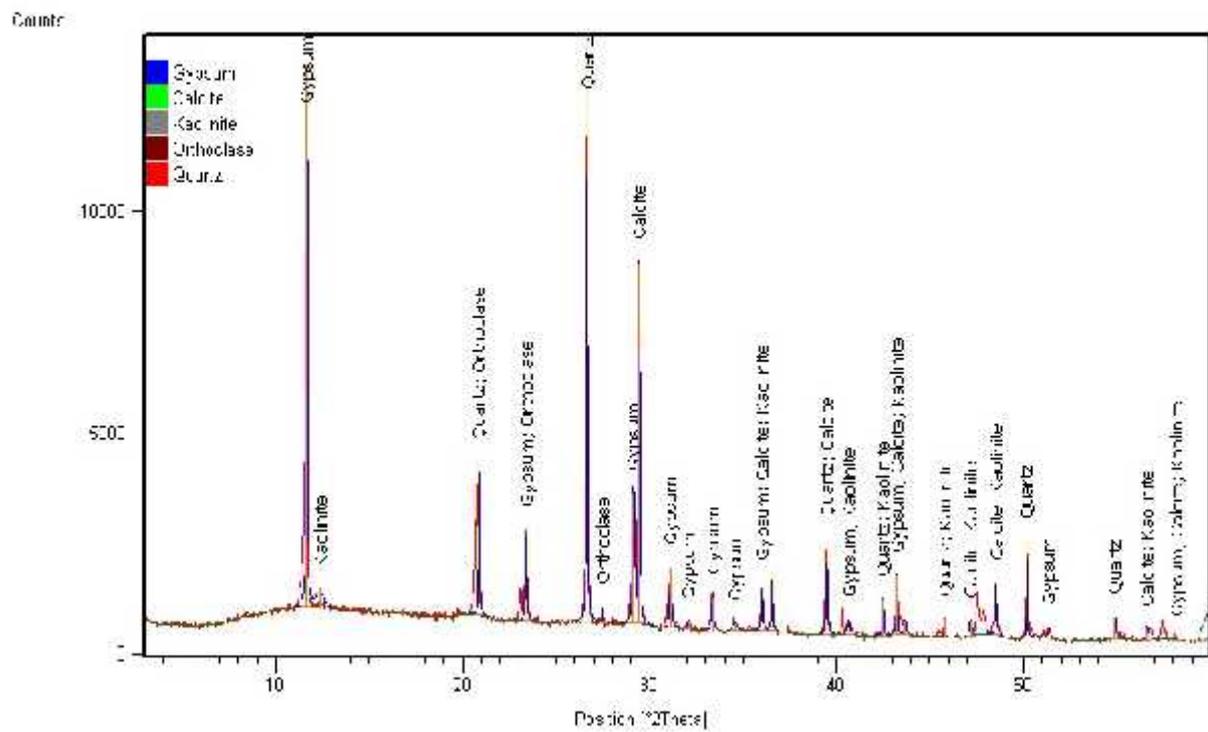


Fig. A.1: Diffractogramme à rayons x du sol utilisé.



Fig. A.2: Le BTC après fendage divisé en deux demi-bloc.



Fig. A.3: Photo de la surface de séparation entre les deux demi-bloc en utilisant le microscope optique.



Fig. A.4: Photo de la fibre de palmier dattier mâle à l'état brut en utilisant le microscope optique.

LISTE DES PUBLICATIONS
&
COMMUNICATIONS
ISSUES DE LA THESE

Liste des publications et communications issues de la thèse

Publications internationales :

- **TAALLAH, B., GUETTALA, A H., GUETTALA, S., Kriker, A. (2014).** Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers, *Construction and Building Materials*, 59; 161–168.

Publications nationales :

- **TAALAH, B., GUETTALA, A H., Kriker, A. (2014).** Effet de la teneur en fibres de palmier dattier et de la contrainte de compactage sur les propriétés des blocs de terre comprimée. *Courrier du Savoir – N°18*, 2014, pp.45-51.

Communications nationales :

- **TAALLAH, B., GUETTALA, A H., Kriker, A., Izamouren W. (2012).** « Effet des fibres de palmiers dattiers sur les propriétés des blocs de terre comprimée », Journée d'étude, Université de Biskra. Algérie.
- **TAALLAH, B., GUETTALA, A H., Kriker, A. (2013).** Effet des fibres de palmiers dattiers sur la résistance mécanique et la sensibilité à l'eau des blocs de terre comprimée. Séminaire national sur les matériaux locaux dans la construction. Université de Ouargla. Algérie.