

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : GEOTECHNIQUE

Présenté par : ABU ZARIFA Tawfiq Ammar Tawfiq

KHECHAIMIA Djalel

**Thème: Comportement mécanique du sol cohérent traité
avec un bio-liant.**

Sous la direction de : Pr. NOUAOURIA Mohamed Salah

Juin 2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Remerciements

Nous remercions «ALLAH EL KARIM» de nous avoir donné la Santé, la volonté, le courage et la patience tout au long de notre parcours académique et scientifique jusqu'à l'aboutissement de notre modeste travail.

Tout d'abord, nous tenons à exprimer nos remerciements et notre gratitude à notre encadreur **Pr. NOUAOURIA Mohamed Salah** pour tout le soutien, l'assistance, l'orientation et le suivi pendant la période de préparation de ce travail, pour ses précieuses notes, idées et conseils qui nous a donnés.

C'est un privilège et une expérience à la fois. Exceptionnellement, nous avons bénéficié de ses conseils qui nous ont guidés et guidés encore pour les années à venir, que Dieu le protège.

Nous exprimons nos remerciements à tous les enseignants du département de Génie Civil et d'Hydraulique pour leurs aides, leurs encouragements et leurs conseils tout au long de notre cursus universitaire, qu'ils puissent trouver ici l'expression de notre profond respect.

Nous remercions le Doctorant **NOUAOURIA ABDESSALAM** qui nous a beaucoup aidés dans la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions également l'honorable jury qui a bien voulu examiner notre travail.

Nos remerciements, également à l'ensemble des responsables, ingénieurs et techniciens du Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction (LNHC) de Guelma de nous avoir accueillis pendant notre période de stage.

Nos sentiments de reconnaissance vont également à toute personne qui nous a aidés de près ou de loin.

DEDICACE

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A Mes premières écoles dans la vie, mes très chers parents mon soutien dans la vie.

A mes frères « SAAD et IHEB » je les remercie beaucoup.

A toute ma famille« KHECHAIMIA ».

A tous mes amis

A toute les étudiants de Géotechnique.

A toute personne m'ayant aidé à franchir un horizon dans ma vie et mes études.

KHECHAIMIA DJALEL

إهداء

الحمد لله الذي وفقنا لهذا العمل وما كنا لنصل إليه لولا فضل الله علينا أما بعد:
أهدي هذا العمل المتواضع إلى أمي و أبي سندي في الدنيا ولا أحصي لهم فضل
حفظهما الله لي

وإلى أخي : زكي سندي في غربتي

وإلى أخوتي ، وكل الأصدقاء الأحباب من دون استثناء ، إلى أساتذتي الكرام وكل
رفقاء الدراسة

وفي الأخير أرجو من الله أن يجعل عملي هذا نفعاً يستفيد منه جميع الطلبة
المتربصين المقبلين على التخرج.

أبو ظريفة توفيق عمار توفيق

Résumé

L'amélioration des sols par la technique de stabilisation chimique est largement utilisée dans le domaine de Génie Civil.

Le remplacement des agents de stabilisation classique comme la chaux et le ciment par des nouveaux produits moins coûteux et avec un impact environnemental faible est considéré aujourd'hui comme une solution efficace.

L'objectif de ce projet est d'utiliser un bio-liant, à savoir la Caséine, pour améliorer la résistance au cisaillement et la résistance à la compression simple des sols cohérents. L'étude du sol amélioré a été effectuée à travers des essais triaxiaux et de compression non confinée.

Les résultats ont montré que l'ajout de la Caséine au sol a nettement amélioré sa cohésion tout en réduisant son angle de frottement interne et a augmenté sa résistance à la compression.

Mots clés

Bio-liant, caséine, compression non confinée, essai triaxial, résistance au cisaillement, sols cohérents, traitement des sols.

ملخص

يستخدم تحسين التربة بتقنية التثبيت الكيميائي على نطاق واسع في مجال الهندسة المدنية.

يعتبر اليوم استبدال المثبتات التقليدية مثل الجير والأسمنت بمنتجات جديدة أقل تكلفة وذات تأثير بيئي منخفض حلاً فعالاً.

الهدف من هذا المشروع هو استخدام مادة رابطة حيوية ، وهي الكازيين ، لتحسين مقاومة القص وقوة الضغط البسيطة للتربة المتماسكة. تم إجراء دراسة التربة المحسنة من خلال اختبارات الضغط ثلاثية المحاور وغير المحصورة.

أظهرت النتائج أن إضافة الكازيين إلى التربة أدت إلى تحسين تماسك التربة بشكل ملحوظ مع تقليل زاوية الاحتكاك الداخلي وزيادة مقاومة الضغط البسيط.

كلمات مفتاحية

مادة رابطة حيوية، كازيين ، ضغط غير محصور ، اختبار ثلاثي المحاور ، قوة القص ، تربة متماسكة ، معالجة التربة.

Abstract

Soil improvement by the chemical stabilization technique is widely used in the field of Civil Engineering.

Replacing conventional stabilizers such as lime and cement with new, less expensive products with a low environmental impact is now considered as an effective solution.

The objective of this project is to use a bio-binder, namely Casein, to improve the shear strength and the simple compressive strength of cohesive soils. The study of improved soil is carried out through triaxial and unconfined compression tests.

The results showed that adding Casein to the soil markedly improved its soil cohesion while reducing its angle of internal friction and increasing its compressive strength.

Keywords

Bio-binder, casein, unconfined compression, triaxial test, shear strength, cohesive soils, soil treatment.

Table Des Métiers

	Page
Remerciement	
Dédicaces	
Résumé	I
ملخص	II
Abstract	III
Table des matières	IV
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	XII
Notations et Symboles	XIII
Introduction général	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SOLS ARGILEUX	
I.1 Introduction	5
I.2 Définition des sols fins	5
2.1 Quelques caractéristiques des sols fins	5
I.3 Argiles	5
3.1 Granulométrie Des Particules	6
3.2 Structure physique des argiles.	6
3.3. Structure élémentaire des minéraux argileux	7
➤ Tétraèdre de silice SiO ₄	7
➤ Octaèdre d'alumine Al ₂ (OH) ₆ ou de magnésium Mg ₃ (OH) ₆	8
I.4 Classification des argiles	9
4.1 Minéraux à 7 Å	9
4.2 Minéraux à 10 Å	9
4.3 Minéraux à 14 Å	9
4.4 Minéraux inter stratifiés	9
I.5 Types d'argile	10
5.1 Kaolinite	10
5.2 Montmorillonite	10
5.3 Illite	12
5.4 Bentonite	12
5.4.1 Origine de la bentonite	12
5.4.2 Structure et composition	12
5.4.3 Types de la bentonite	13
5.4.4 L'utilisation de la bentonite	13
5.5 Chlorites	13
5.6 Smectites	14
I.6 Propriétés des argiles	14
I.7 Conclusion	15
CHAPITRE II : CONSTRUCTION EN TERRE CRUE	
II.1 Introduction	17
II.2 Rappel historique	17
2.1 Mais quelle est la raison qui a mené ces civilisations à utiliser un tel matériau ?	17
II.3 Diversité de la construction en terre crue	19
II.4 Les techniques de construction en terre crue	20
4.1 Technique du pisé	20
4.2 Technique de l'adobe	21

TABLE DES MATIERES

4.3	Technique du Torchis	22
4.4	Technique de la bauge	23
II.5	Brique de terre compressée (BTC)	24
II.6	Normes, recommandations et Critères de choix des matériaux	26
6.1	Normes et recommandations	26
6.2	Choix des matériaux	27
6.2.1	Distribution granulométrique	27
6.2.2	Plasticité : Pouvoir à se déformer sans se fissurer ou se désintégrer	28
6.2.3	Compactage	29
6.2.4	Résistance à la compression simple	29
II.7	Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées	30
7.1	Stabilisation avec ciment	30
7.2	Stabilisation avec la chaux	31
7.3	Stabilisation avec des liants minéraux alternatifs	31
7.4	Stabilisation avec des liants organiques.	33
II.8	Avantages du matériau terre	34
II.9	Inconvénients de la construction en terre	34
II.10	Conclusion	35
 CHAPITRE III : TRAITEMENT DES SOLS		
III.1	Introduction	37
III.2	Produits de traitements classiques	37
2.1	Liants hydrauliques	37
2.1.1	Ciment	37
2.2.2	Pouzzolane naturelle	39
3.2.3	Cendres volantes	39
3.2.4	Laitiers de hauts fourneaux	40
3.2.5	Dolomie	40
3.2.6	Chaux	41
➤	Chaux vive	41
➤	Chaux éteinte	41
➤	Lait de chaux	42
➤	Chaux vive lourde	42
2.2	Avantages du traitement	43
2.2.1	Avantages techniques	43
2.2.2	Avantages économiques	43
2.2.3	Avantages écologiques et environnementaux	43
III.3	Fibres	44
3.1	Types de fibres utilisées dans le domaine de la construction	44
3.2	Fibres naturelles	44
3.2.1	Fibres animales	44
3.2.2	Fibres minérales	44
3.2.3	Fibres végétales	45
3.2.3	Classification des fibres végétales	45
3.3	Fibres chimiques	46
3.3.1	Fibres artificielles	46
3.3.1.1	Fibres de caoutchouc	46
3.3.1.2	Fibres de verre	46
3.3.2	Fibres synthétiques	47
III.4	Généralité sur les bio-polymères	47
III.5	Classification des bio-polymères	48
5.1	Polysaccharides	48

TABLE DES MATIERES

5.1.1 Cellulose	49
5.1.1.1 Bouse de vache et crottin	49
a) Matière première	49
b) Principes et interprétation	49
5.1.1.2 Fibres fermentées	50
a) Matière première	50
b) Principes et interprétation	50
5.1.1.3 Papier washi	51
a) Matière première	51
b) Principes et interprétation	51
5.1.2 Gel végétal	52
5.1.2.1 Cactus, agave, aloès	52
a) Matière première	52
b) Principes et interprétation	53
5.1.2.2 Eau gluante	53
a) Matière première	53
b) Principes et interprétation	53
5.1.2.3 Algues	54
a) Matière première	54
b) Principes et interprétation	54
5.1.3 Amidon	54
5.1.3.1 Farines de blé	55
a) Matière première	55
b) Principes et interprétation	56
5.1.3.2 Gomme arabique	56
a) Matière première	57
b) Principes et interprétation	57
5.2 Lipides	57
5.2.1 Huile de lin	57
a) Matière première	58
b) Principes et interprétation	58
5.2.2 Beurre de karité	59
a) Matière première	59
b) Principes et interprétation	59
5.3 Protéines	60
5.3.1 Caséine	60
a) Variantes	61
b) Principes et interprétation	61
c) Pourquoi la caséine précipite telle après ajout d'acide ?	62
5.3.2 Production de Caséine	62
5.3.2.1 Recette de colle de caséine	63
5.3.3 Utilisation de la caséine en géotechnique	64
5.3.4 L'ovalbumine et l'albumine du sang	65
5.4 Autres molécules complexes	66
5.4.1 Tanin	66
a) Matière première	66
b) variantes	67
III.6 Conclusion	68
CHAPITRE IV : ESSAIS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE DES RESULTATS	
IV.1 Introduction	70
IV.2 Situation géographique et caractéristiques du sol utilisé	70

TABLE DES MATIERES

IV.3 Essais d'identification	70
3.1 Analyse granulométrique par lavage et sédimentométrie selon les normes NF P18-560 et NF P94-057	70
3.2 Essai au bleu de méthylène (VBS) selon la norme AFNOR NF P 94-068	73
3.3 Limites d'Atterberg (NORME NF P 94-051)	73
3.3.1 Limite de liquidité (WL)	73
3.3.2 Limite de plasticité WP	77
3.3.3 Limite de Retrait linéaire LR la norme BS 1377	80
IV.4 Classification du sol étudié	81
4.1 Selon GTR selon NF P11-300	81
4.2 Selon AASHTO	82
4.3 Essai Proctor normal selon la norme NF 94-093	83
4.4 Essai de Proctor modifié	84
IV.5 Positionnement du sol naturel (SN) par rapport aux recommandations pour les BTC	85
5.1 Vis-à-vis de la granulométrie	85
5.2 Vis-à-vis des limites d'Atterberg	86
5.3 Vis-à-vis du compactage	86
5.4 Conclusion sur l'utilisation du sol naturel (SN) dans les BTC	88
IV.6 Produit de traitement utilisé	88
6.1 Caséine	88
6.2 Choix des dosages de mélanges	89
6.3 Confection des éprouvettes	90
IV.7 Essai triaxial (NF P94-074)	92
7.1 Dispositif expérimental	92
7.2 Types d'essais triaxiaux	94
7.3 Mode opératoire et procédure de l'essai	94
7.4 Résultats des essais triaxiaux(UU)	96
7.4.1 Echantillon 01 : sol naturel (témoin)	96
7.4.2 Echantillon 02 : 99% sol traité par 1% Caséine à 7 jours de cure	97
7.4.3 Echantillon 03 : 99% sol traite par 1% Caséine à 14 jours de cure	98
7.4.4 Echantillon 04 : 98% sol traite par 2% Caséine à 7 jours de cure	99
7.4.5 Echantillon 05 : 98% sol traite par 2% Caséine à 14 jours de cure	100
7.5 Analyse des résultats des essais triaxiaux réalisés sur des échantillons témoins et des échantillons du sol traité à la Caséine	101
IV.8 Essai de compression simple selon la norme NF P94-077	102
8.1. Mode opératoire et procédure d'essai	102
8.2 Résultats des essais de compression	105
8.3 Prévision pour la résistance à la compression simple	107
IV.9 Conclusion	107
Conclusion générale	109
Références bibliographiques	112
Annexes	117

LISTE DES FIGURES

Liste Des Figures

Chapitre I		Page
Figure 1.1	Différentes couleurs d'argiles.	5
Figure 1.2	Triangle de texture.	6
Figure 1.3	Trois structures types des sédiments argileux	7
Figure 1.4	Structure des sols constituent de particules grossières et de particules fines	7
Figure 1.5	Structure Élémentaire Tétraédrique	8
Figure 1.6	Structure élémentaire Octaédrique	8
Figure 1.7	Présentation des tétraèdres et octaèdre.	8
Figure 1.8	Structure de la kaolinite	10
Figure 1.9	Structure de la Montmorillonite.	10
Figure 1.10	Structure de l'illite.	11
Figure 1.11	Structure de la montmorillonite.	12
Figure 1.12	Feuillet de la Chlorite	13
Figure 1.13	Feuillet de la Smectites	14
Figure 1.14	Effet de rétrécissement du sol	15
Chapitre II		
Figure 2.1.a	Arche de Ctésiphon.	17
Figure 2.1.b	Pyramide d'El-LAHOUN.	17
Figure 2.1.c	Ziggourat d'ETEMENANKI.	17
Figure 2.1.d	Cité CHAN-CHAN.	17
Figure 2.2	Architecture de terre dans le monde	18
Figure 2.3	"Roue" des techniques de construction en terre	19
Figure 2.4	Le coffrage du pisé.	20
Figure 2.5	Hôpital régional de Feldkirch, Vorarlberg, Autriche, 1993.	20
Figure 2.6	Schéma explicatif de préparation et construction des adobes.	21
Figure 2.7	Stockage massif d'adobes, Villa Janna, Marrakech, Maroc.	22
Figure 2.8	Technique de la construction en terre : Torchis.	22
Figure 2.9	Construction d'une maison en colombage et torchis près de Rouen, France.	23
Figure 2.10	Maison en bauge à Gevezé.	24
Figure 2.11	Système de construction monolithique en terre crue empilée (bauge).	24
Figure 2.12	Maison en BTC, photos d'Abidjan, Côte d' Ivoire.	25
Figure 2.13	Construction en blocs de terre compressée stabilisés (BTC) à Bangalore, Inde.	26
Figure 2.14	Schéma des presses manuelle et mécanique pour produire des BTC.	26
Figure 2.15	Fuseaux de courbes granulométriques conseillées pour construire en BTC, en Pisé ou en adobe.	28
Figure 2.16	Fuseaux de plasticité conseillée pour construire en BTC, en Pisé ou en BTM	28
Figure 2.17	Fuseaux de compactage recommandé pour construire en BTC,	29
Figure 2.18	Résistance à la compression simple de la terre crue (non stabilisée) séchée à l'air libre,	30
Chapitre III		
Figure3.1	Ciment.	37
Figure3.2	Pouzzolane naturelle.	39

LISTE DES FIGURES

Figure3.3	cendres volantes	39
Figure3.4	Laitiers de haut fourneau.	40
Figure3.5	Dolomie.	40
Figure3.6	Chaux vive.	41
Figure3.7	Chaux éteinte.	42
Figure3.8	Lait de chaux.	42
Figure3.9	Cycle de la chaux.	43
Figure3.10	Fibres animales.	44
Figure3.11	Fibre d'alumine.	45
Figure3.12	Classes de fibres végétales.	45
Figure3.13	Différents types des fibres des pneus de caoutchouc.	46
Figure3.14	Une mèche composée de fibres de verre.	46
Figure3.15	Différents types des fibres synthétiques	47
Figure3.16	Quatre grandes familles des bio-polymères.	48
Figure3.17	Bouse de vache.	49
Figure3.18	Conservation traditionnelle de la case obus des MOUSGOUMS (Cameroun).	50
Figure3.19	Balle est l'enveloppe qui entoure le grain de riz.	50
Figure3.20	Restauration de la Grande Mosquée de Mopti(Mali).	51
Figure3.21	Papier washi traditionnellement fabriqué au Japon.	51
Figure3.22	Fibres du papier washi sont utilisées dans la couche de finition de cet enduit.	52
Figure3.23	Pulpe de l'aloë donne un gel translucide.	52
Figure3.24	Ces feuilles sèches, fougua, font partie des végétaux qui forment des gels au contact de l'eau.	53
Figure3.25	Eau gluante (Vuolu) Ghana.	54
Figure3.26	Décoction de cette algue séchée forme un gel en refroidissant.	54
Figure3.27	Algue, Ginnan, du Japon gonfle dans l'eau froide avant d'être bouillie.	55
Figure3.28	Farine de blé.	55
Figure3.29	Farine de blé contenant de l'amidon.	56
Figure3.30	Colle de farine (Canada).	56
Figure3.31	Gomme arabique est sécrétée par les arbres de la famille des acacias.	57
Figure3.32	L'huile de lin est extraite des graines par pression à froid.	58
Figure3.33	Huile de lin	58
Figure3.34	Beurre de karité.	59
Figure3.35	Beurre de karité est extrait des noix de karité bouillies.	59
Figure3.36	Beurres de karités utilisés dans stabilisation traditionnelle.	60
Figure3.37	Molécules des caséines	61
Figure3.38	Schéma de principe de la structure des micelles de caséine	62
Figure3.39	Diagramme de la caséine en fonction de ph.	62
Figure3.40	Principales étapes des la production de Caséine	63
Figure3.41	Recette de France à base de colle de caséine.	63
Figure3.42	Modèle d'interaction bio-polymères à base de protéines.	64
Figure3.43	Traitement du sol à base de bio polymère (BPST).	65
Figure3.44	Gouttes d'eau sur un enduit de terre rouge au blanc d'œuf.	66
Figure3.45	Cosses de néré de couleur rouge-brun foncé.	67
Figure3.46	Pierres de limonite composées d'oxydes de fer.	67

LISTE DES FIGURES

Figure3.47	Décoction appliquée en badigeon sur la couche de finition.	68
Chapitre IV		
Figure4.1	Gisement de Kaolin de Bendjerrah	70
Figure4.2	Tamis dans l'ordre décroissant	71
Figure4.3	Tamisage du sol étudié	71
Figure4.4	Essai de sédimentation	71
Figure4.5	Matériel utilisé pour la sédimentation	71
Figure4.6	Courbe granulométrique du sol étudié	72
Figure4.7	Dispositif pour l'essai VBS	73
Figure4.8	Les résultats de l'essai VBS	74
Figure4.9	Classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène.	74
Figure4.10	Diagramme variation de la consistance d'un sol fin selon les limites et la variation de la teneur en eau.	75
Figure4.11	Appareil de Casagrande utilisé dans l'essai de Limite de liquidité	76
Figure4.12	Sol se referme sur une longueur de 12 à 13 mm après être tombé 25 fois.	76
Figure4.13	Détermination de la limite de liquidité	77
Figure4.14	Détermination de la limite de plasticité	78
Figure4.15	Seuils d'Argilosité	79
Figure4.16	Abaque de Casagrande	79
Figure4.17	Matériel utilisé dans l'essai de Limite de Retrait linéaire	80
Figure4.18	Deux échantillons pour l'essai du retrait	80
Figure4.19	Vue générale de l'équipement de l'essai Proctor.	83
Figure4.20	les Courbe de l'essai Proctor normal et modifié	85
Figure4.21	21 Distribution granulométrique du sol naturel et le fuseau recommandé pour le BTC.	86
Figure4.22	Limites d'Atterberg du sol naturel et le fuseau recommandé pour BTC	86
Figure4.23	Essais de compactage (OPN et OPM) du sol naturel (SN) et la zone recommandée pour les BTC.	87
Figure4.24	Caséine en poudre	88
Figure4.25	Mélange sol-liant à sec,	89
Figure4.26	Mélange dans des sacs en plastique	89
Figure4.27	Machine de compactage UNIFRAME	90
Figure4.28	Eprouvettes compactées statiquement	91
Figure4.29	(a) la trousse coupante, (b) Echantillon après extraction, (c) Fil métallique.	91
Figure4.30	Eprouvettes du sol traité scellées dans un papier film	91
Figure4.31	Eléments principaux de l'appareil de triaxial	93
Figure4.32	Appareil triaxial du laboratoire (LGCH) Guelma	93
Figure4.33	Etapes de déroulement de l'essai triaxial	96
Figure4.34	Relation déviateur-déplacement vertical du sol témoins.	96
Figure4.35	Détermination des paramètres de cisaillement de l'échantillon témoin.	97
Figure4.36	Relation déviateur-déplacement vertical du 99% sol traite par 1% Caséine à 7jours.	97
Figure4.37	Détermination des paramètres de cisaillement du 99% sol traite par 1% Caséine à 7jours.	98

LISTE DES FIGURES

Figure4.38	Relation déviateur-déplacement vertical du 99% sol traite par 1% Caséine à 14jours.	98
Figure4.39	Détermination des paramètres de cisaillement du 99% sol traite par 1% Caséine à 14jours.	99
Figure4.40	Relation déviateur-déplacement vertical du 98% sol traite par 2% Caséine à 7 jours.	99
Figure4.41	Détermination des paramètres de cisaillement du 98% sol traite par 2% Caséine à 7jours.	100
Figure4.42	Relation déviateur-déplacement vertical du 98% sol traite par 2% Caséine à 14 jours.	100
Figure4.43	Détermination des paramètres de cisaillement du 98% sol traite par 2% Caséine à 14jours.	101
Figure4.44	Histogramme des résultats finaux des essais triaxiaux traités par différents dosages de Caséine.	102
Figure4.45	Diverses procédures de l'essai de compression simple	105
Figure4.46	Histogramme des résultats finaux de la résistance à la compression simple	106
Figure4.47	Courbes des effets du dosage et le temps sur la résistance moyenne à la compression simple.	106
Figure4.48	Courbes des interactions de la résistance moyenne à la compression en fonction de temps pour différents dosages.	107

LISTE DES TABLEAUX

Liste Des Tableaux

CHAPITRE I		Page
Tableau1.1	Classification des principaux groupes de minéraux argileux et de leurs espèces.	9
Tableau1.2	Synthétise et compare les caractéristiques de ces trois argiles	11
Tableau1.3	Surface spécifique et C.E.C de quelques minéraux argileux	15
CHAPITRE II		
Tableau2.1	Programme de construction en Terre, en Algérie depuis 1970,	18
Tableau2.2	Classification granulométrique des sols selon ASTM D2487 [27
Tableau2.3	Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées au ciment.	31
Tableau2.4	Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées à la chaux	31
Tableau2.5	Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées avec des liants minéraux alternatifs.	32
Tableau2.6	Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées avec des liants organiques	33
CHAPITRE III		
Tableau3.1	Différents types de ciments courants.	38
Tableau3.2	Caséine couramment utilisés en géotechnique.	64
CHAPITRE IV		
Tableau4.1	Données des essais d'analyse granulométrique et la sédimentométrie	72
Tableau4.2	Tableau récapitulatif de l'essai VBS	74
Tableau4.3	Classification du sol étudié	75
Tableau4.4	Résultats de la limite de liquidité	77
Tableau4.5	Résultats de la limite de plasticité	78
Tableau4.6	Etat du sol en fonction de l'indice de plasticité	78
Tableau4.7	Limites d'Atterberg de certaines argiles d'après (Monaco A. et CHASSEFIERE B.1976)	79
Tableau4.8	Résultat de l'essai du retrait	81
Tableau4.9	Classification des sols fins selon GTR	81
Tableau4.10	Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature	82
Tableau4.11	Tableau de classification AASHTO	83
Tableau4.12	Résultats de l'essai Proctor Normal	84
Tableau4.13	Résultats de l'essai Proctor modifié	84
Tableau4.14	La teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale pour chaque essai	86
Tableau4.15	Teneurs en eaux initiales et les poids volumiques secs maximales des BTC	87
Tableau4.16	Quantités de chaque composant des mélanges sol - liant	90
Tableau4.17	Résultats finaux des essais triaxiaux traités par différents dosages de Caséine	101
Tableau4.18	Quantités de chaque composant des mélanges sol - liant	105
Tableau4.19	Résultats finaux de la résistance à la compression simple	105

Notations et Symboles

USDA: United States Department of Agriculture.

C.E.C : Capacité d'Echange Cationique

CAP : Centre Algérien du Patrimoine.

BTC: Brique de Terre Compressée

ASTM: American Society for Testing and Materials

GTS : Guide Du Traitement De Sol

LHR : Liant Hydraulique Routier

GTR : Guide De Terrassement Routier

VBS : Valeur de Bleu de Méthylène.

OPN : Optimum Proctor Normal

OPM : Optimum Proctor Modifié

CU : Essais triaxial consolidés-non drainés.

UU : Essais triaxial non consolidés-non drainés.

CD : Essais triaxial consolidés-drainés.

VBS : Valeur de Bleu de Méthylène.

I_P : Indice de plasticité.

L_P : Limite de plasticité.

L_L : Limite de liquidité.

W_{opt} : La teneur en eau optimum.

Φ' : Angle de frottement interne

C : Cohésion.

ρ_d: Masse volumique sèche

ρ_h: Masse volumique humide.

σ₃: Contrainte principale mineure.

σ₁: Contrainte principale majeure.

R_c : résistance à la compression simple

Introduction

Générale

Introduction générale

La croissance démographique dans les zones urbaines s'accompagne d'une forte demande de logements. D'un de vue économique, cela a été une aubaine pour les professionnels de la construction dont le chiffre d'affaires a augmenté au fil des années. En Algérie, le secteur du bâtiment a connu des problèmes, afin de fournir le nombre requis pour couvrir les besoins nécessaires. Ce besoin de la construction rapide est lié à la consommation des matériaux courants comme l'acier et le béton. La capacité de durcissement en un temps record, les résistances mécaniques élevées, la flexibilité d'un point de vue architectural ainsi que son excellente durabilité ont fait du béton un matériau de référence de la construction. Glavind et al., 2009 ont estimé qu'avec près de 10 milliards de tonnes chaque année, le béton est le matériau le plus utilisé dans le monde. Cette importante consommation de béton s'accompagne d'une forte demande en ciment qui en est le constituant essentiel. Pacheco-Torgal et al., 2011 ont estimé la consommation mondiale en ciment à près de 6 milliards de tonnes dont environ 50% reviennent aux pays en voie de développement et notent une baisse de la demande dans les pays développés par rapport aux pays en voie de développement. Ceci traduit le fait que, dans les prochaines décennies, les pays en voie de développement feront face à un défi croissant en matière de construction notamment de logements à cause de leur croissance démographique et les auteurs ont envisagé le béton comme le principal matériau qu'utiliseront ces pays pour répondre à ce défi.

Or, la prise de conscience des conséquences de l'activité humaine sur le réchauffement climatique conduit à remettre en question le modèle de croissance de l'ensemble de l'industrie, y compris la construction. En fait, Taylor et al., 2006 ont rapporté que la part de la production du ciment dans les émissions mondiales de CO₂ a été estimée à 9-10 %, ce qui représenterait 74-81 % des émissions de CO₂ du béton (Pacheco-Torgal et al., 2011). A cela s'ajoute désormais une consommation importante de certains composants de base du béton, en l'occurrence le sable dit constructible. Tout cela conduit aux limites du modèle de construction popularisé jusqu'à présent : tout construire en béton de ciment.

En raison de ce contexte, l'accent a été renouvelé sur le développement de matériaux de construction alternatifs qui respectent l'environnement et surtout s'adaptent aux typologies de

construction et sont disponibles localement. La terre crue s'impose alors comme un candidat sérieux. Un coup d'œil sur le patrimoine construit en terre vierge montre qu'il a une histoire et une culture riches qui peuvent inspirer l'architecture moderne.

La reconsidération de ce matériau de construction, après près d'un siècle d'abandon dans les pays développés au profit des matériaux cimentaires, ont ses avantages écologiques et socio-économiques ainsi que ses propriétés hygroscopiques. Minke et al., 2009; Houben et al., 2006; Morton et al., 2008 détaillent toutes ces qualités de la terre crue. Cette construction s'agit d'un mélange de base de terre plus ou moins argileuse avec de l'eau et séchée au soleil. L'agglomération des blocs et leur résistance est due à la cohésion de la fraction argileuse qui joue le rôle de liant naturel. Plusieurs modes de fabrication ont été développés au fil des âges : l'adobe, le pisé, la bauge, le torchis et plus récemment les briques de terre comprimée (BTC) ou extrudée, et la terre coulée (béton de terre). Enfin, une des qualités les plus promues de la terre crue, est sa capacité hygroscopique. En effet, son aptitude à absorber et rejeter l'humidité de l'air intérieur au gré des fluctuations du microclimat du bâtiment garantit un confort intérieur passif qui permettrait d'économiser de l'énergie.

En dépit de tous ses avantages, le matériau en terre crue doit surpasser l'obstacle d'une réglementation limitée, de résistances mécaniques et d'une tenue à l'eau faibles vis-à-vis des matériaux cimentaires pour passer le cap de l'industrialisation (Morton et al., 2008). Sur le plan des résistances mécaniques, bien qu'elles soient de loin inférieures au béton, la stabilisation n'est pas absolument nécessaire pour que les choix architecturaux s'adaptent aux limites du matériau. Certaines pratiques traditionnelles, notamment dans les pays en voie de développement, et quelques récentes études scientifiques ont montré que l'utilisation de liants organiques d'origine naturelle pouvait être une alternative plus prometteuse du point de vue environnemental aux liants minéraux. Ces produits organiques présentent une très grande diversité et donc un potentiel important d'étude scientifique à l'image de la variété de pratiques selon l'endroit du globe.

L'objectif de notre travail est de proposer une méthode de stabilisation de la terre crue à faible impact environnemental et économique utilisant un matériau de terre locale (le gisement d'argile de BenDjerrah et un liant bio-sourcé et renouvelable (la caséine). Ce travail est mené dans le cadre du projet de fin d'étude de Master au sein du département de Génie Civil et d'Hydraulique de l'université 8 Mai 1945 Guelma.

INTRODUCTION GENERALE

Le mémoire est scindé en quatre chapitres.

Dans le chapitre 1, des généralités sur les sols argileux sont présentées en Détails.

Le chapitre 2 dédié à la présentation de l'état de l'art sur la construction en terre crue sur toute la technique de la brique en terre compressée BTC, ainsi que les fuseaux recommandés pour la construction en BTC.

Le chapitre 3 expose les différents liants utilisés dans la stabilisation des sols, avec les liants classiques le ciment et la chaux, les fibres artificiels et organiques, des liants bio-sources.

A la fin de ce chapitre, une partie bibliographique tentera d'expliquer les mécanismes qui ont lieu dans les mélanges sols et liants (la caséine) qu'on va utiliser dans notre étude.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats des essais d'identification du sol utilisé (argile de Bendjerrah) et la vérification vis-à-vis des normes de BTC recommandées. Enfin, nous nous intéresserons aux résultats des essais Proctor sur les terres stabilisées que nous utiliserons pour formuler les éprouvettes en BTC stabilisées pour étudier les paramètres mécaniques de ce matériau. La discussion des résultats portera sur les effets d'un certain nombre de paramètres : la durée de cure humide ainsi que la quantité (0, 1, 2 et 4%) de liants utilisés.

Enfin, ce manuscrit de thèse se terminera par une conclusion générale de nos travaux et une présentation de nombreuses perspectives possibles.

CHAPITRE I :
GÉNÉRALITÉS SUR
LES SOLS ARGILEUX

Chapitre I : Généralités Sur Les Sols Argileux

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous parlerons d'un type de sol fin appelé sol argileux avec ses différents types. Les sols sont des matériaux hétérogènes aux propriétés très variables. Les développements de la mécanique des sols, et la recherche en techniques géotechniques, ont permis de mieux connaître les sols par des essais de caractérisation afin de développer des techniques d'amélioration des sols à faibles propriétés mécaniques.

I.2 Définition des sols fins

Les sols fins où les éléments fins sont divisés en deux groupes, argile et limon. Les particules d'un diamètre de 75 μm à 2 μm sont appelées limon et les particules à inférieur de 2 μm de diamètre sont appelées argiles. [1]

2.1 Quelques caractéristiques des sols fins

- Les sols fins sont identifiés sur la base de leur plasticité. Les particules individuelles ne sont pas visibles à l'œil nu.
- La description des sols fins est effectuée sur la base de leur résistance à sec, de leur dilatance, de leur dispersion et de leur plasticité.
- Les sols fins présentent une faible capacité portante.
- Les sols fins sont pratiquement imperméables par nature en raison de la petite taille de leurs particules.
- Le changement de volume se produit avec le changement de teneur en eau.
- La résistance change avec le changement de la condition d'humidité.
- Le sol fin est susceptible au gel.
- Les propriétés techniques sont contrôlées par des facteurs minéralogiques. [1]

I.3 Argiles

En général le terme argile s'applique à tous les matériaux dont la fraction granulométrique prédominante (taille des particules) est inférieure à 2 μ . Elle est une roche sédimentaire composée pour une large part de minéraux argileux et couleurs (**Figure 1.1**), en général des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant une structure feuilletée expliquant leur plasticité, ou fibreuse expliquant leurs qualités d'absorption. [2]



Figure1.1 Différentes couleurs d'argiles. [26]

3.1 Granulométrie des particules

L'argile possède la plus petite taille de particules de tous les types de sol, les particules individuelles étant si petites qu'elles ne peuvent être visualisées qu'au microscope électronique. Cela permet à une grande quantité de particules d'argile d'exister dans un espace relativement petit, sans les espaces qui seraient normalement présents entre les plus grosses particules de sol. Cette caractéristique joue un rôle important dans la texture (figure1.2) lisse de l'argile, car les particules individuelles sont trop petites pour créer une surface rugueuse dans l'argile. [1]

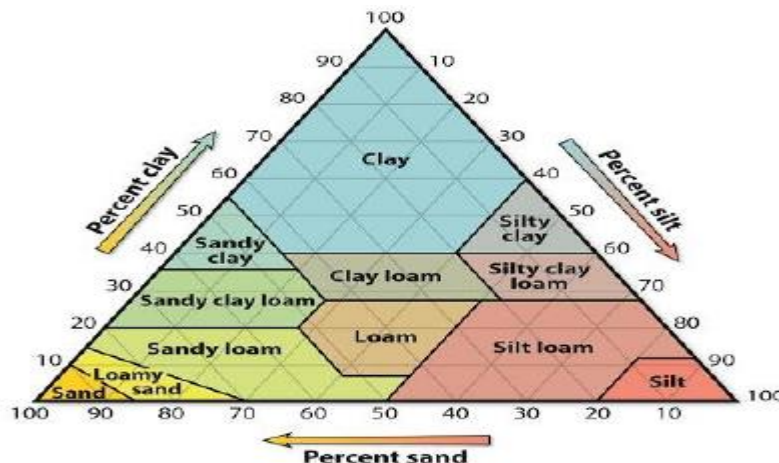


Figure1.2 Triangle de texture. (USDA).

3.2 Structure physique des argiles.

Les particules d'argile qui constituent la base des sols argileux ont des propriétés très différentes de celles des particules des sols grenus. Chaque particule d'argile est normalement entourée de couches de molécules d'eau plus ou moins liée, aux propriétés différentes de celles de l'eau libre. On admet généralement que le contact de deux particules d'argile peut être de type « solide-solide », de type « air-solide », de type « eau-solide » ou « eau-eau », ou être contrôlé par des forces de répulsion ou d'attraction électrique. Mais toutes ces représentations des contacts de particules de dimensions inférieures au micromètre sont encore un peu hypothétiques et les recherches se poursuivent pour mieux les caractériser. Nous retiendrons que la pesanteur joue un rôle secondaire dans l'arrangement des particules d'argile et que les forces dominantes sont les forces d'attraction et de répulsion électrique, qui conditionnent le volume occupé par une masse donnée de particules d'argile. Des expériences de laboratoire ont montré que la floculation des particules d'argile (qui leur fait occuper un plus grand volume) est favorisée par l'augmentation de la concentration en électrolyte (par

exemple le chlorure de calcium), de la valence des ions et le PH. Ces comportements élémentaires expliquent par exemple pourquoi les argiles déposées dans l'eau de mer sont différentes des argiles déposées en eau douce ou dans des lagunes. Les résultats finals des interactions physico-chimiques des particules lors de la sédimentation des argiles est qu'il existe des structures plus ou moins lâches, dont la représentation traditionnelle est donnée sur la figure1.3 : une structure floculée « en nid d'abeilles » ou les particules forment des sortes de chaines fermées, une structure floculée « en château de cartes » ou les particules s'appuient les unes sur les autres et une structure dispersée ou les particules sont empilées « structure en paquet de cartes ». [5]

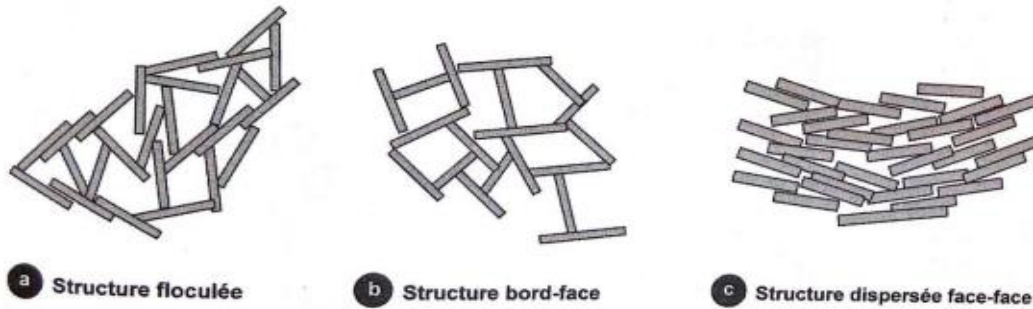


Figure1.3 Trois structures types des sédiments argileux. [5]

Dans le cas fréquent des sols comportant à la fois des particules grossières et des particules argileuses, les structures observées sont des combinaisons des précédentes, suivant les conditions physico -chimiques de la sédimentation. On pourra par exemple trouver des structures lâches (Figure1.4.a) ou des structures plus denses (Figure1.4.b). [5]

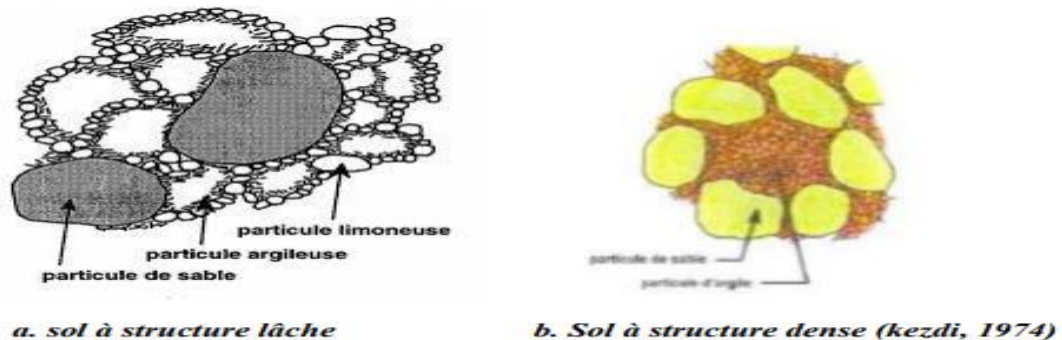


Figure1.4 Structure des sols constituent de particules grossières et de particules fines [5]

3.3. Structure élémentaire des minéraux argileux

Minéraux argileux sont composés par l'assemblage, d'eau (H₂O), de silice, sous forme de silicates (SiO₃) et d'aluminium, sous forme d'alumine (Al₂O₃). Leur structure élémentaire, appelée feuillet, est constituée d'un arrangement de deux cristaux de base : silicates et alumines. Chaque minéral argileux est composé d'un empilement de feuillets. Ce dernier a un nombre variable de couches pouvant être regroupées en deux types :

➤ **Tétraèdre de silice SiO_4** : Quatre atomes d'oxygène disposés au sommet d'un tétraèdre régulier enserrant un atome de silicium. Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches tétraédriques (Figure1.5).

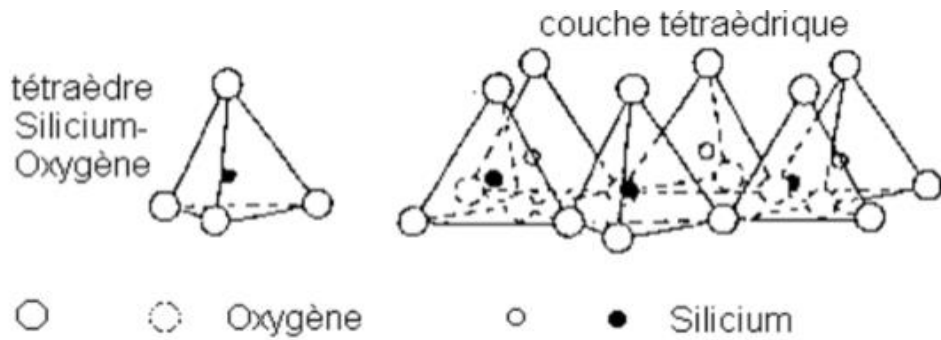


Figure1.5 Structure Élémentaire Tétraédrique. [4]

➤ **Octaèdre d'alumine $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ ou de magnésium $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$** : Six ions hydroxydes enserrant un atome d'aluminium ou de magnésium. Les octaèdres se combinent également pour former des couches planes dites couches octaédriques (Figure1.6). [4]

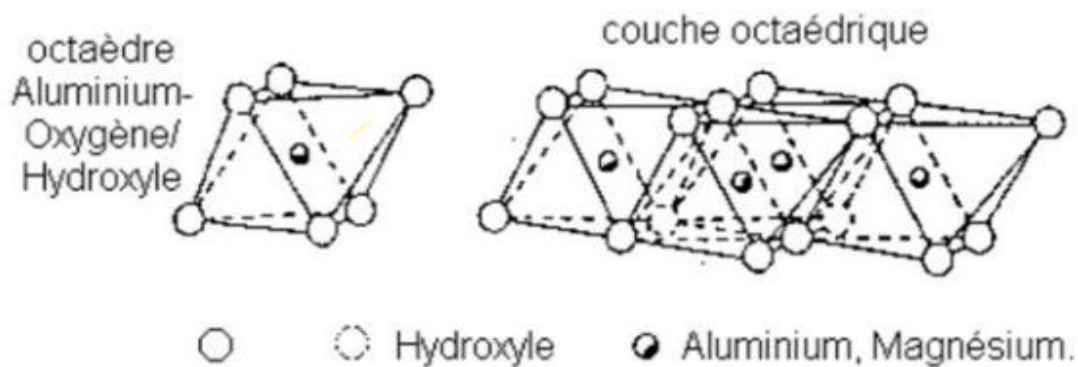


Figure1.6 Structure élémentaire Octaédrique. [4]

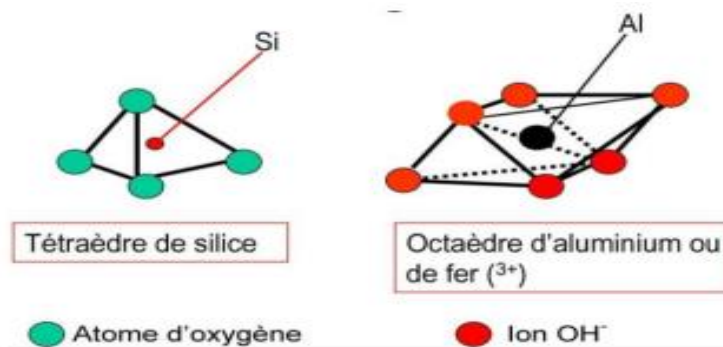


Figure1.7 Présentation des tétraèdres et octaèdre. [4]

I.4 Classification des argiles

Les différents groupes de minéraux argileux se différencient par l'arrangement des couches tétraédriques et octaédriques. On distingue 4 groupes : [8]

4.1 Minéraux à 7 Å : (Kaolinite, Halloysite, Dombasite,)

Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T : O ou de type 1:1.

4.2 Minéraux à 10 Å : (Pyrophyllite, Illite, Montmorillonite, Saponite,...).

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.

4.3 Minéraux à 14 Å : (chlorites)

Le feuillet est constitué de l'alternance de feuillets T : O : T et de couches octaédriques interfoliaires.

4.4 Minéraux inter stratifiés :

L'épaisseur du feuillet est variable. Ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes ci-dessus.

Les principaux groupes de minéraux argileux sont classés dans le tableau I.1.

Tableau1.1 Classification des principaux groupes de minéraux argileux et de leurs espèces. [8]

Groupe de Minéraux Argileux	Espèce Minérale	Structure T= couche de tétraèdre O= couche d'octaèdre
Kaolinites	Kaolinite Halloysite Dickite	Minéraux à 2 couches T-O T-O
Smectites	Montmorillonite Saponite Beidellite Nontronite	Minéraux à 3 couches T-O-T T-O-T
Illites Vermiculites Micas	Illite Vermiculite Muscovite Biotite	H ₂ O, cations
Chlorites	Chlorite	Minéraux à 4 couches T-O-T-O T-O-T-O
Sépiolites Palygorskites	Sépiolite (écume de mer) Attapulgate	Minéraux en lattes T-O-T T-O-T T-O-T

I.5 Types d'argile

Les types d'argiles les plus fréquents sont :

5.1 Kaolinite

La kaolinite est constituée d'une succession alternée de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite). Les deux feuillets sont liés de telle manière que les sommets du feuillet de silice et ceux d'une des couches du feuillet en octaèdre ne forment qu'une seule et même couche.[4]

Formule structurale: $\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2, 2\text{H}_2\text{O}$ (Figure1.8).

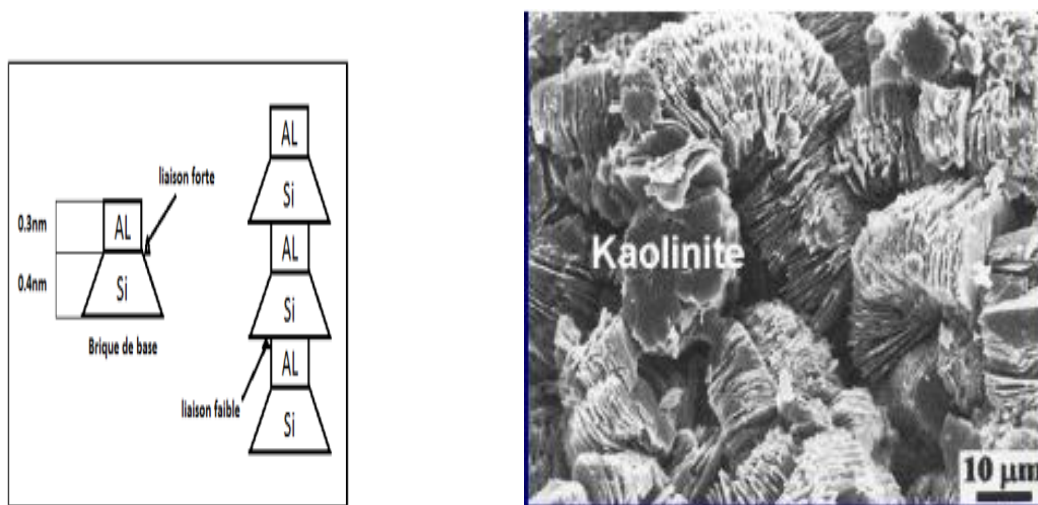


Figure. 1.8 Structure de la kaolinite [4 ,6]

5.2 Montmorillonite

La montmorillonite, parfois appelée Smaltite, est un minéral argileux important composé de deux feuillets de Silice et d'un feuillet d'Alumine (Gibbsite). Les feuillets en octaèdres se trouvent entre deux feuillets de Silice et les sommets des tétraèdres se confondent avec les hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former qu'une seule couche. Les sols qui contiennent de la montmorillonite peuvent être gonflants lorsque leur teneur en eau augmente, les pressions de gonflements qui en résultent peuvent provoquer la dissociation complète des feuillets ce qui va causer des dommages aux structures légères et pavages (Figure1.9). [4]

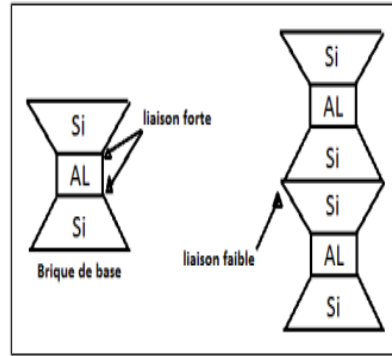


Figure1.9 Structure de la Montmorillonite. [Lambel 1953]

5.3 Illite

L'illite est une autre composante importante des sols argileux, elle a une structure analogue à la montmorillonite mais il ya des ions de potassium intercalés entre les feuillets tétraédriques. Grâce à ces ions la liaison est relativement forte et les molécules d'eau ne peuvent pratiquement plus s'intercaler. Aux extrémités de la particule d'argile, il y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations. Ces cations dits échangeables jouent un rôle important dans le comportement des argiles et Formule structurale: $(K, H_3O) Al_2(Si_3Al) O_{10} (H_2O, OH)_2$ (Figure1.10). [4]

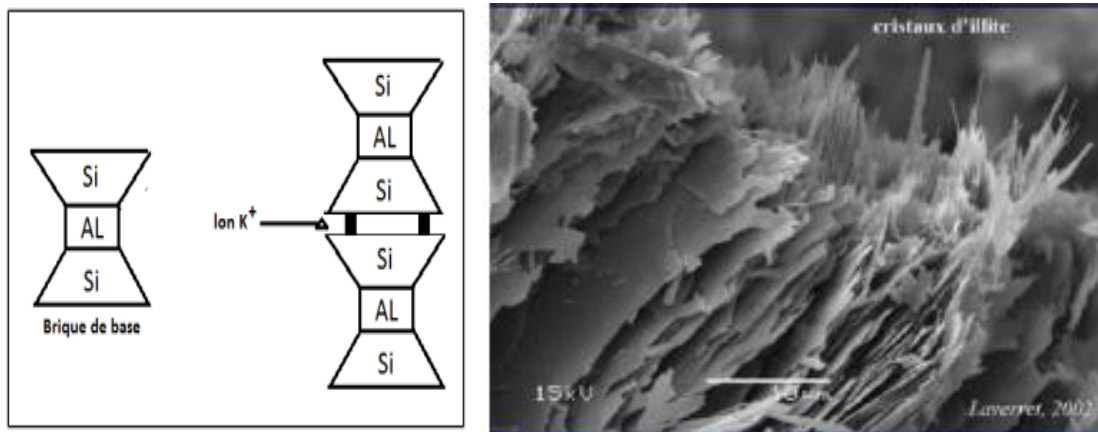





Figure1.10 Structure de l'illite. [Lambel 1953] [6]

Tableau1.2 Synthétise et compare les caractéristiques de ces trois argiles [7]

Type d'argile	Feuillets Elémentaires	Nombre de feuilletts par particule	Dimensions d'une particule	
			largueur en μm	épaisseur en μm
<i>Kaolinite</i>		100-150	1	0,1
<i>Illite</i>		10	0,3	0,01
<i>Montmorillonite (Na)</i>		1	0,1	0,001

5.4 Bentonite

La bentonite est une argile douée de propriétés de surface (caractère, affinité pour l'eau, capacité d'adsorption de composés électropositifs,...). Les caractéristiques physico-chimiques, les propriétés clarifiants de bentonites d'origines diverses firent l'objet de nombreuses études. En Algérie, les gisements de bentonite les plus importants économiquement se trouvent dans l'oranie (ouest algérien). On relève en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Boughrara) dont les réserves sont estimées à un million de tonnes et de celle de Mostaganem (M'zila) avec des réserves de deux millions de tonnes. [7]

5.4.1 Origine de la bentonite

Les bentonites sont des argiles d'origine volcanique, constituées principalement de montmorillonite; l'altération et la transformation hydrothermale de cendres des tufs volcaniques riches en verre entraînent la néoformation des minéraux argileux, qui font partie principalement du groupe des smectites. Les roches argileuses ainsi formées portent le nom de bentonite, d'après le gisement situé près de Fort Benton (Wyoming, Etats-Unis). Elle contient plus de 75 % de montmorillonite ; cette dernière fut découverte pour la première fois en 1847 près de Montmorillon, dans le département de la Vienne (France). La bentonite est une dénomination de la montmorillonite. Les bentonites découvertes dès 1888 contiennent au moins 75% de montmorillonite. [7]

5.4.2 Structure et composition

Sous sa forme brute naturelle, la bentonite est une roche tendre ayant à peu près la consistance du kaolin, c'est à dire friable, onctueuse au toucher, sa teinte est blanche, grise ou légèrement teinte de jaune. Elle provient de la dévitrification des couches volcaniques sous l'influence des eaux à réaction alcaline ou acide. En plus de la montmorillonite (Figure1.11), cette terre peut contenir d'autres minéraux argileux (kaolinite, illite,...) ainsi que des impuretés sous forme de gypses, de carbonates,...etc. [7]

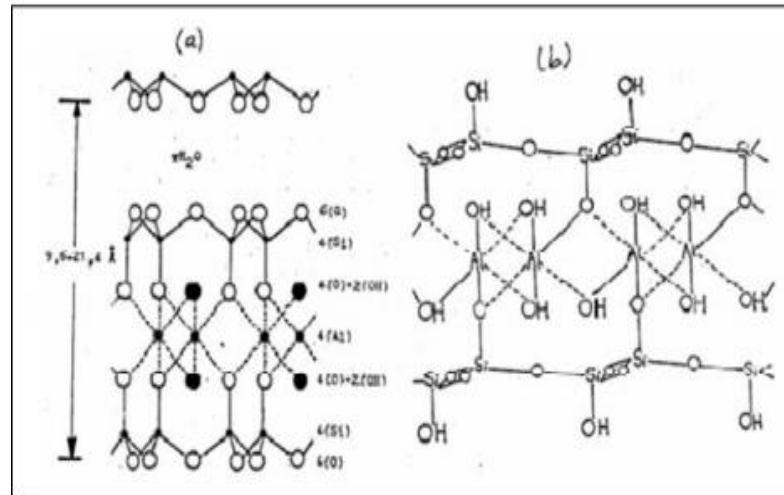


Figure 1.11 Structure de la montmorillonite. [7]

5.4.3 Types de la bentonite

- Bentonites naturelles
- Bentonites activées

5.4.4 Utilisation de la bentonite

La bentonite est l'argile industrielle la plus importante en raison de son principal composant de montmorillonite qui lui confère une capacité d'absorption et de gonflement très élevées qui sont exploités dans différents domaines :

- Protection environnementale.
- Forage.
- Les céramiques.
- Les peintures.
- L'agroalimentaire.
- Décoloration des huiles.
- Raffinage du pétrole.
- Additif dans la fabrication du papier.
- Génie civil (additif dans le ciment).
- Traitement des eaux usées.
- La pharmacie et la cosmétique. [8]

5.5 Chlorites

Les chlorites sont des argiles de composition semblable à celle des smectites. L'espace inter foliaire contient une couche composée de magnésium (Mg^{2+}) et d'ions hydrogène (OH^-). L'Aluminium (Al^{3+}) est remplacé localement par le fer (Fe^{2+}), la liaison inter foliaire est, de ce fait, affaiblie, ce qui permet une infiltration d'eau (Figure 1.11). Les chlorites existent parfois dans les roches magmatiques. Elles sont également rencontrées dans les roches sédimentaires. Les argiles contenant un pourcentage de chlorite supérieur à 15% peuvent être sujettes de gonflement. [5]

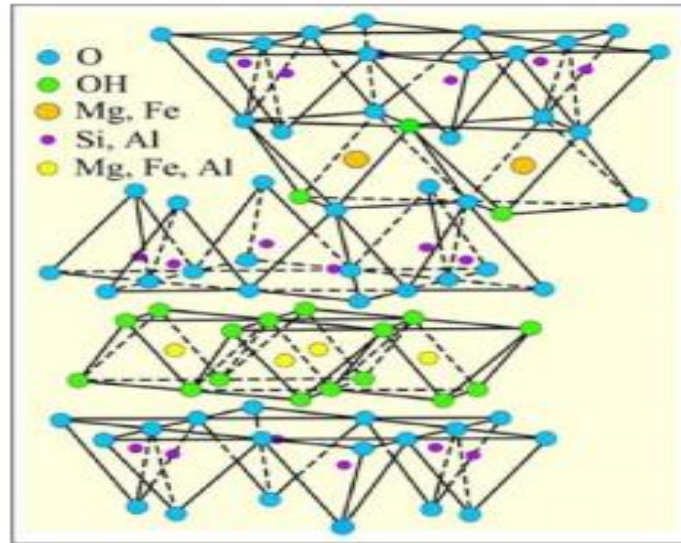


Figure1.12 Feuille de la Chlorite. [5]

5.6 Smectites

Sa structure est similaire à celle des illites, sauf que l'empilement des feuillets élémentaires est composé de feuillets renversés. L'empilement met en contact deux couches d'oxygène appartenant au tétraèdre de silice, rendant ainsi la liaison inter foliaire faible. La distance inter foliaire est à l'origine, de 14Å°. Elle peut s'élargir pour atteindre 18Å°. Les liaisons entre les feuillets sont moins fortes que celles des kaolinites et des illites. La structure minéralogique des smectites offre de grands espaces inter foliaires. De ce faite, l'inclusion de molécules d'eau ou de matières organiques et cations est favorisée (figure 1.13). Le potentiel de gonflement de ce type d'argile est, par conséquent, élevé. [5]

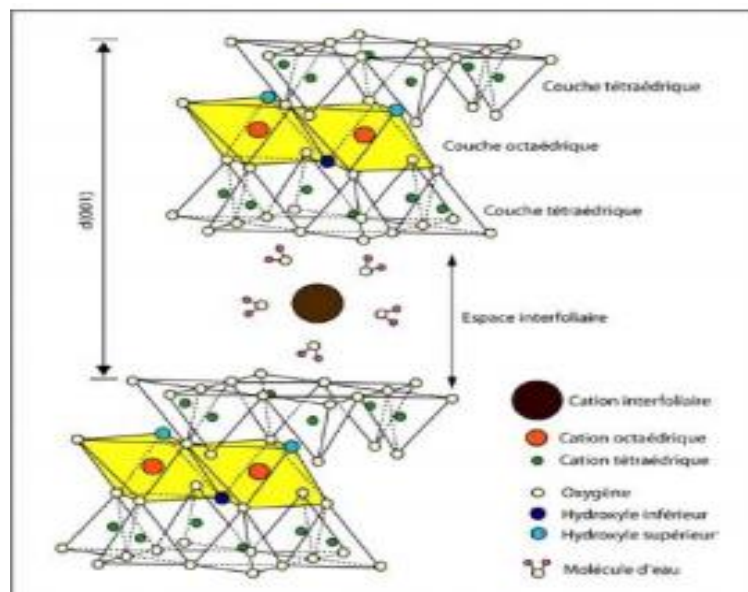


Figure1.13 Feuille de la Smectites. [5]

I.6 Propriétés des argiles

Les propriétés bien particulières des minéraux argileux sont dues à la petite taille, la structure en feuillets et la charge négative des particules. Elles forment avec l'eau des solutions colloïdales qui flocculent lorsque les charges de surfaces des particules sont neutralisées par des ions. Ce phénomène est réversible : les particules retrouvent l'état dispersé lorsque les ions sont éliminés par rinçage. Les argiles fixent l'eau par adsorption à leur surface et augmentent de volume par gonflement. Elles constituent ainsi une réserve d'eau. L'argile sèche développe une tension de succion importante pour l'eau qui peut s'opposer à celle des racines des plantes. Avec adjonction croissante d'eau, la tension de succion diminue, l'ensemble eau- argile devient plastique, puis visqueux et finalement les particules d'argiles se dispersent dans l'eau en formant une solution colloïdale. L'argile imprégnée d'eau qui se dessèche se rétracte et se casse par des fentes de retrait (Figure1.14). [7]



Figure1.14 Effet de rétrécissement du sol [1]

Tableau1.3 Surface spécifique et C.E.C de quelques minéraux argileux [Morel, 1996].

Minéral	Surface interne (m ² .g ⁻¹)	Surface externe (m ² .g ⁻¹)	Surface totale (m ² .g ⁻¹)	C.E.C (m éq /100g)
Kaolinite	0	10-30	10-30	5-15
Illite	20-55	80-120	100-175	10-40
Smectites	600-700	80	700-800	80-150
Vermiculite	700	40-70	760	100-150
Chlorite	-	100-175	100-175	10-40

I.7 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons passé en revue une recherche bibliographique sur les différents types de sols argileux, leur type et leur structure, et leurs caractéristiques les plus importantes, ainsi que sur l'un de ses types, qui est la bentonite.

CHAPITRE II :
CONSTRUCTION
EN TERRE CRUE

Chapitre II : Construction En Terre Crue

II.1 Introduction

La terre est un matériau disponible en quantité offrant une très large gamme de possibilités pour la construction des bâtiments. Les techniques de construction en terre ont évolué à travers l'histoire de l'humanité et les techniques les plus importantes sont le torchis, le pisé, l'adobe et la bauge. Dans le présent chapitre, on présente ces techniques et leur mode de mise en œuvre ainsi que les critères de choix des matériaux destinés à la construction en terre.

On mettra l'accent sur la brique de terre compressée sans oublier les aspects essentiels du comportement de la BTC.

II.2 Rappel historique

La terre, utilisée depuis plus de onze millénaires, est sans aucun doute un des matériaux de construction les plus anciens de l'histoire de l'humanité. En effet, les fouilles archéologiques ont montré que les civilisations perses, assyriennes, égyptiennes et babyloniennes édifiaient déjà de nombreux bâtiments à l'aide de ce matériau. Certains étaient même monumentaux tout comme l'arche de Ctésiphon en Irak (Figure 2.1a), certaines pyramides en Égypte (pyramide d'El-LAHOUN (Figure 2.1b) par exemple), la ziggourat d'ETEMENANKI à Babylone (Figure 2.1c), la cité précolombienne de CHAN-CHAN au Pérou (Figure 2.1d) et encore bien d'autres. Les sites archéologiques en terre crue sont donc présents sur tous les continents habités. Cela est dû au fait que « la terre est l'un des trois matériaux premiers, au même titre que la pierre et le bois ». [10]



Figure 2.1 (a) Arche de Ctésiphon ; (b) Pyramide d'El-LAHOUN ; (c) Ziggourat d'ETEMENANKI ; (d) Cité CHAN-CHAN.

2.1 Mais quelle est la raison qui a mené ces civilisations à utiliser un tel matériau ?

Elle est plutôt simple : en effet, il s'agissait de « construire avec ce que l'on a sous les pieds » [11]. Si on prend l'exemple de la Grande Muraille de Chine, on peut voir que celle-ci s'adapte tout au long de son parcours à la nature du sol sur lequel elle est construite. Ainsi, on retrouve des parties construites en pierre sur la roche, en terre sur la terre et même parfois en sable dans certaines parties désertiques. En effet, vu l'ampleur des territoires traversés par cet édifice, celui-ci a été construit à l'aide des matériaux locaux afin de limiter le transport de la zone d'extraction à celle de chantier. Exploiter les matériaux locaux afin de bâtir son logement est un comportement universel. Et souvent, la terre est le seul matériau disponible. [12]

Les constructions en terre crue sont majoritairement présentes dans presque toute l’Afrique, le Moyen-Orient et l’Amérique Latine (Figure 2.2). On les retrouve également en Chine et en Inde dans les habitats vernaculaires. En Europe par contre, cette façon de construire a pratiquement disparu, mais les bâtiments en terre crue restent tout de même présents dans le paysage, comme un témoignage du passé. On les retrouve au Danemark, en Suède, en Allemagne, dans les Pays de l’Est, et également en Espagne, en France, en Grande-Bretagne et en Belgique [13]. L’Europe compte tout de même plusieurs millions de constructions en terre, mais il s’agit surtout de bâtiments anciens. Ceux-ci sont toujours habités mais nécessitent un entretien annuel relativement cher [14].

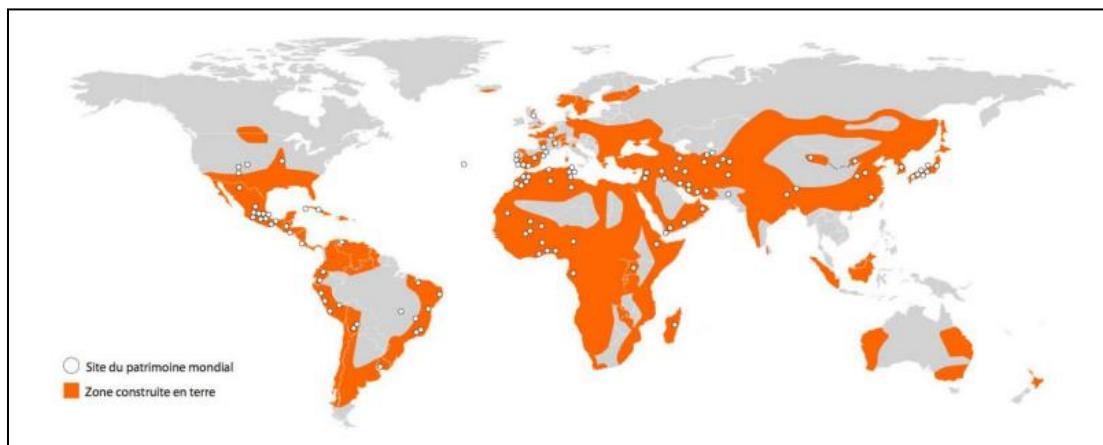


Figure 2.2 Architecture de terre dans le monde. [15]

Aujourd’hui, beaucoup de programmes ont été réalisés dans notre pays et notamment dans les années 70 [16], (tableau 2.1). Il y a aussi le CAP terre (centre Algérien du patrimoine culturel bâti en terre) qui est chargé de faire la promotion des architectures de terre en Algérie, il est installé à Timimoune (Adrar). Le centre est divisé en deux départements techniques, dont l’un s’occupera de la recherche sur les matériaux et les techniques de construction. [9]

Tableau 2.1 Programme de construction en Terre, en Algérie depuis 1970, [16]

Date	Techniques	Nombre	lieu
1969-1970	Terre coulée	02	Zéralda
1971-1973	Terre remplissante	/	Abadla
1972	Pisé	136	Batna
1973-1975	Pisé (R+2)	30/300	Sdi Bel Abbes
1976	Toub	100	Felliache (Biskra)
1980	Bloc de terre compressée	120	Madher (Boussaâda)
1981	Bloc de terre compressée	40	Chéraga
1984	Bloc de terre compressée	20	Tamanrasset
1984	Bloc de terre compressée	02	Tamanrasset et Souidania
1986	Bloc de terre compressée	10	Reggane (Adrar)
1993	Bloc de terre compressée	68	Tamanrasset
1999	Pisé	01	Souidania (Alger)
2007	Bloc de terre compressée (panneaux solaire, énergétique)	01	Souidania (Alger)

II.3 Diversité de la construction en terre crue

La terre crue est un matériau de construction composé d'un mélange de sol et d'eau, qui a été utilisé depuis l'antiquité sous diverses formes, (Adobes, pisé, bauge, torchis, blocs de terre comprimé). La technique de construction en terre offre des possibilités inimaginables tant d'un point de vue diversités d'application, que des traditions culturelles reproduites. La terre crue se prête à bien des manipulations permettant de l'utiliser en murs massifs monolithes (pisé, bauge), en pâtes garnissant un support de nature diverse (torchis, terre pailles), ou en blocs appareillés (BTC, Adobes). CRAterre a présenté douze techniques d'utilisation de terre pour la construction. Parmi celle-ci sept à huit sont d'un usage courant et constituent les techniques majeurs. (Figure 2.3). [9]

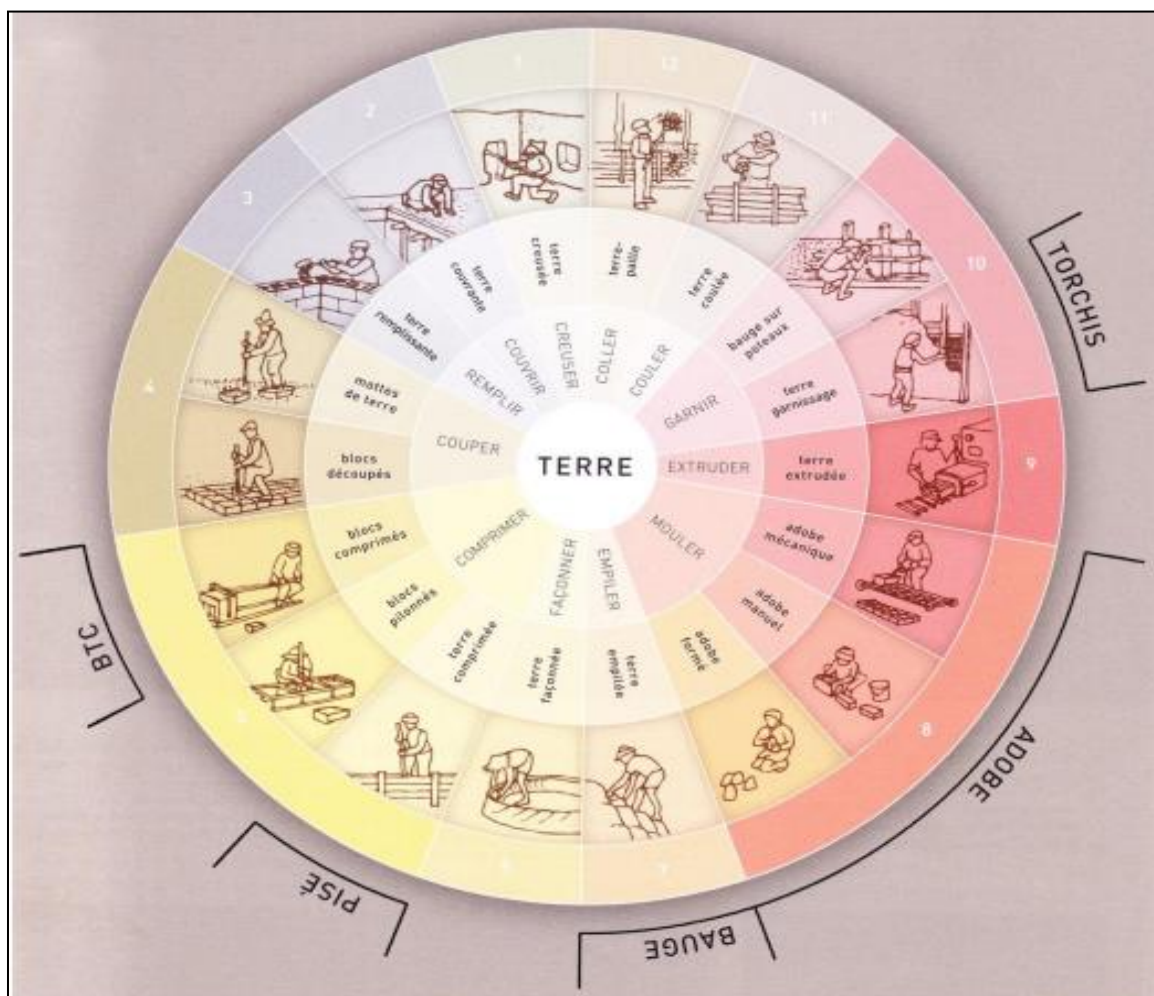


Figure 2.3 "Roue" des techniques de construction en terre [17]

II.4 Les techniques de construction en terre crue

4.1 Technique du pisé

Le pisé est une technique de construction où les murs porteurs sont faits d'un matériau compacté dans un coffrage. Le pisé est traditionnellement réalisé avec de la terre argileuse, riche en sable et graviers. Après son extraction sur le site, la terre est débarrassée de ses plus gros cailloux, humidifiée, puis déposée en couches épaisses (15 à 20 cm) dans des coffrages (ou banches), traditionnellement en bois. Chaque couche de terre est ensuite compactée à la main avec un pilon en bois, le « passoir », et ramenée ainsi à moitié d'épaisseur (7 à 10 cm). Cette technique traditionnelle nécessite donc peu d'outillage mais demande beaucoup de main d'œuvre (Figure 2.4).

De nos jours, l'utilisation de moyens plus sophistiqués (compresseur pneumatique, malaxage et levage mécaniques, coffrages métalliques) permet de construire plus rapidement. [9]

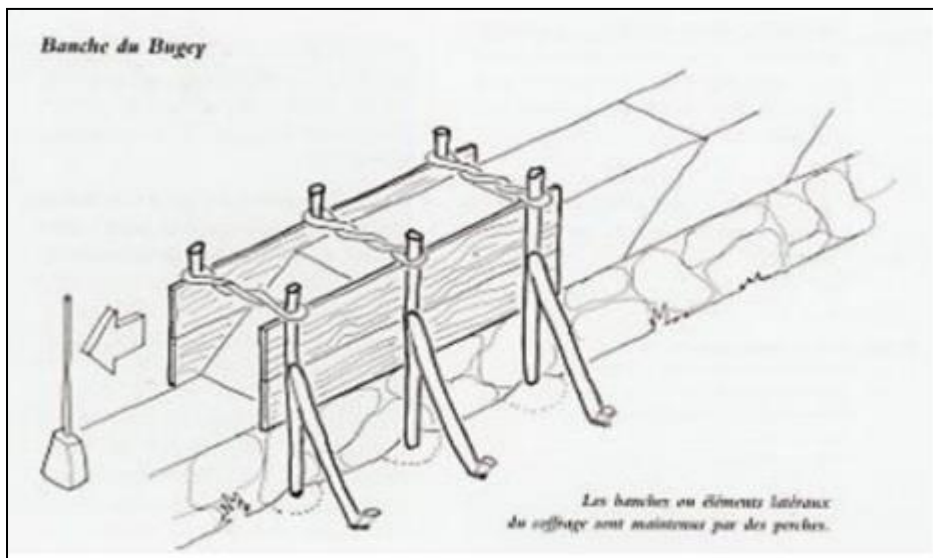


Figure 2.4 Le coffrage du pisé. [18]



Figure 2.5 Hôpital régional de Feldkirch, Vorarlberg, Autriche, 1993. [19]

4.2 Technique de l'adobe

Les adobes sont des briques de terre crue moulées à l'état de pâte plastique ou façonnée à la main, sans compactage, amendée de fibres naturelles ou des sable et puis séchées à l'air libre pendant plusieurs semaines.

L'une des plus anciennes pratiques de l'architecture durable est l'hiéroglyphe égyptien. La construction en adobe est encore largement répandue en Amérique du Sud, en particulier au Pérou,

- L'adobe, par des moyens simple, fournit rapidement un logement.
- Elle est Synonyme d'une grande rapidité d'exécution, (figure 2.6).

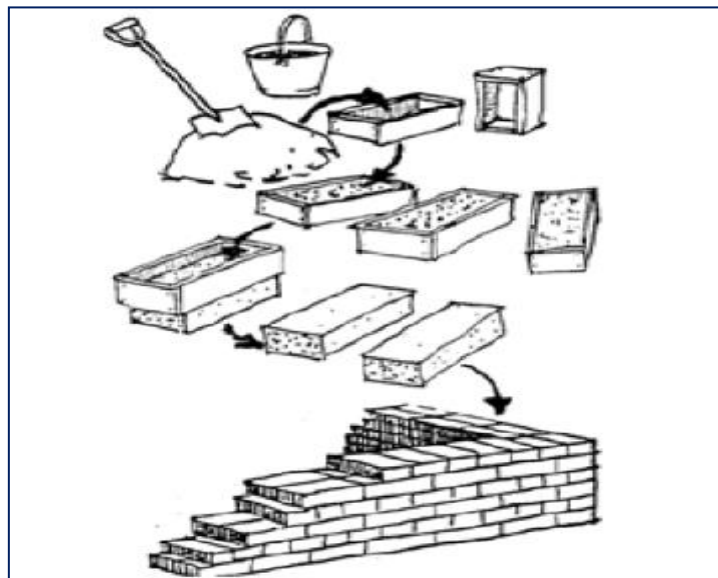


Figure 2.6 Schéma explicatif de préparation et construction des adobes. [19].

- Elle crée un bon niveau de confort de vie.
- Elle consiste à mélanger de la terre crue humide amendée par les pailles ou autres fibres façonnée manuellement à la main ou dans des moules parallélépipédiques.
- Les dimensions de blocs sont assimilées aux briques classiques ordinaires.
- L'adobe offre la possibilité de construire des arcs, voutes et des coupoles.
- La construction des adobes sont réalisées presque sans outils (extrêmement économiques), (figure 2.6).
- Faible coût dans la production, avec la possibilité de créer une masse production. (figure 2.7). [9]



Figure 2.7 Stockage massif d'adobes, Villa Janna, Marrakech, Maroc, [19]

4.3 Technique du Torchis

Le mot torchis vient de « torche », qui désignait des fibres nouées en torsades et destinées à allumer les fagots de bois, où, la paille servait comme matériau d'entretien et d'hygiène.

Par définition : Le torchis est un matériau de remplissage non-porteur (le principe du colombage), à l'inverse de la bauge et du pisé utilisés en murs monolithes, son matériau à base de terre argileuse et de paille ou d'autres fibres. Il est utilisé pour les murs, les cloisons et les plafonds dans les constructions à ossatures en bois, avec une épaisseur minime entre (6 à 30 cm), (figure 2.8).



Figure 2.8 Technique de la construction en terre : Torchis. [9]

- La technique consiste à réaliser une structure porteuse en bois garnie de terre à l'état plastique, le plus souvent mélangée à la paille.
- La terre recouvre une structure en lattis de bois fixée entre des poteaux, appelés colombes, la structure en bois est en général extrêmement légère et rapide à monter (figure 2.9).
- Le torchis, matériau souple, d'une bonne résistance mécanique et bonne durabilité tant utilisé à l'extérieur qu'à l'intérieur des bâtiments.
- Le torchis peut être utilisé pour garnir l'entre-solive des plafonds, constituer les sols des greniers et pour édifier aussi les cheminées et leurs conduites. [9]



Figure 2.9 Construction d'une maison en colombage et torchis près de Rouen, France. [9]

4.4 Technique de la bauge

La construction en bauge consiste à empiler des boules de terres grossières malléables mélangées à des fibres naturelles, les unes sur les autres et entassées légèrement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à confectionner des murs monolithiques. Les surfaces verticales sont dressées par découpe après un court temps de séchage, alors que le matériau n'est pas trop dur.

- En Afghanistan, des habitats ruraux fortifiés construits en bauge (boules entassées en levées de terre ensuite réglées).
- En France, la construction rurale consiste à empiler à la fourche des paquets de terre plastiques qui ressemblent aux murs en pisé et généralement façonnée à la main, (Figure 2.10).
- Elle consiste à amender la terre avec des fibres de natures diverses et confectionner sous forme de boules comme de la pâte à modeler, qui sont empilées les unes sur les autres à l'aide des mains ou des pieds, (figure 2.11).
- La bauge est incorporée dans une structure en bois, dans des cas particuliers comme par exemple les plafonds.
- Dans la plupart des régions du monde, la construction en bauge est entièrement façonnée à la main, à la manière de sculpture géante. [9]



Figure 2.10 Maison en bauge à Gevezé. [9]



Figure 2.11 Système de construction monolithique en terre crue empilée (bauge). [9]

II.5 Brique de terre compressée (BTC)

Les BTC « sont des éléments de maçonnerie, de dimensions réduites et de caractéristiques régulières et contrôlées, obtenus par compression statique ou dynamique de terre à l'état humide suivie d'un démoulage immédiat. Les BTC sont constitués principalement de terre crue et doivent avoir leur cohésion à l'état humide et à l'état sec essentiellement à la fraction argileuse composant la terre; un additif peut être ajouté néanmoins à la terre pour améliorer ou développer des caractéristiques particulières des produits. Les caractéristiques finales des BTC dépendent de la qualité des matières premières (terre, additif) et de la qualité de l'exécution des différentes étapes de fabrication (préparation, malaxage, compression, cure) [20].

Ainsi, comme pour la technique du pisé, les briques de terre comprimée sont réalisées avec une terre sèche. Cette dernière est comprimée au moyen d'une presse puis est laissée à sécher durant plusieurs semaines. Après cela, les briques de terre crue peuvent être utilisées dans la construction au même titre que les briques d'adobe, les briques cuites ou encore les blocs de ciment [10].

Aujourd'hui les bâtiments produits en BTC sont intégrés dans la ville et font désormais partie de son paysage physique et social, comme l'exemple de maison en BTC, d'Abidjan, Côte d'Ivoire, (figure 2.12).

La brique ou Bloc de terre crue compressée BTC : est la terre humide compressée dans des presses à une densité relativement élevée à l'intérieur d'un moule parallélépipédique avec les dimensions d'une brique standard. [9]



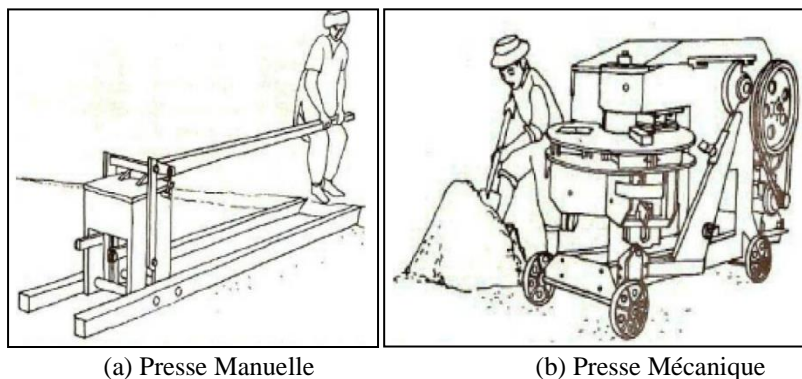
Figure 2.12 Maison en BTC, photos d'Abidjan, Côte d'Ivoire. [13]

- La BTC en terre crue répondra largement au besoin local comme le sud de l'Algérie (Adrar, Béchar, Tamanrasset et Ouargla, etc.).
- Le taux des précipitations dans ces régions est très faible (désert) qu'on n'aura pas besoin des Blocs de terre comprimé stabilisé, (figure 2.13).
- elle consiste à compressée la terre sous forme de bloc (ou brique) dans un moule à l'aide des presses dont il existe une grande variété.
- Presse Manuelle transportable appliquent des charges statiques comprises entre 1 à 2 MPa, elle a le rendement de 300 à 800 blocs par/jour, (figure 2.14. a).
- Presse mécanique qui applique des charges Statiques comprises entre 2 et 15 MPa. son rendement dépend la puissance de la presse, (figure 2.14. b).
- Les blocs obtenus sont immédiatement stockables contrairement aux adobes qui doivent sécher sur de vastes aires de production avant de pouvoir les utiliser.
- Les nouvelles formes des BTC peuvent améliorer les contacts inter blocs jusqu'au bloc parasismique. dispensée la nuit, et vice versa pour la fraîcheur emmagasinée la nuit et répandue le jour valent mieux qu'une climatisation. [9]

La fabrication du BTC est une formidable évolution dans le domaine de la construction et l'architecture de terre. Pour cela la valorisation des sédiments de dragage en brique de terre crue compressée doit satisfaire plusieurs critères. [9]



Figure 2.13 Construction en blocs de terre compressée stabilisés (BTC) à Bangalore, Inde. [9]



(a) Presse Manuelle

(b) Presse Mécanique

Figure 2.14 Schéma des presses manuelle et mécanique pour produire des BTC. [9]

II.6 Normes, recommandations et Critères de choix des matériaux

6.1 Normes et recommandations

Les normes générales sur la construction en terre constituent une référence utile pour satisfaire aux exigences particulières du cadre réglementaire et de la culture de la construction, afin d'améliorer les propriétés des matériaux utilisés dans ces structures.

Durant ces dernières années, plusieurs normes en matière de construction en terre ont été publiées en USA (New Mexico, NMAC 14.7.4 (2000) pour les adobes, BTC et pisé), France (XP P 13-901 (2001) pour les BTC), Nouvelle-Zélande (NZS 4297-1998a, 1998b, 1998c pour les adobes, BTC et pisé). Régional Africa -ARSO 1996 pour les BTC, et Zimbabwe SAZS 724-2001 pour les pisés, et Peru NTE E 080-2000 sur le comportement sismique dans la construction d'adobe. Ces normes permettent de créer un environnement favorisant l'acceptation des nouvelles constructions en terre. Pour que le matériau terre soit largement utilisé, il est nécessaire de disposer des recommandations et méthodes simples d'identification et de caractérisation des terres qui se référeront directement aux caractéristiques de résistance des matériaux structuraux, une fois les matériaux mélangés et séchés ou compactés.

- Il est nécessaire de connaître le matériau, ses caractéristiques, ses propriétés et ses performances.

- Il est aussi nécessaire de connaître les particularités de la ou des techniques de construction employées (adobe, pisé, bloc comprimé, bauge, torchis, etc.), leur outillage adapté et leurs mode de mise en œuvre spécifiques.
- Nécessairement adopter des systèmes constructifs simples et compatibles avec les modes de travail du matériau : bonne résistance à la compression, faible résistance à la traction, flexion et cisaillement. [9]

6.2 Choix des matériaux

La terre utilisée pour la fabrication de la BTC devrait être exemptée des matières organiques et doit aussi répondre à des exigences spécifiques, en termes de granulométrie, de propriétés plastiques, cohésion et densité sèche. De plus, la relation entre ces propriétés et le comportement hydromécanique macroscopique est mise en évidence. Bien qu’il existe une approche qualitative utilisée, des propriétés structurelles fiables telles que : La résistance à la compression, le module d’élasticité. L’effet de l’eau (séchage humidification, succion), la durabilité (érosion de surface), les résistances à la flexion et la traction. [9]

6.2.1 Distribution granulométrique

La distribution granulométrique est la première propriété à prendre en compte lors de l’évaluation de l’aptitude d’un matériau en terre pour la construction. La terre est un matériau granulaire dont la distribution granulométrie peut être particulièrement large. Il peut y avoir une différence de taille plus de 105 entre les granulats les plus grossiers et les particules les plus fines. La granulométrie contribue à définir la texture du sol par les techniques les plus courantes (Analyses granulométrique et sédimentométrie).

On distingue dans un premier temps les éléments grossiers de diamètre supérieur à 2mm comme graviers et cailloux et les autres classes granulométriques classiques de diamètre inférieur à 2mm, sont les sables, les limons et les argiles (Tableau 2.2). [9]

Tableau 2.2 Classification granulométrique des sols selon ASTM D2487 [19]

terre fine					Éléments grossiers	
<2μ	2μ - 20μ	20μ - 50μ	50μ - 200μ	200μ- 2mm	2mm-2cm	>2cm
Argile	limons fin	limon grossier	sable fin	sable grossier	gravier	cailloux

La distribution granulométrique contrôle en quelque sorte largement toutes les autres propriétés. Plusieurs chercheurs ont examiné des documents techniques y compris les normes et les recommandations internationales sur la distribution granulométrique des matériaux en terres, ([Norme-NF-XP-P13-901, 2001], [CRATerre-EAG, 1998], [MOPT, 1992], [Moevus et al. 2012] et [Houben and Guillaud, 1989]). À partir de ces normes et recommandations, ils ont conclu que les prescriptions relatives à la taille des particules sont plus restrictives pour la construction en pisé, BTM : (Brique de terre moulée comme l’adobe) et BTC.

La figure 2.15 montre les limites inférieure et supérieure de la distribution granulométrique des matériaux en terre (BTC, Pisé, BTM). [9]

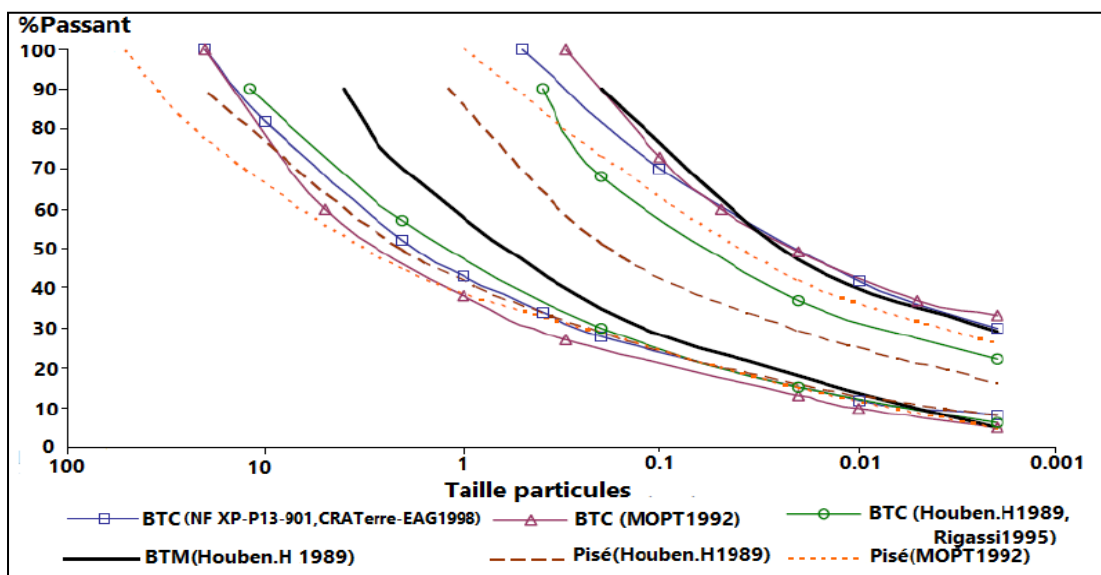


Figure 2.15 Fuseaux de courbes granulométriques conseillées pour construire en BTC, en Pisé ou en adobe (BTM = Brique de Terre Moulée) selon la norme française [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], CRATerre-EAG [1998], MOPT [1992].

6.2.2 Plasticité : Pouvoir à se déformer sans se fissurer ou se désintégrer

La plasticité d’une terre et les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d’Atterberg (limite de liquidité LL, limite de plasticité PL, l’indice de plasticité PI). Pour obtenir la meilleure résistance des matériaux de terre (BTC, pisé et adobe), tant aux sollicitations mécaniques qu’à l’action de l’eau, il est nécessaire de choisir les limites les mieux adaptées pour les blocs de terre selon la norme française [Norme-NF-XP-P13-901, 2001]. Cette norme recommande que le sol doit présenter un minimum de plasticité assurant une cohésion entre les grains du matériau lors du compactage. La plasticité d’une terre dépend directement de la teneur en argiles et de leur capacité d’adsorption d’eau, (figure 2.16). [9]

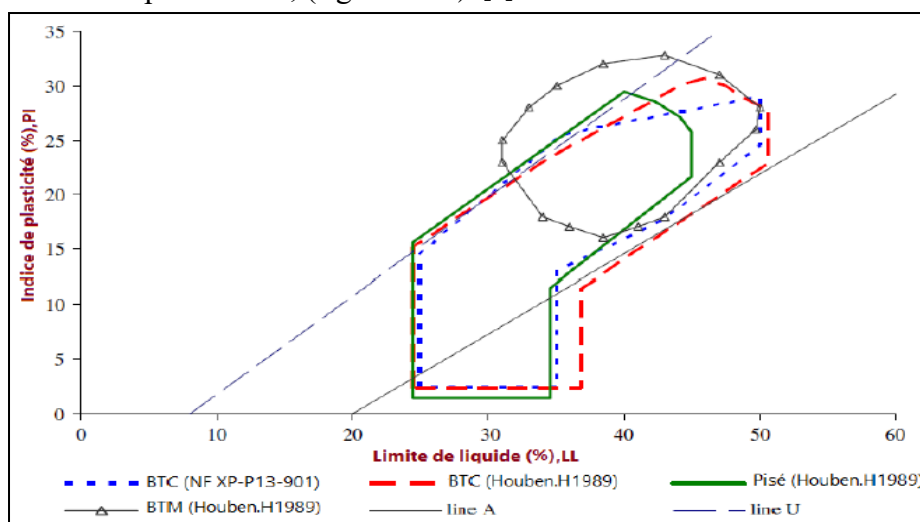


Figure 2.16 Fuseaux de plasticité conseillées pour construire en BTC, en Pisé ou en BTM selon la norme française [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], CRA Terre-EAG [1998] et Houben and Guillaud [1989]

6.2.3 Compactage

Un certain nombre d'études s'est intéressé à la relation entre la densité de la terre et l'effort de compactage. La teneur en eau optimale est celle pour laquelle la masse volumique est maximale. Pour cela on utilise un essai de Proctor normal ou modifié, pour choisir la terre utilisable en fabrication des Matériaux en terre (BTC) et déconseillé pour les sols argileux mais le compactage statique est mieux adapter aux sols argileux. Par contre ces essais ne sont pas utilisés pour déterminer la teneur en eau optimale de la BTC. [9]

La figure 2.17 présente les fuseaux de compactage recommandés pour construire en BTC, en pisé ou en adobe selon Houben and Guillaud [1989] et Houben and Guillaud [1994].

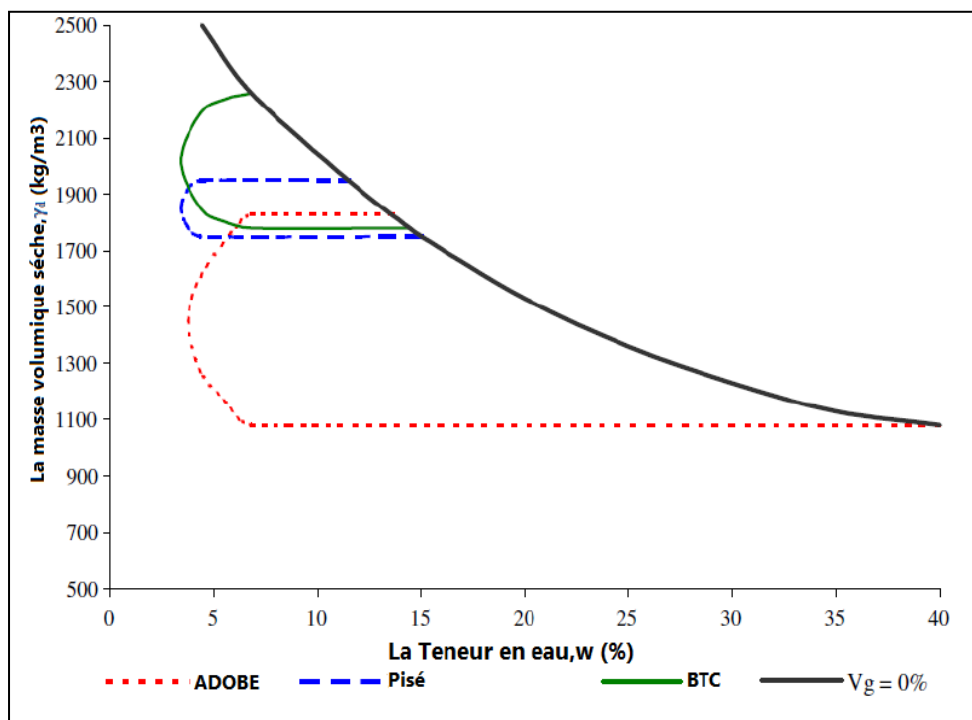


Figure 2.17 Fuseaux de compactage recommandé pour construire en BTC, en Pisé ou en adobe selon Houben and Guillaud [1994].

6.2.4 Résistance à la compression simple

La résistance à la compression simple de la terre crue (non stabilisée) séchée à l'air libre est généralement de quelques dixièmes de MPa, (0.5 à 1.5 MPa pour la bauge, 1 à 2.5 MPa pour l'adobe) à quelques MPa pour le pisé (1 à 4MPa) et les blocs de terre compressée BTC entre (1 à 7MPa), (figure 2.18).

Dans la littérature, le manque des normes sur la terre crue constitue le point délicat. La résistance à la compression simple de la terre, c'est une propriété mécanique faisant l'objet d'exigences réglementaire fortes. [9]

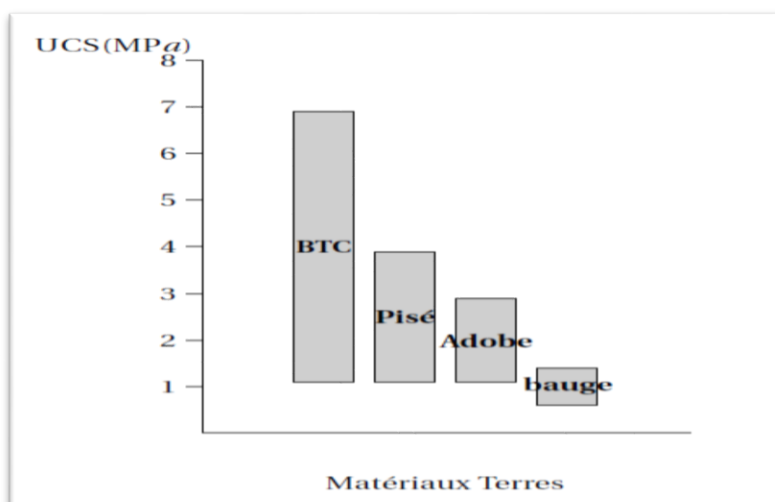


Figure 2.18 Résistance à la compression simple de la terre crue (non stabilisée) séchée à l'air libre, [Van-Damme and Houben, 2017].

II.7 Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées

7.1 Stabilisation avec ciment

Il existe de nombreuses études sur la stabilisation des briques de terre à l'aide de ciment. Le Tableau 2.3 présente les données de 10 articles sur la stabilisation des briques de terre fabriquées selon différentes techniques comme les blocs de terre comprimée (BTC) ou les adobes (terre moulée à la main et séchée au soleil). Le temps de cure et l'éclatement sont donnés dans ce tableau.

Tableau 2.3 Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées au ciment. [22]

Reference	Type	Eclatement	Temps de cure (j)	Ciment (%)	fc (MPa)
(Bahar et al., 2004)	BTC	1	28	0	1,6
				4	2,3
				6	3,2
				8	4,0
				10	4,1
				12	5,2
				15	6,1
(Alavéz-Ramírez et al., 2012)	BTC	1	28	0	0,6
				10	23,5
(Medjo Eko et al., 2012)	BTC	0,2	28	0	1,0
				4	3,0
				7	10,4
				10	11,6
(Lima et al., 2012)	BTC	1	28	0	n.m.
				6	0,7
				12	3,1
(Eires et al., 2014)	BTC	1,2	56	0	1,0
				4	1,5
(Alam et al., 2015)	BTC	1	Pas de cure	0	1,0
				5	1,0
				7	1,3
				10	2,0
(Seco et al., 2017)	BTC	1,2	28	0	n.m.
				10	11-14
(Tran et al., 2018)	BTC	2	28	0	0,6
				4	1,5
				8	5,6
				12	6,0
(Sore et al., 2018)	BTC	n.m.	21	0	1,4
				8	8,2
				8	8,2
(Dao et al., 2018)	Adobe	1	Pas de cure	0	2,2
				2	2,6
				4	2,8
				8	3,0
				12	3,2

Les résultats du Tableau 2.3 montrent que le gain de résistance en compression avec l’ajout de ciment est très peu marqué sauf dans l’étude de (ALAVEZ-RAMIREZ et al. 2012) où l’ajout de 10% de ciment permet de passer d’une résistance en compression de 0,6 à 23,5 MPa. [22]

7.2 Stabilisation avec la chaux la chaux

Il existe aussi certaines études dans lesquelles les briques de terre crue sont stabilisées à la chaux. Le Tableau 2.4 présente les résultats synthétiques de 5 références. Les données présentées sont les mêmes que pour le Tableau 2.3 mais une colonne a été ajoutée sur la nature de la chaux utilisée car les comportements sont très différents entre une chaux hydraulique (mélange de chaux et de minéraux hydrauliques) et une chaux « pure » qu’elle soit éteinte (Ca(OH)₂) ou vive (CaO).

Tableau 2.4 Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées à la chaux. [22]

Reference	Type	Elacement	Durée de cure (j)	Test de tenue à l'eau	Type de chaux	Chaux (%)	fc (MPa)
(Millogo et al., 2008)	Adobe	1	Pas de cure		Mélange de chaux vive et de chaux hydratée	0	2,3
						4	3,2
						6	3,3
						8	3,4
						10	3,5
(Alavéz-Ramírez et al., 2012)	CEB	1	28	X	Chaux hydratée	0	0,6
						10	16,5
(Eires et al., 2014)	CEB	1,2	56	X	Chaux hydratée	0	1,0
						4	0,8
					Chaux vive	4	1,9
(Alam et al., 2015)	CEB	1	Pas de cure	X	Non spécifié	0	1,0
						5	0,6
						7	0,8
						10	1,3
(Seco et al., 2017)	CEB	1,2	28	X		0	n.m.

Comme pour les résistances avec 10% de ciment, les résistances en compression sèche avec 10% de chaux des travaux de (ALAVEZ-RAMIREZ et al. 2012) sont anormalement élevées en comparaison des résultats des autres études (16,5 MPa à 28 jours). Pour les autres études, le gain de résistance en compression sèche est très faible quelle que soit la teneur en chaux (jusqu’à 12%) et quelle que soit la nature de la chaux utilisée (même pour une chaux hydraulique). [22]

7.3 Stabilisation avec des liants minéraux alternatifs

Le Tableau 2.5 présente les stabilisations de la terre crue avec les liants minéraux alternatifs.

Tableau 2.5 Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées avec des liants minéraux alternatifs. [22]

Référence	Liant alternatif	Type	Elancement	Durée de cure (jour)	Liant (%)	fc (MPa)
(Alavéz-Ramírez et al., 2012)	Chaux – Cendres de bagasse de canne à sucre	BTC	1	-	0	0,6
				7	20	17,7
				14	20	20,8
				28	20	21,3
(Hossain et al., 2011)	Poussière de fourneau de ciment	BTC	2	7,14,28,56 et 90	-	0,1
					2	0,5-1,7
					5	1,5-3,1
					10	1,5-4,3
					15	2,1-5,3
	Cendre volcanique	BTC	2	7,14,28,56 et 90	20	2,7-6,0
					5	0,5-1,2
					10	0,5-1,8
					15	0,5-2,8
	Villamizar et al. (2012)	Cendre de charbon	BTC	0,5	-	20
5						1,9
10						3,3
10						1,0
(Degirmenci, 2008)	Gypse	Adobe	1	-	0	1
					5	1,2
					10	3,0
					15	4,5
					20	4,6
	Phosphogypse	Adobe	1	-	25	4,8
					5	1,1
					10	3,0
					15	3,0
(Seco et al., 2017)	Chaux (CL90-S) + laitier de haut fourneau (LHF))	BTC	1,2	28	0	n.m
					10	11,7
	Ciment + laitier de haut fourneau (LHF)	BTC	1,2	28	0	n.m
					10	13,6
(Alam et al., 2015)	Gypse	Adobe	1	-	0	1,0
					10	2,4
(Sore et al., 2018)	Géopolymère (Métakaolin activé au NaOH)	BTC	n.m	7	0	1,4
					5	2,8
					10	4,4
					15	6,7
					20	8,9

L'objectif de ces études est de proposer de réduire la quantité de ciment ou de chaux avec une pouzzolane à faible empreinte carbone. Un second intérêt est de valoriser des sous-produits industriels (cendres de charbon, cendre de bagasse de canne à sucre ou poussière de fourneau de ciment). Certains de ces liants sont un mélange de pouzzolanes et de ciment ou de chaux ou, dans le cas des géo polymères, l'activation de la pouzzolane (ici du méta kaolin) se fait avec de la soude concentrée (Sore et al. 2018). Bien que ces solutions soient

supposées moins polluantes que le ciment et la chaux seules, les quantités de liants utilisés semblent élevées (jusqu'à 20%).

Là également, les résultats de (ALAVEZ-RAMIREZ et al. 2012) paraissent surprenants : moyennant 20% de mélange de chaux et de cendres de bagasse de canne à sucre, il obtient jusqu'à 21,3 MPa de résistance à la compression. Pour les travaux où l'effet de la cure est étudié (ALAVEZ-RAMIREZ et al. 2012; HOSSAIN et al. 2011), on constate que les durées pour obtenir les meilleures résistances sont relativement grandes, ce qui correspond au mécanisme d'action des liants pouzzolaniques dont la cinétique est lente par rapport au ciment. [22]

7.4 Stabilisation avec des liants organiques.

Le tableau 2.6 présente les résistances à la compression des matériaux stabilisés avec des liants organiques. Dans une optique de cohérence, nous avons recalculé les pourcentages massiques équivalents des liants à partir des données disponibles dans les références. En effet, certains liants sont ajoutés sous forme liquide ou sous forme dilués dans de l'eau.

Tableau 2.6 Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées avec des liants organiques

Référence	Liant (s) organique (s)	% liant	Activation	Fibres	Type	Elancement	fc (MPa)
(Aguilar et al., 2016)	Chitosan dissoute à 0,5%-3% en masse dans une solution d'acide acétique	0%	Solution de 1% d'acide acétique	-	adobe	2,1	2,1
		1%					3,9
(Guerrieri, 2012)	Gluten	0%	-	-	BTC	n.m	1,5
		3%-5%					5%-10% chaux 5%-10% chaux + 0,37%-0,75% ammoniacque
	Caséine	1%-10%				1,3-7,5	
(Galán-Marín et al., 2010)	Alginate	0%	0,5% Lignum (résine de Guayacan)	0%	BTC	1	2,2
		19,5% (en solution, concentration non renseignée)		0%, 0,25% et 0,50% de laine de mouton			3,8-4,4
(Pineda-Piñón et al., 2007)	Dodécylamine cationique Acide aminé anionique	0%	-	-	adobe	1	n.m
		0,33%	3% bitume émulsifié	-			2,2
		0,25%	3% bitume émulsifié	-			1,8
(Camões et al., 2012)	Huile usée de cuisine	0%	-	-	BTC/Pisé	1	1,0
		1%	4% chaux vive (CaO) 0,1% soude (NaOH), + 4% chaux vive (CaO)				2,5
(Sorgho et al., 2014)	Tanins (décoction de cosses de Parkia Biglobosa)	0%	-	-	BTC	1	2,0
		1,44%					2,1
(Millogo et al., 2016)	Bouse de vache	1%-3%	-	Bouse de vache	adobe	1	2,1 2,5-2,7
(Nakamatsu et al., 2017)	Carageenan En solution	0%	-	-	adobe	2	2,1
		0,125%-0,5%					3,9
(Chang et al., 2015)	Gomme Xanthan	0%	-	-	adobe	1	0,4
		1%					3,7
(Yalley and Manu, 2013)	Bouse de vache	0%	-	-	BTC	n.m	4,6
		5%-30%		Bouse de vache			4,6-5,8

Bien qu'on retrouve les quatre grandes familles de polymères organiques naturels (polysaccharides, protéines, lipides et autres molécules complexes), le nombre de recherches sur ces types de liants reste faible au regard de la très grande variété de produits existants dans la nature. Dans la plupart des cas, les liants organiques sont utilisés en association avec des agents d'activation. [22]

II.8 Avantages du matériau terre

Les constructions en terre crue présentent beaucoup d'avantages.

1. Les matériaux de constructions (béton, brique de terre cuite, parpaing) consomment beaucoup d'énergie qui sont parmi les plus élevés de tous les secteurs de l'activité humaine. La terre réduit des coûts énergétiques qui associés à la construction dont la fabrication, mise en œuvre simple (presse, les moules, coffrage légers) et le transport des matériaux terre ne nécessitent que peu d'énergie (pétrole, gaz,...).
2. La terre peut être entièrement recyclable qui ne produit aucun déchet d'exploitation industrielle ou chimiques.
3. L'utilisation de la terre comme matériau de construction limite l'épuisement des ressources naturelles.
4. Les constructions en terre fonctionnent également très bien de manières hygrothermique qui contribuent à la régulation des ambiances du confort thermique, déphasage thermique et donnent aussi aux bâtiments la possibilité de "respirer" en absorbant ou libérant de l'humidité en fonction des conditions hydriques environnantes.
5. Le matériau terre diminue la consommation énergétique liée à la climatisation et au chauffage.
6. La réduction des émissions de gaz (un bilan de pollution entièrement positif).
7. La création des emplois sur l'ensemble de la chaîne de production.
8. La terre permet de prolonger l'héritage des traditions architecturales en matériaux locaux.
9. Les constructions en terre peuvent garantir l'accès à la dignité d'un logement décent à des populations qui vivent le plus souvent dans des conditions précaires et misérables.
10. quelque soit les techniques de la construction en terre, le traitement est maintenu au minimum. [9]

II.9 Inconvénients de la construction en terre

La terre crue présente cependant quelques inconvénients :

1. La composition de terre peut varier fortement qui empêche une standardisation de la préparation de la terre crue et nécessite une certaine identification.

2. Manque des normes spécifiques des constructions en terre, heureusement, les études récentes permettent de combler cette lacune.
3. La terre crue est plus ou moins sensible à l'eau (la pluie, la neige, la remonter capillaire), ce qu'il faut rajouter des liants, afin d'obtenir les caractéristiques souhaitable contre l'érosion de surface et faire des soubassements en pierre ou béton pour éviter la remonter d'eau. Il doit mettre aussi un toit présentant un dépassement suffisant pour protéger la construction, (des bonnes bottes et un bon chapeau).
4. les constructions en terre couchent par couche comme le pisé crée des zones faibles entre elles et toujours plus denses en haut que dans leur partie inférieure.
5. Les matériaux terre ont une résistance faible à la traction et sensibles aux séismes. [9]

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons parlé de la terre crue, qui est un matériau présentant de nombreux avantages, car il est considéré comme éternellement renouvelable et non pollué.

Elle permet également une indépendance technique et économique.

Il y a plusieurs types et techniques de construction. Nous sommes également intéressés par les constructions en terre, en particulier la BTC. Nous sommes particulièrement intéressés à ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques, qui entreront dans les résultats du chapitre quatre.

CHAPITRE III :
TRAITEMENT
DES SOLS

Chapitre III : Traitement Des Sols

III.1 Introduction

Le sol est la première fondation de tous les bâtiments et structures, mais il est exposé à divers problèmes tels que la faible résistance à la compression et au cisaillement, l'instabilité, la nature étendue, le retrait de volume, la fissuration due à la sécheresse, la grande stabilité sous chargement et la faible tolérance aux intempéries. Des facteurs tels que le mouillage et le séchage ou le dégel et le gel ont une grande influence sur les sols en général.

Ces problèmes sont devenus contraignants pour les ingénieurs géotechniciens dans les travaux de terrassement ou de construction de grands et importants projets (routes, voies ferrées, bâtiments...)

Les propriétés géotechniques de ces sols peuvent être améliorées en utilisant certains additifs traditionnels tels que le ciment et la chaux, et en raison des émissions de dioxyde de carbone de ces dernières et de leur impact sur l'environnement, les ingénieurs ont eu recours à des matériaux respectueux de l'environnement pour renforcer le sol, tels que les fibres naturelles et les bio-polymères.

III.2 Produits de traitements classiques

2.1 Liants hydrauliques

2. 1.1 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Le ciment agglomère fortement les matériaux inertes incorporés dans le mélange. [23]



Figure3.1 Ciment. [23]

Les liants hydrauliques courants sont subdivisés selon la normalisation en vigueur en cinq types en fonction de leur composition

- CEM I: Ciment Portland.
- CEM II: Ciment Portland composé.

- CEM III : Ciment de haut fourneau.
- CEM IV : Ciment pouzzolanique.
- CEM V : Ciment composé.

Les constituants du ciment présentent une ou plusieurs des propriétés suivantes :

Des propriétés hydrauliques : par réaction avec l'eau, ils forment des composés hydratés stables qui sont très peu solubles dans l'eau.

Des propriétés pouzzolaniques : ils peuvent former à température ordinaire, en présence d'eau et par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables.

Des propriétés physiques : améliorant certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité), [25] comme le montre le tableau3.1

Tableau3.1 Différents types de ciments courants. [26]

Désignation du type de ciment	Notation	Composition
Ciment Portland	CPA/CEM I	Au moins 95 % de clinker et de 0 à 5 % de constituants secondaires
Ciment Portland composé	CPJ/CEM II/A	Entre 80 et 94 % de clinker et 6 à 20 % d'autres constituants
	CPJ/CEM II/B	Entre 65 et 79 % de clinker et 21 à 35 % d'autres constituants
Ciment de haut-fourneau	CHF/CEM III/A	Entre 35 et 64 % de clinker et 36 à 65 % de laitier de haut-fourneau
	CHF/CEM III/B	Entre 20 et 34 % de clinker et 66 à 80 % de laitier de haut-fourneau
	CLK /CEM III/C	Entre 5 et 19% de clinker et 81 à 95% de laitier de haut-fourneau
Ciment pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A	Entre 65 à 90% de clinker et 10 à 35% de pouzzolanes, de cendres volantes siliceuses de fumées de silice (< 10% pour ces dernières)
	CPZ-CEM IV/B	Entre 45 et 64% de clinker et 36 à 55% de pouzzolanes, de cendres volantes siliceuses de fumées de silice (< 10 % pour ces dernières)
Ciment au laitier et aux cendres	CLC/CEM V/A	Entre 40 et 64% de clinker. 18 à 30 % de laitier et 18 à 30 % de cendres volantes ou pouzzolanes
	CLC/CEM V/B	Entre 20 et 39 % de clinker, 31 à 50 % de laitier et 31 à 50 % de cendres volantes ou pouzzolanes

2.2.2 Pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ce sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. Les avantages de remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers. Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction de réactions alcalines des agrégats et du retrait au séchage. Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment. Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le portland. [25]



Figure3.2 Pouzzolane naturelle. [25]

3.2.3 Cendres volantes

Les cendres volantes sont les résidus finement divisés résultant de la combustion du charbon pulvérisé. Elles constituent un produit minéral pulvérulent, consécutif du dépoussiérage des fumées rejetées par les centrales thermiques, qui utilisent du charbon broyé comme combustible en présence ou non de matériaux de Co-combustibles. Ces cendres sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les gaz de fumée des chaudières. [25]



Figure3.3 cendres volantes [25]

3.2.4 Laitiers de hauts fourneaux

Sous-produits de l'industrie sidérurgique lors de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux, les laitiers sont formés de constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke. Leur composition en oxydes et leur structure vitreuse obtenue par trempe à l'eau leur confèrent des propriétés hydrauliques latentes, ce qui permet d'envisager leur utilisation en tant qu'ajout dans les ciments. Le laitier de haut-fourneau vitrifié possède des propriétés particulières. Il a une structure vitreuse, c'est-à-dire une structure où les atomes sont désordonnés, contrairement à un cristal. [25]



Figure3.4 Laitiers de haut fourneau. [26]

3.2.5 Dolomie

La dolomie est une roche sédimentaire carbonatée d'origine marine, riche en calcium, en magnésium et en oligo-éléments. On ne peut parler de dolomie que lorsqu'elle contient un minimum de 50 % de dolomite, carbonate double de calcium et de magnésium de formule $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. L'autre composant est la calcite, un carbonate de calcium de formule CaCO_3 . On parle aussi de calcaire dolomitique ou de calcaire magnésien. Exploitées en carrières, les dolomies constituent de bons matériaux de construction. [25]

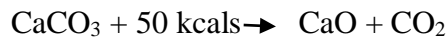


Figure3.5 Dolomie. [25]

3.2.6 Chaux

La chaux est un produit naturel qui respecte l'environnement. La chaux est une matière, généralement, poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire.

Elle est utilisée depuis l'antiquité, notamment dans la construction. Elle trouve une place privilégiée dans le secteur du bâtiment et dans les matériaux de construction. La chaux intervient à différents stades du traitement des sols, et sa qualité a une influence directe sur l'efficacité du traitement des sols. La chaux désigne les produits dérivés du calcaire. Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et/ou de magnésium. On extrait le calcaire dans des carrières et des mines à travers le monde. La chaux aérienne est obtenue par décarbonatation du calcaire (CaCO_3) à une température d'environ 900°C suivant la réaction :



La chaux aérienne peut exister sous quatre formes : chaux vive, chaux éteinte, lait de chaux et chaux vive lourde.

Chacune d'entre elles présentant avec les sols des interactions spécifiques. [26]

➤ Chaux vive

Elle est principalement constituée d'oxyde de calcium CaO (en général à plus de 90 %). Une chaux vive pour le traitement des sols définie dans le GTS. [26]



Figure3.6 Chaux vive. [26]

➤ Chaux éteinte

Elle est principalement constituée d'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 . Elle est fabriquée par hydratation (extinction) de la chaux vive. La réaction d'hydratation est une réaction fortement exothermique : [26]





Figure3.7 : Chaux éteinte. [26]

➤ **Lait de chaux**

Le lait de chaux est obtenu par mise en suspension de chaux éteinte dans de l'eau. La concentration varie entre 300 et 400 g de chaux éteinte par litre de lait. Le lait de chaux peut également être préparé à partir de chaux vive, mais des précautions particulières sont à prendre en raison de l'exothermicité de la réaction d'hydratation de l'oxyde de calcium. [26]



Figure3.8 : Lait de chaux. [26]

➤ **Chaux vive lourde**

La chaux vive est alourdie par addition d'huile de colza. Cette chaux est moins volatile et, par conséquent, son emploi permet de réduire les émissions de poussières. Son utilisation est préconisée dans certaines zones de projets incluant des dispositions particulières de protection de l'environnement. [26]

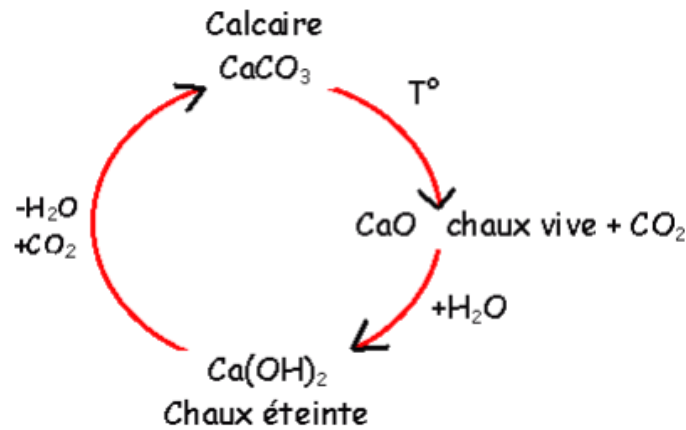


Figure3.9 : Cycle de la chaux. [26]

2.2 Avantages du traitement

Traitement des sols à la chaux et/ou au ciment ou aux liants hydrauliques(LHR) est une technologie qui offre trois types d'avantages fondamentaux : la technologie, économique et environnemental. [26]

2.2.1 Avantages techniques

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique permet la réalisation des remblais et des couches de forme. Une couche traitée homogène, durable et stable, présente des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'une grave-ciment ou grave hydraulique. En outre, cette technique assure une bonne répartition des charges sur le support, grâce à la rigidité de la nouvelle structure. Cette technique assure un bon comportement sansorniérage et un bon comportement vis-à-vis des cycles de gel-dégel, grâce à la rigidité du matériau et à l'effet de dalle induit. Enfin, le traitement des sols en place est une technique possédant une facilité d'adaptation aux contraintes d'exploitation. [26]

2.2.2 Avantages économiques

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique est une technique de traitement à froid, donc utilisant peu d'énergie. La réutilisation des matériaux en place est un facteur d'économie important puisqu'il réduit au minimum les déblais issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût de leur transport. L'absence de transport de granulats ou des déblais en décharge contribue à la préservation du réseau routier situé au voisinage du chantier. [26]

2.2.3 Avantages écologiques et environnementaux

Le travail à froid réduit sensiblement la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère. En outre, cette technique permet une importante économie d'énergie globale, par la réduction des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge et donc une diminution des impacts indirects, des gênes à l'utilisateur et aux riverains et une réduction de la fatigue du réseau routier adjacent au chantier. La réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières, ballastières), ressources naturelles non renouvelables. Ce qui contribue à préserver l'environnement. [26]

III.3 Fibres

La fibre est une composition de base, végétale ou animale, de nature filamenteuse, souvent sous forme de faisceaux.

Elles peuvent être classées selon leur origine en : (fibres naturelles, fibres animales, fibres végétales, fibre chimique, fibres synthétiques, fibres minérales...).

3.1 Types de fibres utilisées dans le domaine de la construction

Plusieurs types de fibres sont utilisés dans la construction, notamment :

1. Les fibres animales (poil, laine, soie) ;
2. Les fibres végétales (Jute, sisal, coir, bois, bambou, palmier) ;
3. Les fibres métalliques (acier, fonte) ;
4. Les fibres organiques (polypropylènes, polyamides et polystyrènes). [24]

3.2 Fibres naturelles

Les fibres naturelles sont divisées selon leur origine en trois groupes de base :

Fibres animales, fibres végétales et fibres minérales. [24]

3.2.1 Fibres animales

Composées de substances organiques, les fibres animales, ou protéiniques, se présentent sous forme de poils ou de plumes ou de soies tel que : (Laine, Alpaga, Chameau, Cachemire, Guanaco...). [24]

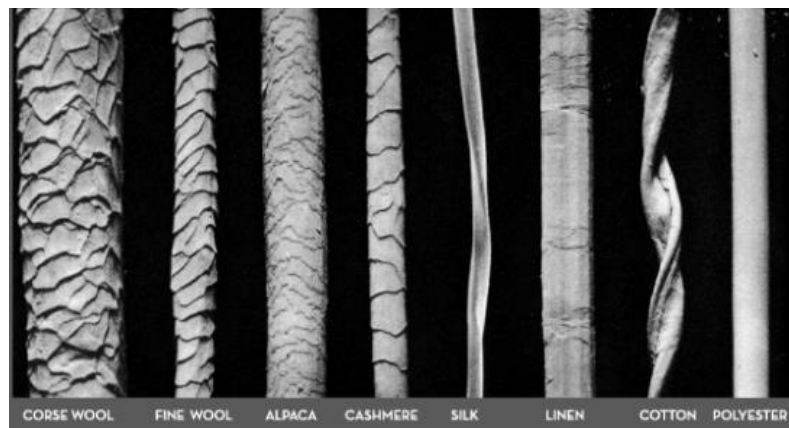


Figure3.10 Fibres animales. [24]

3.2.2. Fibres minérales

Les fibres minérales artificielles siliceuses vitreuses sont des fibres autre que l'amiante telles que la laine de verre, de roche ou de laitier, les fibres céramiques réfractaires (FCR), les fibres d'alumine, les filaments de verre continus, amiante ...etc. [27]



Figure3.11 Fibre d'alumine. [27]

3.2.3 Fibres végétales

L'utilisation des fibres naturelles d'origine végétale dans la construction remonte à la période où l'on fabrique des briques renforcées par la paille ou des roseaux. Dans le temps moderne (depuis les années 70), le premier composite liant avec les fibres végétales c'était le plâtre. Plusieurs ouvrages sont réalisés avec du plâtre renforcé de fibres végétales. Actuellement, le monde connaît de récents développements dans le domaine de renforcement du béton avec des fibres végétales. Suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, plusieurs recherches sont orientées vers la substitution de l'amiante par des fibres végétales.

Les différents types des fibres végétales sont :(Coton ; Lin; Ramie; Alfa ; Sisal ; Bambou...) [24]

3.2.3 Classification des fibres végétales

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes (Figure 3.12) : Les fibres de feuilles, de tiges, de bois et de surface.

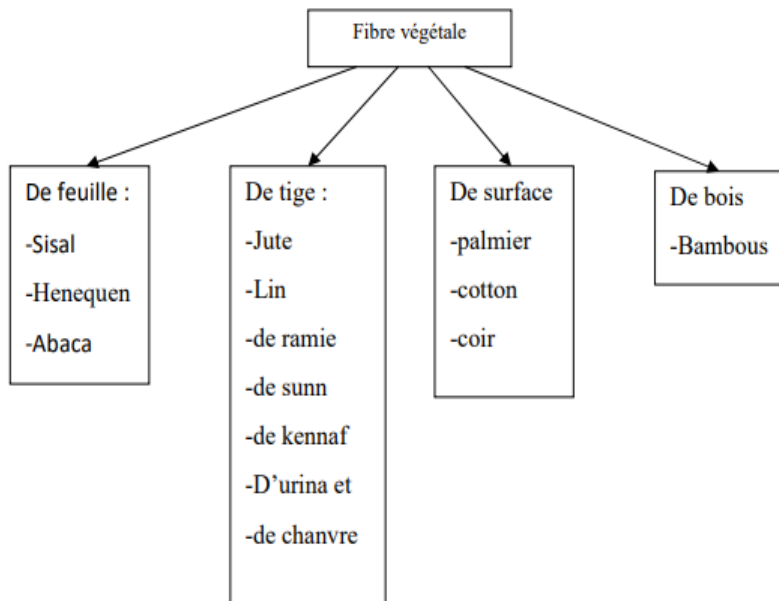


Figure3.12 Classes de fibres végétales. [24]

3.3 Fibres chimiques

Les fibres chimiques se présentent sous deux catégories : les fibres artificielles et les fibres synthétiques. Les textiles chimiques n'existent pas dans la nature, ils sont créés par l'homme et préparés industriellement. [28]

3.3.1 Fibres artificielles

Une fibre textile artificielle est obtenue par le traitement chimique (dissolution puis précipitation) de matières naturelles : les caséines de lait, la cellulose de divers végétaux (écorce de pin, bambou, soja, bouleau). [28]

3.3.1.1 Fibres de caoutchouc

Le caoutchouc est un matériau qui peut être obtenu soit par la transformation du latex sécrété par certains végétaux (par exemple, l'hévéa), soit de façon synthétique à partir de monomères issus de combustibles fossiles. Les fibres de caoutchouc sont extraites des roues de voitures et ce, pour une utilisation dans plusieurs domaines tels que la construction. [24]



Figure3.13 Différents types des fibres des pneus de caoutchouc. [24]

3.3.1.2 Fibres de verre

Le verre utilisé comme renfort dans les composites sous formes de fils (simples, tressés, tissés...). Les fibres de verre sont produites essentiellement sous deux formes : les fibres d'isolation (souvent désignées sous le nom de "laine de verre") et les fibres textiles. Elles sont destinées à des usages très différents. La composition des fibres de verre est constituée principalement de silice, [24]

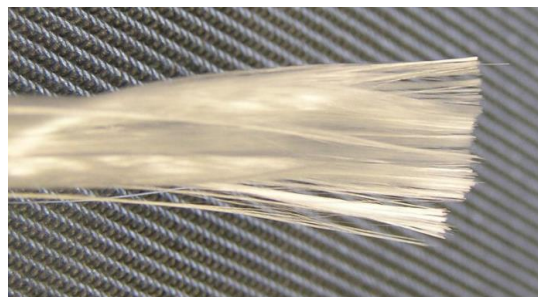


Figure3.14 Une mèche composée de fibres de verre. [24]

3.3.2 Fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont fabriquées de polymères de synthèse obtenus à partir de substances fournies 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, toutes 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.

Les principales catégories de fibres synthétiques commercialisées (Figure3.15) 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. [29]

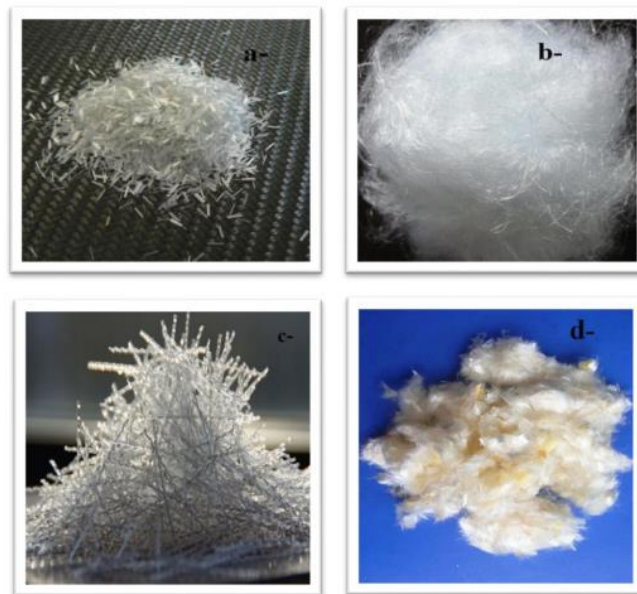


Figure3.15 Différents types des fibres synthétiques (a-polyamides, b-polyesters, c-polyvinyliques, d-polyéthylène). (4) [29]

III.4 Généralité sur les bio-polymères

Les bio-polymères sont de grosses chaînes de molécules constituées de maillons élémentaires appelés monomères. Les polymères organiques ont un certain nombre de propriétés caractéristiques. Ils ont des masses molaires pouvant atteindre plusieurs millions de g/mol. Leur conformation, qui est leur configuration spatiale, varie selon les conditions du milieu (température, pH, potentiel ionique).

Les liants organiques sont des polymères organiques naturels pouvant être répartis en quatre grandes familles de molécules (polysaccharides, lipides, protéines, autres molécules complexes). [30]

III.5 Classification des bio-polymères

Les bio- polymères répartis en quatre grandes familles de molécules : polysaccharides, lipides, protéines, autres molécules complexes (Figure 3,16).

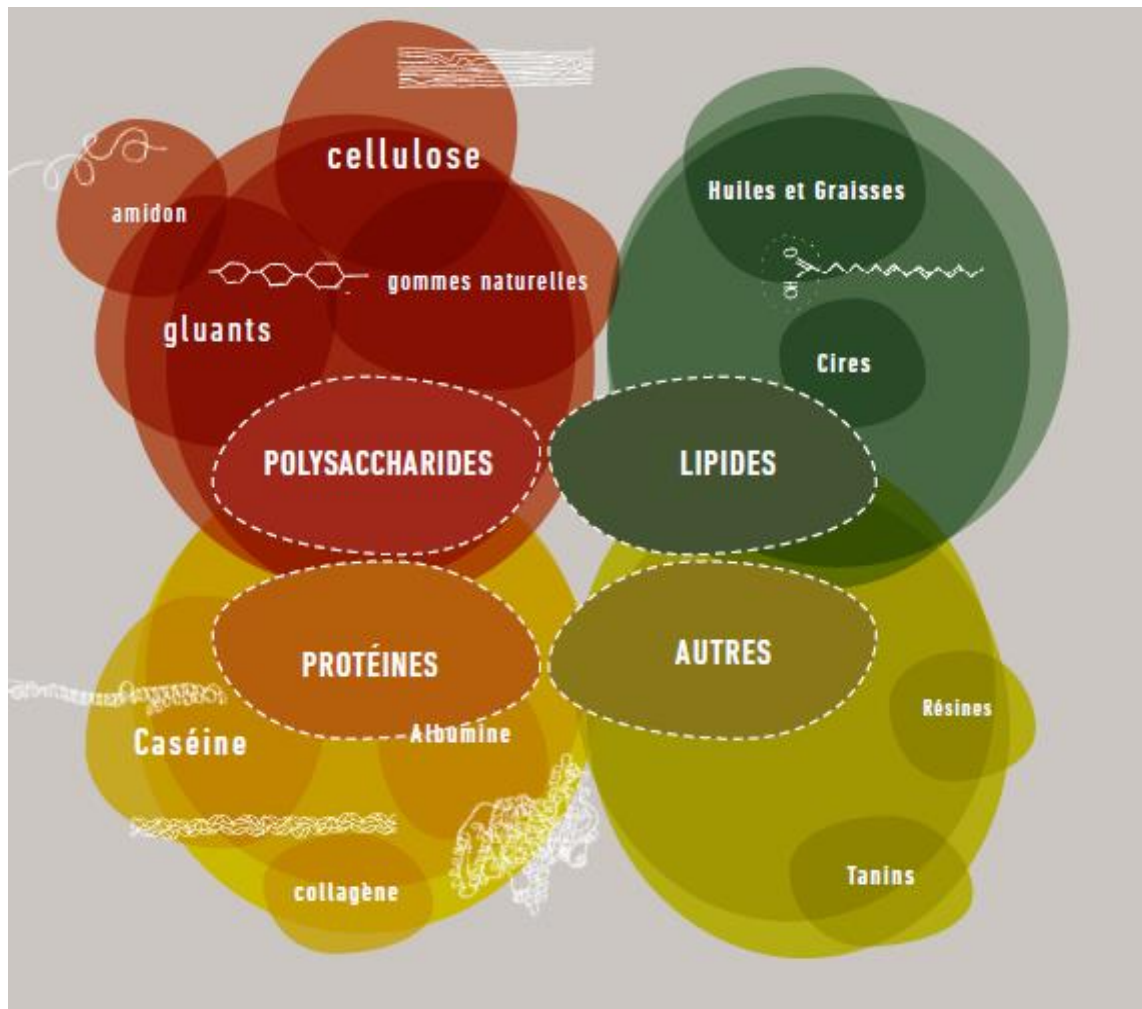


Figure 3.16 Quatre grandes familles des bio-polymères. [30]

5.1 Polysaccharides

Les polysaccharides regroupent toutes les recettes de base de fibres végétales, de bouse de vache ou crottin de cheval, de gomme, jus et gel végétaux divers (cactus, agave, racines et feuilles gluantes, algues, etc.),

Les polysaccharides sont de longues chaînes de sucres qui peuvent avoir un rôle de structure (cellulose et chitine) ou de stockage de l'énergie (amidon).

Les polysaccharides consolident la terre en formant des armatures microscopiques entre les particules d'argile.

Il existe une très grande variété de polysaccharides qui peuvent être regroupés en sous familles selon leur source. [30]

5.1.1 Cellulose

5.1.1.1 Bouse de vache et crottin

Les excréments de ruminants ou d'équidés sont les ingrédients de stabilisation organique les plus répandus et pratiqués à travers le monde : Afrique (Burkina Faso, Mali, Cameroun, Algérie, Ghana, etc.), Amérique Latine (Pérou, Chili, Argentine, etc.), aux États Unis, en Europe (France, Allemagne, etc.), en Asie (Inde, Népal, etc.). La bouse de vache contient de nombreuses fibres de cellulose en partie décomposées : elles sont très fines et peuvent ainsi interagir davantage avec les argiles de la terre. [30]

a) Matière première

La bouse de vache (Figure3.17) est essentiellement composée de fragments d'herbe non digérés : cellulose et tissus lignifiés (assemblages de fibres assez rigides) et de produits d'origine animale ou microbienne contenus dans les sucs digestifs non digérés. [30]



Figure3.17 Bouse de vache. [30]

b) Principes et interprétation

La décomposition partielle des fibres de cellulose et autres tissus végétaux permet une distribution continue de la taille des fibres dans le mélange : du brin d'herbe à la macromolécule de cellulose micrométrique, toutes les tailles de fibres sont présentes. Ce sont de véritables armatures à plusieurs échelles: du grain de sable à la plaquette d'argile. La macromolécule de cellulose est assez stable et rigide quel que soit le pH du milieu et les sels présents. Sa surface porte une faible charge négative, parfois nulle. Elle est capable de s'adsorber facilement sur des particules minérales. D'ailleurs, elle est suffisamment longue pour se fixer à plusieurs plaquettes d'argile à la fois et les relier entre elles. Lorsque cette adsorption est homogène et bien proportionnée, elle participe à la cohésion du mortier et augmente la résistance de l'enduit. [30]



Figure 3.18 Conservation traditionnelle de la case obus des MOUSGOUMS (Cameroun). [30]

5.1.1.2 Fibres fermentées

La pratique de la macération du stabilisant organique est très répandue : chaque continent dispose de ses variantes. La balle de riz fermentée est fréquemment utilisée au Mali. [30]

a) Matière première

Il existe une grande variété de sous produits agricoles s'utilisant comme matière fermentée cible pour stabiliser les mortiers de terre. Parmi eux, les pailles fines ou broyées et balles de céréales, les foin sont les plus utilisés. Pour accélérer le processus de dégradation de ces matières, du jus d'ensilage ou des peaux de fruits comme le raisin ou la pomme s'emploient parfois pour déclencher la fermentation. [30]



Figure 3.19 Balle est l'enveloppe qui entoure le grain de riz. [30]

b) Principes et interprétation

Lorsque les conditions de température et d'humidité sont favorables, à leur décomposition par des micro-organismes (bactéries et champignons). Ils dégradent peu à peu la matière organique en commençant par absorber des sucres simples. Ils s'attaquent ensuite, par leurs enzymes extracellulaires, à des bio polymères plus ou moins aisément dégradables (pectines, amidon, cellulose, etc.). En revanche, certaines macromolécules comme la lignine sont difficilement dégradées.

Au fur et à mesure de cette dégradation, les molécules de cellulose et autres fibres microscopique

se séparent, la matière végétale se divise : la surface de contact entre les argiles et ces fibres végétales microscopiques est très grande, leurs chances d'interagir se multiplient. [30]



Figure3.20 Restauration de la Grande Mosquée de Mopti(Mali). [30]

5.1.1.3 Papier Washi

Le papier Washi s'emploie dans les enduits en terre au Japon. Une technique céramique récente, proche de la recette traditionnelle japonaise, la terre papier ou 'paperclay' est une pratique de plus en plus répandue. [30]



Figure3.21 Papier Washi traditionnellement fabriqué au Japon. [30]

a) Matière première

Le papier Washi est fabriqué à partir du bois de petits arbres sauvages du Japon, de Chine, de Corée et du Népal : le mitsumata, le kouzo et le ganpi. Les débuts de la fabrication de ce papier remontent à près de 1 500 ans. Les Japonais utilisent traditionnellement les déchets de papier dans les enduits en terre. [30]

b) Principes et interprétation

Les étapes de trituration du papier sont déterminantes pour l'obtention de fines fibres de longueur millimétrique. Plus elles sont prolongées, plus le papier se divise en fines fibres.

L'identique de la paille à l'échelle du grain de sable, les fines fibres de papier sont de véritables armatures pour les argiles. Elles jouent un rôle structural important en renforçant l'enduit. Lors de chocs, l'énergie emmagasinée se dissipe davantage le long des nombreuses interfaces entre les fibres et le liant, augmentant la résistance à la rupture du matériau. [30]



Figure 3.22 Fibres du papier washi sont utilisées dans la couche de finition de cet enduit. [30]

5.1.2 Gel végétal

5.1.2.1 Cactus, agave, aloès

Les recettes à base de cactus, d'agave ou d'aloès s'emploient fréquemment en Amérique Latine.

a) Matière première

La chair des tiges de deux grandes familles de cactus sont utilisées : les cactus ceux du genre *Opuntia*, dont les cladodes (partie de la tige en forme de feuille) sont aplaties et rondes.

Pour les agaves et les aloès, c'est la pulpe des feuilles qui s'emploie comme stabilisant. [30]



Figure3.23 Pulpe de l'aloé donne un gel translucide. [30]

b) Principes et interprétation

Le jus de cactus, tout comme la pulpe d'agave ou d'aloès, est composé essentiellement d'eau et d'un polysaccharide dont la structure est proche de la pectine : une longue molécule ramifiée, capable de former un gel.

Les gels de pectine se forment lorsque ces macromolécules peuvent s'approcher suffisamment les unes des autres et former des liaisons faibles. La formation de gel de pectine est facilitée par une baisse de pH (milieu acide), par l'effet déshydratant du sucre (saccharose) et/ou par la présence de cations comme le sodium ou le calcium qui neutralisent les charges négatives répulsives. L'étape de trempage, parfois de macération, est nécessaire pour réunir les conditions favorables de gélification. [30]

5.1.2.2 Eau gluante

Différentes recettes à base d'eau gluante ont été recensées en Afrique de l'Ouest, notamment au Ghana et au Burkina Faso. [30]



Figure3.24 Ces feuilles sèches, Fougua, font partie des végétaux qui forment des gels au contact de l'eau. [30]

a) Matière première

Différents végétaux sont susceptibles de former un gel au contact de l'eau. La recette du *vuolu* pratiquée au Ghana utilise les branches d'une sorte de vigne sauvage. D'autres tiges et branches, mais aussi des feuilles et des racines, ont également cette capacité de rendre gluante l'eau dans laquelle elles trempent. [30]

B) Principes et interprétation

Les molécules de ces différentes matières premières capables de former instantanément un gel au contact de l'eau ne sont pas identifiées. Il s'agit très probablement de diverses macromolécules de la famille des polysaccharides.

Au contact de l'eau, ces macromolécules s'hydratent et se déploient tout en interagissant avec leurs voisines. Généralement, les gels de polysaccharides sont constitués d'un réseau tridimensionnel de macromolécules liées à quelques endroits par des liaisons faibles qui se forment à courte distance (ponts hydrogène, ponts ioniques et liaisons de Van der Waals).

Ces gels jouent un rôle sur la consistance du mortier frais et sur le séchage des enduits. Ce dernier pourrait être un peu ralenti et plus homogène, réduisant la formation de fissures. [30]



Figure 3.25 Eau gluante (Vuolu) Ghana. [30]

5.1.2.3 Algues

La recette traditionnelle de la colle d'algue est originaire du Japon. Elle a inspiré quelques expérimentations récentes en Europe, où son usage a également été recensé. [30]



Figure 3.26 Décoction de cette algue séchée forme un gel en refroidissant. [30]

a) Matière première

Les algues utilisées au Japon font partie de la famille des algues rouges. Tsunomata, Funori sont les noms vernaculaires des algues du bord de mer, au nord du Japon.

Deux additifs alimentaires très utilisés dans l'industrie agroalimentaire sont issus des algues rouges : les carraghénanes et l'agar-agar. Ce sont deux gélifiants. [30]

b) Principes et interprétation

Les deux principaux extraits d'algues rouges sont l'agar-agar et les carraghénanes. Ces deux polysaccharides forment des gels en refroidissant après avoir atteint des températures entre 60 et 100° C. Ces gels deviennent de plus en plus fluides lorsqu'ils sont remués. Laisse au repos, la matière se réorganise et redevient solide.

Cette propriété facilite la mise en œuvre des enduits. La manière des autres gels de polysaccharides, le gel d'algue, en séchant, devient une colle pour les particules minérales. [30]



Figure3.27 Algue, Ginnan, du Japon gonfle dans l'eau froide avant d'être bouillie. [30]

5.1.3 Amidon

L'amidon est un glucide (sucre) complexe composé d'unités D-glucose (sucre simple). Il s'agit d'une molécule de réserve pour les végétaux supérieurs et un élément courant de l'alimentation humaine. Chez les animaux et les champignons, l'équivalent de l'amidon est le glycogène : molécule de stockage de glucides et donc d'énergie. [31]

5.1.3.1 Farines de blé

La farine de blé est le résultat de la mouture de la graine du blé tendre ou froment. La mouture a pris diverses formes depuis les premiers usages de la meule à grains. [32]



Figure3.28 Farine de blé. [32]

a) Matière première

La farine de blé est essentiellement composée d'amidon. Ce polysaccharide est la principale réserve nutritive du monde végétal ; il est emmagasiné dans les graines, les tubercules et les racines. Les grains de céréales en contiennent 40 à 90 % de leur poids sec et les tubercules comme la pomme de terre entre 65 et 85 %. [30]



Figure3.29 Farine de blé contenant de l'amidon. [30]

b) Principes et interprétation

Les grains d'amidon ont la particularité d'éclater lorsqu'ils sont en présence d'eau et chauffés à 70°C. Il se forme alors un empis, dispersion colloïdale plus ou moins visqueuse qui gélifie en refroidissant (phénomène qui provoque l'épaississement de la sauce béchamel). C'est sous cette forme d'empis que l'amidon est utilisé pour stabiliser la terre.

La présence de sels (sel de table, eau calcaire, etc.) ont une action défavorable : ils ont tendance à inhiber la formation du gel d'amidon. Le gel d'amidon est fluidifiant : plus il est agité, plus il devient fluide. L'ajout de colle de farine (Figure 3.30) dans un mortier de terre modifie sa consistance : il devient plus souple lors de l'application. En séchant, les gels de polysaccharides collent davantage les argiles de la terre, renforçant les propriétés de l'enduit. [30]

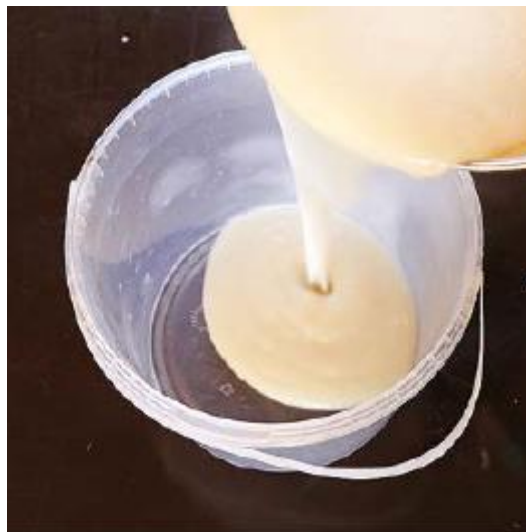


Figure3.30 Colle de farine (Canada). [30]

5.1.3.2 Gomme arabique

La gomme arabique est exportée dès l'antiquité depuis le Soudan. Elle est globalement produite en Afrique Subsaharienne. La gomme de guar est produite en Afrique de l'Ouest et la gomme de caroube dans le bassin méditerranéen. [30]

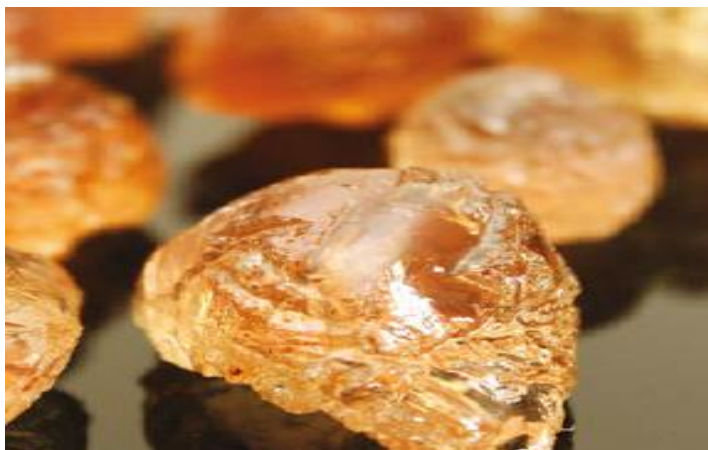


Figure 3.31 Gomme arabique est secrétée par les arbres de la famille des acacias. [30]

a) Matière première

Les gommés naturelles sont extraites des végétaux, à l'exception de la gomme xanthane, produite par des bactéries. Certaines gommés, comme la gomme arabique, sont des exsudats de plantes sécrétés pour cicatrizer leurs plaies et se protéger de l'intrusion d'insectes ou de micro-organismes. D'autres gommés proviennent de graines de légumineuses (gomme de caroube et gomme de guar). [30]

b) Principes et interprétation

La catégorie des gommés regroupe plusieurs polysaccharides : la gomme arabique est composée majoritairement d'un aribino-galactane, la gomme de guar et la gomme de caroube sont des galactomannanes, la gomme xanthane est un hétéropolysaccharide complexe.

Les gommés, notamment celle dont la charge de surface est faible voire nulle, jouent également le rôle de colle pour les terres sableuses. [30]

5.2 Lipides

La principale caractéristique des lipides est qu'ils sont insolubles dans l'eau. Ils peuvent être totalement hydrophobes ou amphiphiles. Huile, graisses et beurre peut avoir une origine animale ou végétale. Grâce à leur hydrophobicité, ces additifs ont été utilisés comme surfaces de revêtement imperméables. Le plus utilisé sont l'huile de lin et le beurre de karité, suivis de l'huile de kapok, de l'huile de pépins de raisin, du poisson l'huile d'abeille et la cire de carnauba. En raison du coût élevé de ces produits, leur utilisation est assez limitée et réservée aux finitions et revêtements couches. [33]

5.2.1 Huile de lin

L'huile de lin ou « huile de graines de lin » est une huile végétale de couleur jaune d'or, tirée des graines mûres du lin cultivé, pressées à froid et/ou à chaud ; parfois, elle est extraite par un solvant en vue d'un usage industriel ou artistique, principalement comme siccatif, ou huile auto-siccative.

L'utilisation de l'huile de lin est très courante en Europe. [34]

a) Matière première

L'huile de lin est extraite des graines : elles sont séchées puis légèrement grillées avant d'être pressées. L'emploi de cette huile en peinture remonte au 15ème siècle. D'autres huiles, d'usage traditionnel ou récent, sont également employées pour stabiliser la terre : l'huile de kapok, de raisin sauvage, l'huile de poisson, l'huile dure (mélange d'huile de lin, de bois de chine et de ricin), etc. [30]



Figure3.32 : L'huile de lin est extraite des graines par pression à froid. [30]

b) Principes et interprétation

Les huiles sont des composés hydrophobes qui ne sont pas miscibles à l'eau. Elles contribuent à améliorer la résistance à l'eau des enduits et sols en terre.

De plus, certaines huiles, dites siccatives, peuvent rendre plus résistant l'enduit ou le sol de terre, en durcissant. Le phénomène de siccation concerne les acides gras comportant des doubles liaisons : ceux enrichis en oméga 3, 6 et 9. Il s'agit d'un phénomène très lent de polymérisation des acides gras. Ces acides gras polyinsaturés s'oxydent à l'air et forment des liaisons covalentes entre eux : les molécules d'acides gras se relient fortement les unes aux autres, l'huile durcit.

Les huiles s'utilisent dans la masse, ajoutées après l'eau de gâchage ou en imprégnation sur l'enduit de finition sec. Elles sont généralement réservées aux couches de finition et aux endroits les plus exposés aux détériorations (sols, mur extérieur particulier, etc.). [30]



Figure3.33 Huile de lin. [34]

5.2.2 Beurre de karité

Le beurre de karité est produit en Afrique de L'Ouest.

Des enduits de terre rouge additionnée au beurre de karité recouvrent ces habitations de la ville de Ségou au Mali. [30]



Figure3.34 Beurre de karité. [30]

a) Matière première

Le beurre de karité est une graisse végétale issue des fruits du karité, arbre des savanes soudaniennes à guinéennes. Certaines recettes mentionnent l'utilisation des résidus ou de l'eau issus de son procédé de fabrication. L'eau de karité est quelques fois utilisée comme eau de gâchage. [30]



Figure3.35 Beurre de karité est extrait des noix de karité bouillies. [30]

b) Principes et interprétation

Les graisses animales et végétales, tout comme les cires, sont des composés hydrophobes. Ajoutées à un mortier de terre, elles ont tendance à améliorer la résistance à l'eau en limitant son absorption. La présence de graisses assouplirait la consistance du mortier frais. [30]



Figure 3.36 Beurre de karités utilisés dans stabilisation traditionnelle. [30]

5.3 Protéines

Les protéines sont des molécules essentielles pour le fonctionnement cellulaire tant dans le monde animal que dans le monde végétal. Elles ont des fonctions très variées suivant leur nature. Certaines ont un rôle structurel, comme le collagène (peau et os), d'autres assurent transport de molécules, comme l'albumine (œuf et sang) et la caséine (lait). Les protéines sont de longues chaînes dont les maillons sont des acides aminés. Un acide aminé est une petite molécule composée d'un carbone asymétrique, lié à une fonction carboxyle (COOH), une fonction amine (NH₂), un hydrogène (H) et un groupe (R). Cette chaîne latérale, R, identifie chaque acide aminé.

Il existe au total une vingtaine d'acides aminés distinctes, composant toutes les protéines du vivant. Ces acides aminés ont des caractéristiques très différentes : certains sont polaires, d'autres portent des charges électriques, d'autres au contraire sont hydrophobes. Les protéines interagissent fortement avec les argiles. Les parties hydrophiles s'adsorbent sur les particules argileuses recouvertes de fines couches de molécules d'eau, tandis que les parties hydrophobes restent à l'extérieur de la matière et donc au contact de l'air, formant une sorte de pellicule de surface qui repousse l'eau.

Les protéines sont de véritables colles des argiles et peuvent également présenter un effet hydrophobe en réduisant la sensibilité à l'eau des enduits en terre stabilisés. [30]

5.3.1 Caséine

La caséine est le nom appliqué à une famille de phosphoprotéines généralement trouvée dans le lait des mammifères. La caséine constitue 80% des protéines dans le lait de vache, et se trouve généralement sous forme de suspension de particules appelées « micelles de caséine ». Ces micelles de caséine sont maintenues ensemble par des ions calcium et des interactions hydrophobes.

La caséine isoélectrique (acide) précipite dans le lait liquide via acidification à pH 4,6 (HCl est

généralement utilisé) et par centrifugation ou filtration. La caséine a une grande variété d'utilisations, y compris dans aliments, peintures industrielles, colles, plastiques, et médicaux et dentaires produits. Parmi les applications industrielles, la caséine a été utilisée comme liants à forte résistivité à l'eau.

Les molécules de caséines (Figure 3.37) sont présentes dans le lait sous forme de micelle. C'est une pelote sphérique de 100 nm de diamètre en moyenne, constituée d'un assemblage de nombreuses molécules de caséine. La taille de ces dernières est de l'ordre de 10 nm. [35]

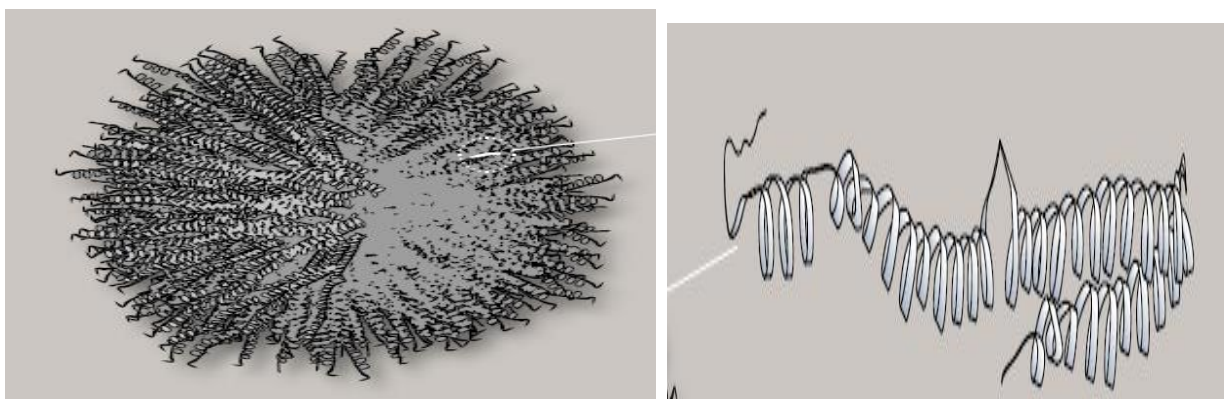


Figure 3.37 Molécules des caséines [35]

a) Variantes

Les sources de caséine sont variées : le lait, le fromage blanc 0 % de matière grasse et la caséine en poudre. Les molécules de caséine sont naturellement organisées en petites pelotes. Pour fabriquer la colle de caséine, cette structure doit être cassée, les molécules de caséine dispersées. Lors de cette étape, le lait ou le fromage blanc perd sa couleur blanche pour devenir translucide. Certaines recettes emploient pour cette étape une base forte, comme l'ammoniaque, du carbonate d'ammonium ou du borax. [30]

b) Principes et interprétation

Les molécules de caséine sont toutes petites en comparaison de la taille des pelotes de caséine. Une fois libérées par l'ammoniaque, ces molécules sont en partie chargées négativement. Elles conservent sur certains morceaux de leur chaîne leur caractère hydrophobe. [30]

Ce sont donc des molécules amphiphiles : capables de lier à la fois l'eau et à la fois l'air ou des composés ou matériaux hydrophobes. La présence d'une charge négative entraîne, suivant les conditions de pH et de force ionique, une attraction ou une répulsion d'origine électrostatique. Suivant la charge portée par les argiles, la caséine peut donc avoir un rôle de dispersant (par neutralisation de charge) ou de colle en liant fortement les particules d'argile entre elles. La caséine est utilisée pour la fabrication de peintures à eau, de papier couché, de plastiques ininflammables, de fibres textiles, de produits pharmaceutiques, etc... (Génin, 1958). La colle industrielle à base de caséine s'obtient en ajoutant un alcali dans de la caséine préalablement délayée dans l'eau (Beau, 1941). En 2015, la production du lait s'élevait à plus de 25 milliards de litres. 30% sont utilisés pour la fabrication de produits intermédiaires dont la caséine et ses dérivés. En équivalent masse sèche utile du lait, la production de caséine et de caséinate représente 2,1% ("L'économie laitière en France," 2010). [36]

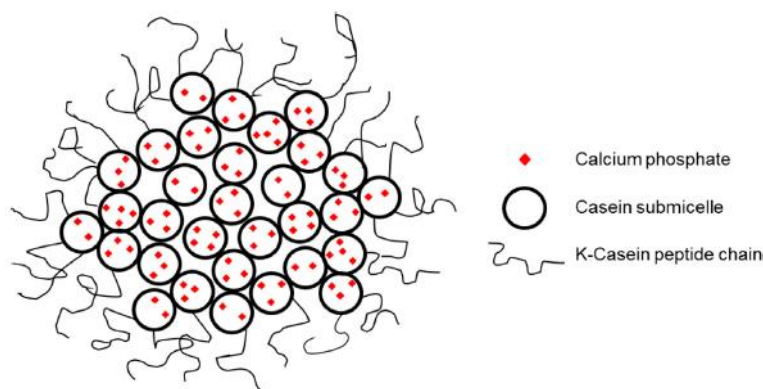


Figure3.38 Schéma de principe de la structure des micelles de caséine (reproduit d'après Fox et al. 2015[35])

c) Pourquoi la caséine précipite telle après ajout d'acide ?

Lorsque le pH du lait est compris entre ses valeurs habituelles soit entre 6,3 et 6,6, les protéines sont dispersées dans le liquide et forment une solution homogène. Mais si la valeur du pH diminue par ajout d'un acide, les macromolécules de protéines se regroupent et se lient entre elles pour former un solide insoluble, les micelles de caséines, qui précipite au fond du récipient, ceci lorsque la valeur du pH du lait atteint 4,6. Ainsi, la charge électrique de la caséine varie avec le pH. [36]

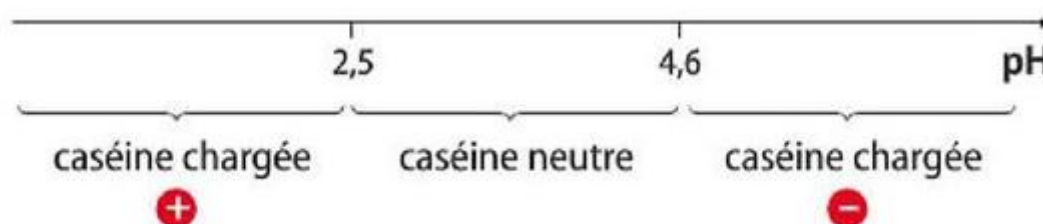


Figure3.39 Diagramme de la caséine en fonction de ph. [36]

5.3.2 Production de Caséine

Le procédé d'extraction des caséines est très spécifique. Les principales étapes sont les suivantes:

- Coagulation du lait (écrémé), obtention d'un caillé ;
- Séparation solide (caillé) / liquide (sérum), par centrifugation ;
- Purification des grains de caillé (le "lavage") ;
- Séchage sur séchoir vibre-fluidisé ;
- Éventuellement broyage des grains.



Figure3.40 Principales étapes de la production de Caséine. [37]

La caséine est largement utilisée comme ingrédient alimentaire (dans les glaces, les yaourts, les charcuteries, les sauces, etc.), mais aussi dans les cosmétiques, la chimie (liants dans les peintures, les adhésifs) et même par le passé pour faire de beaux boutons de vêtements [37]

5.3.2.1 Recette de colle de caséine

Utiliser « 1 L de fromage blanc 0 %

Ajouter 1 petit verre à gnôle d'ammoniaque. Bien mélanger.

Laisser reposer une nuit.

Le lendemain on aura un liquide transparent/ translucide.

Ajouter 1 à 2 volumes équivalents en eau.

Bien homogénéiser.

Teinter avec des pigments ou simplement de l'argile (en poudre).

Utiliser dans les 2 - 3 jours. [30]



Figure3.41 Recette de France à base de colle de caséine. In : Fontaine, L., Anger., (2007). Gisèle Taxil. [30]

Cette recette est pratiquée en Europe, notamment en France. La colle de caséine est connue depuis longtemps pour coller le bois. Elle était utilisée dans les assemblages des avions en bois pendant la première guerre mondiale. [30]

5.3.3 Utilisation de la caséine en géotechnique

Depuis quelques années, la caséine est devenue l'un des bio-polymères utilisés dans les études géotechniques dont les expérimentations en laboratoire ont montré de bons résultats dans l'amélioration des propriétés mécaniques des sols sableux et argileux.

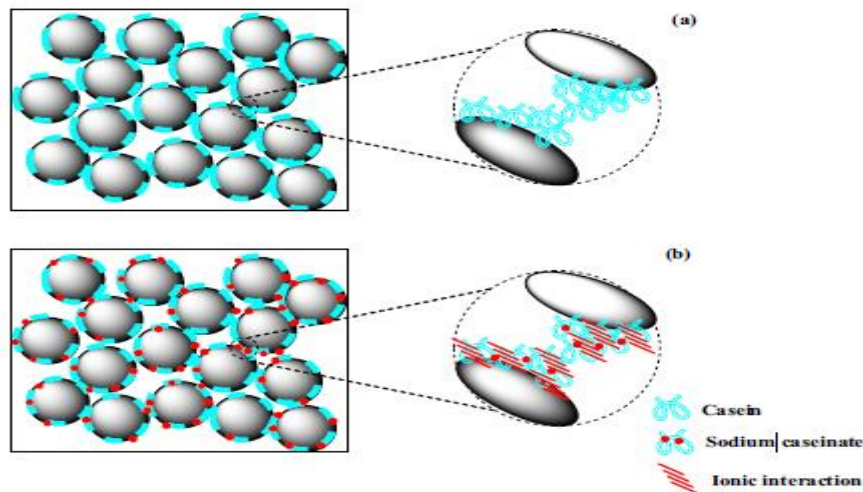


Figure 3.42 Modèle d'interaction bio-polymères à base de protéines: (a) Sable traité à la caséine (b) Sable traité à la caséinate de sodium. [40]

Tableau 3.2 Caséine couramment utilisés en géotechnique. [41]

Biopolymère	Caractéristiques chimiques			Coût [\$/kg]	Comportement avec les sols
	Composition	Structure	Rhéologie		
Caséine	C ₅₁ H ₁₂₅ N ₂₂ O ₃₉ P		<ul style="list-style-type: none"> Propriétés hydrophobes Largement utilisé dans les aliments, les peintures, les adhésifs, les plastiques et les cabinets médicaux 	5-50 (~80)	<ul style="list-style-type: none"> Renforcement Résistance à l'eau Réduction de la conductivité hydraulique

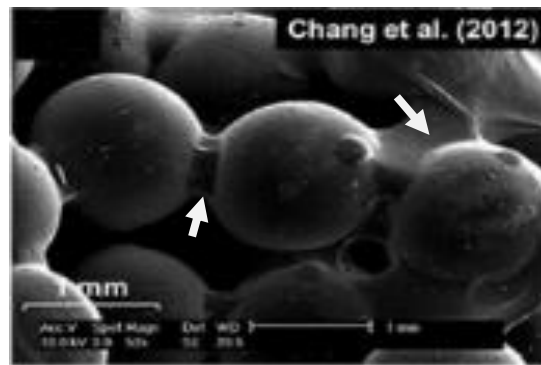
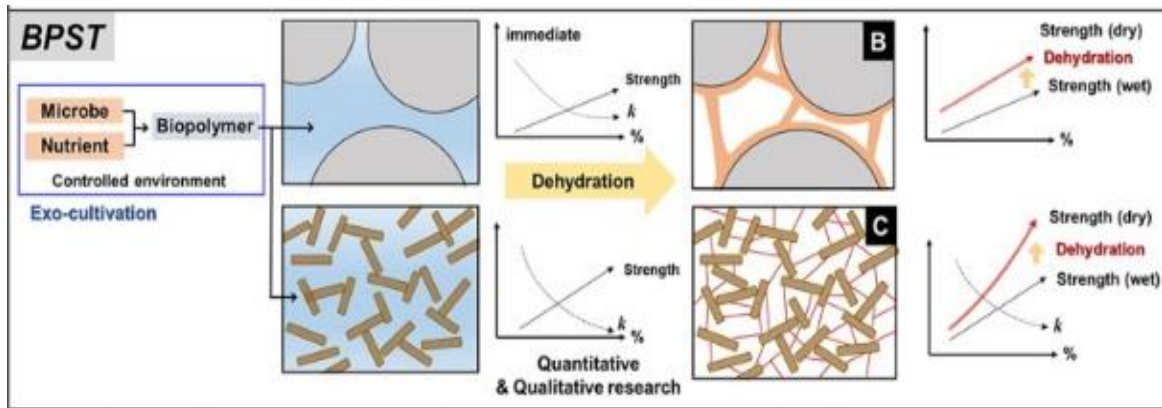


Figure 3.43 Traitement du sol à base de bio polymère (BPST) (images MEB d'après, Chang et al.).

5.3.4 L'ovalbumine et l'albumine du sang

L'albumine est une protéine soluble dans l'eau que l'on retrouve dans le sérum du sang animal ou dans le blanc d'œuf (ovalbumine). L'ovalbumine représente 50% des protéines du blanc d'œuf. C'est une phosphoprotéine globulaire dont la moitié des acides aminés sont hydrophobes. On retrouve également dans le blanc d'œuf, d'autres protéines comme l'ovotransferrine (13% des protéines du blanc d'œuf) et l'ovomucoïde. Les protéines du blanc d'œuf, dont l'ovalbumine, sont réputées être très tensioactives et sont de ce fait utilisées dans diverses industries pour la formation de mousses stables (Phillips, 2009).

En 2004, on estime à 250 000 tonnes en équivalent liquide dont 8 000 tonnes sous forme déshydratée, la production d'ovo produits à base d'œuf de poule. Ces coproduits sont principalement utilisés dans l'industrie de confiserie de pâtisserie et de biscuiterie et aussi en cosmétique. [39]



Figure 3.44 Gouttes d'eau sur un enduit de terre rouge au blanc d'œuf. [38]

5.4 Autres molécules complexes

Les tanins sont des molécules très répandues dans le règne végétal. Ils sont présents dans quasiment toutes les parties des plantes. Le mot tanin trouve son origine dans le nom celtique du chêne tan. L'utilisation des tanins pour convertir les peaux en cuir est connue depuis la haute Antiquité. Lors du tannage des peaux, les tanins et abolissent des liaisons entre les fibres de collagène (protéiné) transformant les peaux fraîches en cuir imputrescible.

La noix de galle, très riche en tanin est une excroissance formée sur les tiges ou les feuilles de végétaux en réponse à la pique d'un parasite. Elle est utilisée historiquement dans la préparation de l'encre noire, broyée et mélangée a du sulfate de fer. Le complexe forme s'appelle du tannante de fer.

L'effet des tanins sur la cohésion argiles est bien moins visible que celui des ions de fer. Ces ions métalliques ont une densité de charge si élevée qu'ils collent fortement les plaquettes d'argile entre elles et rendent la terre insensible a l'eau. [30]

5.4.1 Tanin

Le mot « tanin » vient du terme celtique « tan » qui désigne le chêne dont il était autrefois extrait pour le tannage du cuir. Les tanins sont des composés végétaux présents sur quasiment toutes les parties de la plante. Leur rôle physiologique est essentiellement de pigmentation et de protection contre les agressions biologiques (herbivores). [38]

a) Matière première

Le néré est un arbre de la famille des Fabacées. Les cosses, longues gousses suspendues en grappe et contenant de nombreuses graines noires enrobées de pulpe jaune, sont l'ingrédient principal de la décoction. La décoction de cosses de néré est désignée par différents noms locaux : Dawa-Dawa au Nord Ghana, les fruits sont appelés Assansi ou Brâa au sud du Burkina Faso où le néré est connu sous le nom de Tiapogo, Makuba ou Iuru et nommé Dorowa au Nigeria. [30]



Figure3.45 Cosses de néré de couleur rouge-brun foncé. [30]

b) variantes

Certaines recettes mentionnent le caroubier (*Ceratonia Siliqua*) et l'algarrobo (*Hymenaea Courbaril*), espèces proches du néré (*Parkia Biglobosa*). Dans une autre recette, pratiquée au Burkina, des pierres de limonite (oxydes de fer) sont additionnées aux gousses d'acacia séchées dans le bain bouillant de la décoction. [30]



Figure3.46 Pierres de limonite composées d'oxydes de fer. [30]

Dans certains cas, des écorces Ampoa et des feuilles rendant l'eau gluante sont ajoutées à la préparation. La décoction obtenue est appliquée en badigeon sur la couche de finition (décorations de terres colorées, enduits ou sols). [30]



Figure3.47 Décoction appliquée en badigeon sur la couche de finition. [30]

III.6 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons fourni une bibliographie assez complète sur les différentes techniques de stabilisation des sols avec des liants traditionnels comme le ciment et la chaux et non conventionnels comme le laitier, Pouzzolane naturelle, dolomite, etc....

Nous avons également résumé les types de fibres naturelles et synthétiques qui servent à renforcer le sol.

Enfin, nous avons expliqué un nouveau type de matériau améliorant le sol, à savoir les bio-liants de différents types, et nous montré comment les utiliser dans les constructions.

CHAPITRE IV :
ESSAIS EXPERIMENTAUX
ET ANALYSE DES
RESULTATS

Chapitre IV : Essais Expérimentaux Et Analyse Des Résultats

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une description détaillée du sol étudié et son utilisation. Nous exposons ici les différentes techniques de caractérisation du sol ainsi que la méthodologie d'étude. Cette méthodologie sert à bien tracer le chemin qui mène à la faisabilité ou non de ce matériau. Notre recherche a ciblé principalement le sol du Ben Djerrah dans le but d'assurer la faisabilité technique de l'utilisation de ce sol dans la fabrication des briques en terre crue BTC.

IV.2 Situation géographique et caractéristiques du sol utilisé

Le gisement de Kaolin de Bendjerrah se trouve à 7 km du sud de la ville de Guelma, À coté de la briqueterie de Benouhiba. L'utilisation de l'argile de Bendjerrah est une autre source de ce matériau. Cette argile sert comme matériau de base pour la construction de brique en terre cuite depuis les années quatre vingt dix du siècle précédent. La superficie sur laquelle la briqueterie de Benouhiba est construite est estimée à une vingtaine d'hectares (Figure 4.1). La fabrication des briques nécessite une consommation très énorme de l'énergie et un dégagement d'une quantité non négligeable de dioxyde de carbone.

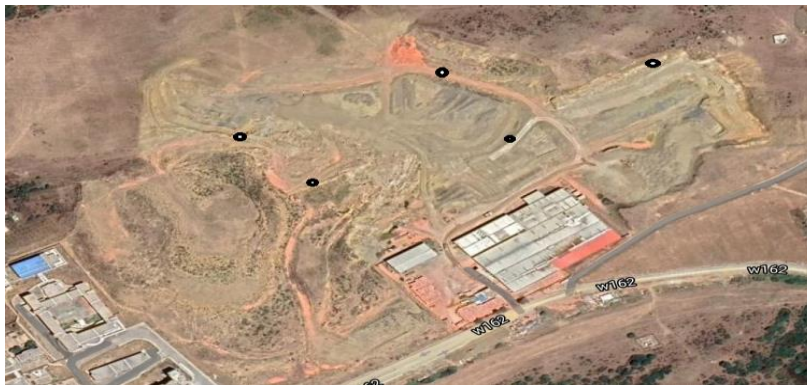


Figure 4.1 Gisement de Kaolin de Bendjerrah

IV.3 Essais d'identification

Dans les études géotechniques, les essais d'identifications sont des tâches principales. Ces essais sont effectués comme suit :

3.1 Analyse granulométrique par lavage et sédimentométrie selon les normes NF P18-560 et NF P94-057

La composition granulométrique influence de façon primordiale les comportements physique et mécanique du sol et toutes les propriétés liées à la teneur en eau et aux fluctuations de celle-ci (compacité, plasticité, portance, capacité de rétention, perméabilité, capillarité). La composition granulaire du sol est déterminée à travers deux essais: le tamisage par voie humide et la sédimentométrie selon les normes NF P18-560 et NF P94-057 successivement. L'analyse granulométrique consiste à séparer les grains agglomérés

d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché (Figure 4.3) au moyen d'une série de tamis (Figure 4.2) et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulé sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse. La fraction fine de taille inférieure à 80µm est reprise pour faire l'essai de sédimentométrie. Cet essai permet de fournir la distribution des tailles des particules fines par le biais de la vitesse de décantation qui est liée à leurs dimensions. La loi de Stokes donne dans le cas des grains sphériques de même masse volumique, la relation entre le diamètre des grains et leur vitesse de sédimentation. Par convention, cette loi est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer des diamètres équivalents de particules. Les particules passant 80µm séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans de l'eau additionnée d'un défloculant. Les particules décantent à différentes vitesses en relation avec leur taille. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de la masse volumique de la solution qui évolue au fur et à mesure qu'elle se décante.



Figure 4.2 Tamis dans l'ordre décroissant



Figure 4.3 Tamisage du sol étudié



Figure 4.4 Essai de sédimentation

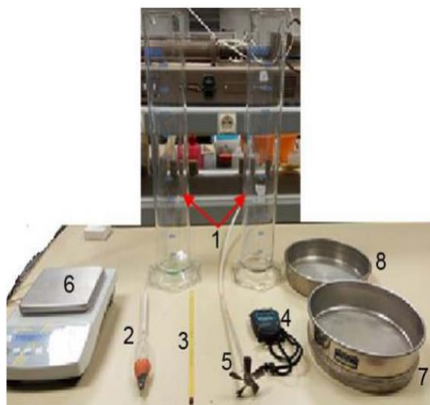


Figure 4.5 Matériel utilisé pour la sédimentation

Le matériel nécessaire (Figure. 4.5) est cité ci-dessous : - deux éprouvettes cylindriques graduées en verre transparent (1) - un densimètre (2) ; - un thermomètre (3) ; - un chronomètre (4) ; - un agitateur manuel (5) ; - une balance de précision de 0.01g (6) ; - un

tamis de diamètre 80µm (7) ; - Un bac pour recueillir le tamisât (8) ; - un agitateur mécanique.

Tableau 4.1 Données des essais d’analyse granulométrique et la sédimentométrie

Masse initiale	1000 g			
D tamis (mm)	Refus(g)	Refus cum(g)	Refus cum(%)	Tamisât cum(%)
6,3	0	0	0	100
5	0,3	0,3	0,04	99,96
4	7	7,3	0,01	99,08
3,35	15,7	23	2,87	97,13
2	25,7	48,7	6,09	93,91
1,18	60,1	108,8	13,6	86,4
0,6	67,1	175,9	21,99	78,01
0,425	29,3	205,2	25,65	74,35
0,3	11,1	216,3	27,03	72,97
0,212	11,6	227,9	28,29	71,51
0,15	16,8	244,7	30,59	69,41
0,08	17	261,7	32,72	67,28
0,07				65,4303
0,055				62,357
0,04				60,1657
0,025				58,156
0,018				56,2648
0,013				53,4279
0,0095				49,8818
0,007				44,4444
0,0033				32,0615
0,0024				9,45626

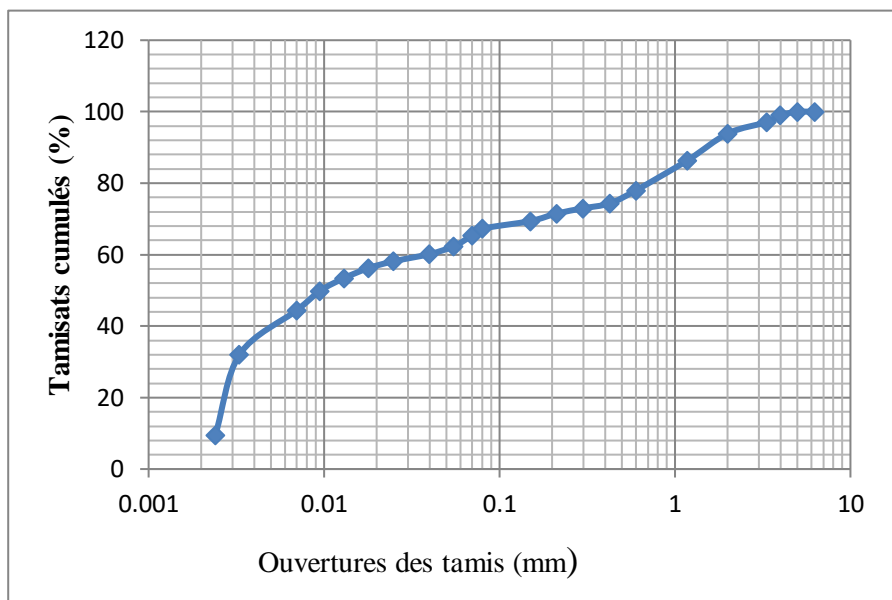


Figure 4.6 Courbe granulométrique du sol étudié

A partir de la courbe granulométrique (**Figure 4.6**), on peut déterminer :

- Coefficient d'uniformité C_u (coefficient de Hazen)

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.04}{0.0025} = 16$$

Avec D_y : ouverture des tamis laissant passer $y\%$ du poids des grains. D_{10} est appelé diamètre efficace.

$C_u < 2$ granulométrie uniforme ou serrée $C_u > 2$ granulométrie étalée

- Coefficient de courbure C_c

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{0.0032^2}{0.0025 \times 0.04} = 0.10$$

Le coefficient C_c permet d'apprécier la forme de la courbe granulométrique. C'est un autre paramètre permettant d'estimer la distribution granulométrique de l'échantillon. Un coefficient $C_c = 0.10$ qui est nettement inférieur à 2. (Granulométrie uniforme ou serrée).

3.2 Essai au bleu de méthylène (VBS) selon la norme AFNOR NF P 94-068

L'essai au bleu de méthylène dit aussi l'essai à la tache est effectué selon la norme (NF P94- 068). Cet essai 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 (VBS), qui est un indicateur essentiel dans la classification des sols. Les Figures. 4.7 et 4.8 montrent les différentes étapes de l'essai au bleu de méthylène.



Figure 4.7 Equipement pour l'essai VBS

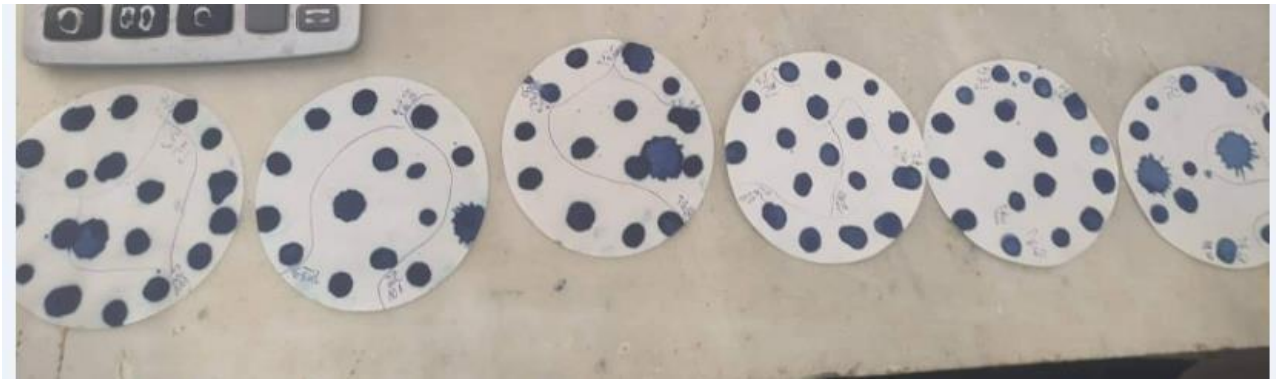


Figure 4.8 Résultats de l'essai VBS

Les résultats de l'essai au bleu de méthylène sont résumés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 Tableau récapitulatif de l'essai VBS

Poids sol (g)	60
Fraction 0/1 (mm)	0.01
Volume bleu (cm ³)	360
Masse bleu (g)	3.60
VBS	6.00

B : masse de bleu introduite (solution à 0/1) : $B = V \cdot 0,01$

$$B = 360 \times 0,01 = 3,60 \text{ g}$$

$VBS = B/m_0 \cdot C \cdot 100$ Si : $D_{\max} > 5\text{mm}$.

$VBS = (B/m_0) \cdot 100$ Si : $D_{\max} < 5\text{mm}$.

$$\text{Donc : } VBS = (3,60/60) \cdot 100 = 6$$

La valeur de bleu (VBS) s'exprime par la quantité de bleu en grammes consommée par 100 grammes de fines. La figure. 4.9 montre la classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène.

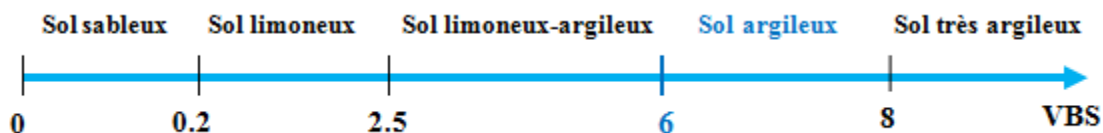


Figure 4.9 Classification du sol selon la valeur de bleu de méthylène.

D'après les résultats trouvés et rapportés au tableau 4.3, le sol étudié est considéré comme sol argileux.

Tableau 4.3 Classification du sol étudié

Échantillon	Valeur du Bleu de méthylène (VBS)	Classification du sol
Sol étudié	6.00	Sol argileux

3.3 Limites d’Atterberg (NORME NF P 94-051)

Le diagramme montré à la figure 4.10 donne une idée sur la variation de la consistance d’un sol fin en fonction de la teneur en eau et la limite de liquidité, limite de plasticité et limite de rétrécissement correspondantes.

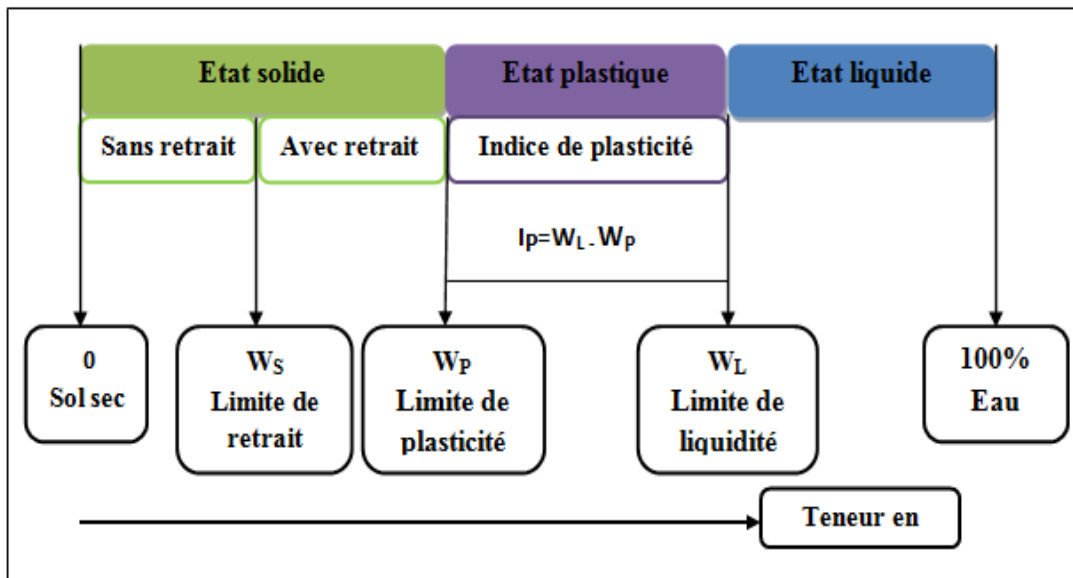


Figure 4.10 Diagramme variation de la consistance d’un sol fin en fonction de la teneur en eau.

3.3.1 Limite de liquidité (W_L)

Nous avons déterminé la limite de liquidité par l’essai du l’appareil de Casagrande (Figure 4.11). Il est réalisé sur la fraction passant au travers du tamis d’ouverture 400µm. La teneur en eau à laquelle un sol cesse d’être plastique pour devenir liquide si on y ajoute de l’eau (limite de liquidité). Cette limite est atteinte lorsque le sol se referme sur une longueur de 12 à 13 mm après 25 coups, (Figure 4.12), dans une coupelle prévue à cet effet, à une fréquence de deux chutes par secondes et d’une hauteur de 1 cm

Cet essai est effectué uniquement sur les éléments fins du sol et consiste à faire varier la teneur en eau de l’élément en observant sa consistance. Il permet également de faire une classification du sol.



Figure 4.11 Appareil de Casagrande utilisé dans l'essai de Limite de liquidité

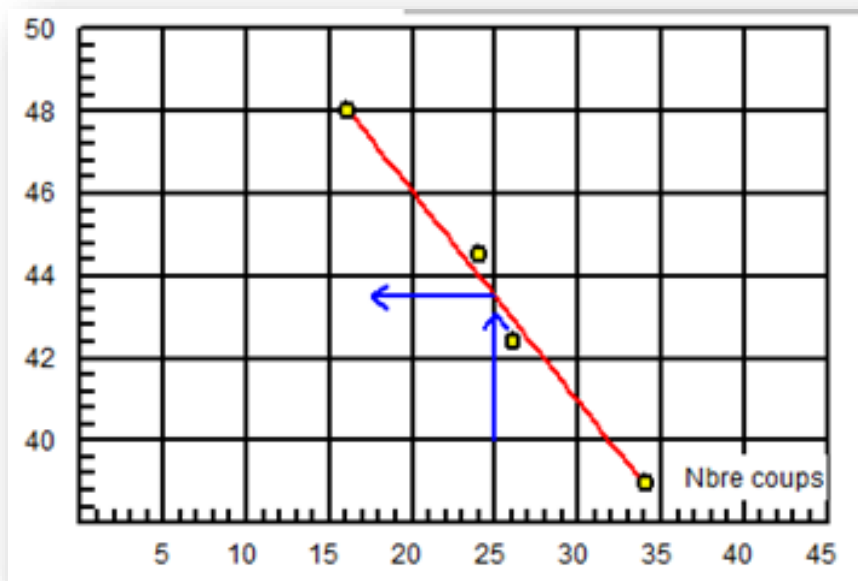


Figure 4.12 Sol se referme sur une longueur de 12 à 13 mm après être tombé 25 fois.

Le tableau 4.4 résume l'ensemble des résultats obtenus à par l'essai de l'appareil de Casagrande.

Tableau 4.4 Résultats de la limite de liquidité

Essais	1	2	3	4
Masse humide (g)	26,2	26,6	24,25	18,9
Masse sec (g)	17,7	18,4	17,2	13,6
w (%)	48,02	44,56	42,44	38,97
Nombres des coups	16	24	26	34

**Figure 4.13** Détermination de la limite de liquidité

La limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à 25 coups. Elle est donc égale à $W_L = 43.5\%$.

3.3.2 Limite de plasticité W_p

Concernant la limite de plasticité W_p , l'essai consiste à la recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure en morceaux de longueurs de 1cm à 2cm, (norme NF P94-051). Il est effectué, comme pour la limite de liquidité, sur la fraction passant au travers du tamis d'ouverture 400 μ m. La figure 4.14 et le tableau 4.5 montrent les échantillons sur lesquels sont effectués les essais de limite de plasticité et les résultats correspondants.



Figure 4.14 Détermination de la limite de plasticité

Tableau 4.5 Résultats de la limite de plasticité

Masse humide (g)	Masse sèche (g)	W (%)
1,7	1,4	21,42%
1,6	1,3	23,07%
2,1	1,7	23,63%

La limite de plasticité est la moyenne des trois teneurs en eau indiquées au tableau 4.5. Elle est égale à : $W_P = 22,67\%$

IP est l'indice de plasticité ; c'est la différence entre les deux limites de liquidité et de plasticité, il caractérise l'étendue ou la zone où le sol étudié a un comportement plastique.

$$I_P = W_L - W_P = 43,5 - 22,67 = 20,83\% \approx \mathbf{21\%}$$

D'après ce qui est trouvé, on peut donner la classification du sol étudié.

Tableau 4.6 Etat du sol en fonction de l'indice de plasticité

Indice de plasticité	Etat du sol
0-5	Non plastique
5-15	Peu plastique
15-40	Plastique
>40	Très plastique

L'état du sol est **Plastique** (Tableau 4.6)

Le diagramme de la figure 4.15 et l’abaque de Casagrande (figure 4.16) montrent les différents intervalles d’argilosité.

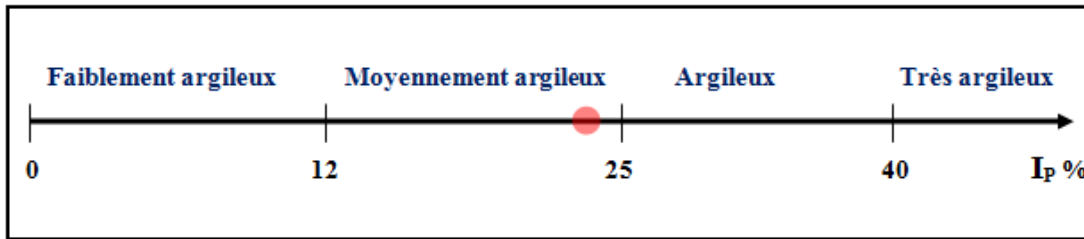


Figure 4.15 Seuils d’Argilosité

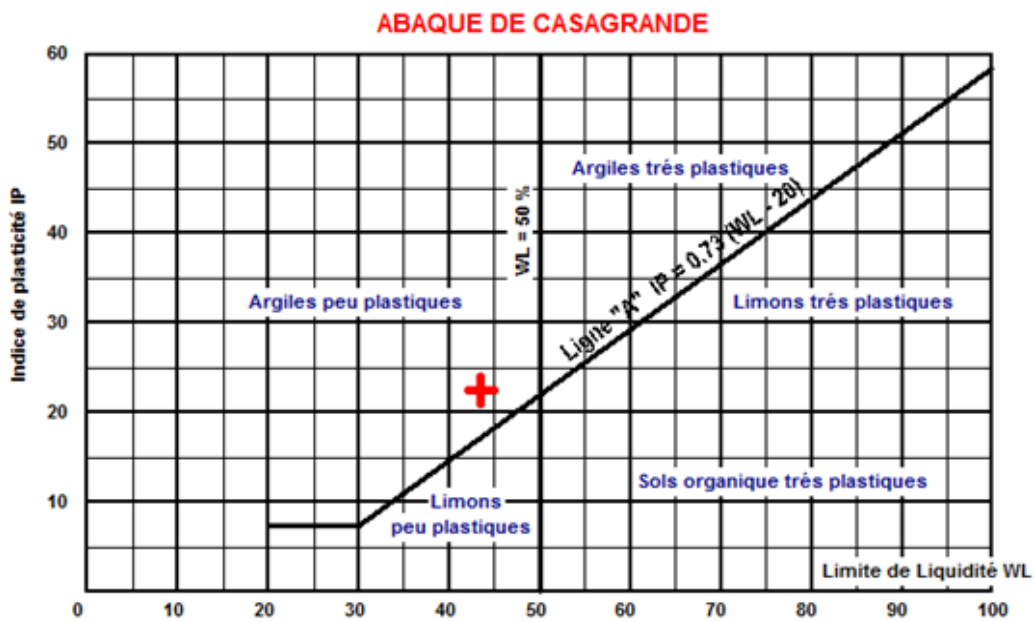


Figure 4.16 Abaque de Casagrande

Ce sol est une argile moyennement (peu) plastique.

Le tableau 4.7 montre les résultats des limites d’Atterberg pour quatre différents minéraux d’argile.

Tableau 4.7 Limites d’Atterberg de certaines argiles d’après (Monaco A. et CHASSEFIERE B.1976)

	Smectite	Attapulgite	Illite	Kaolinite
WL	100 à 1000	150 à 270	60 à 90	30 à 75
WP	50 à 100	100 en moyenne	25 à 60	20 à 40
IP	75 à 125	20 en moyenne	25 à 50	10 à 40

D’après le tableau 4.7, on note que le sol étudié est une argile de type Kaolinite.

3.3.3 Limite de Retrait linéaire LR la norme BS 1377

Le retrait linéaire est la teneur en eau pondérale conventionnelle de dessiccation d'un sol remanié, au dessous de laquelle la longueur de l'échantillon est supposée ne plus varier. Elle est déterminée par la norme BS 1377. Après le séchage de l'échantillon dans un endroit à l'abri du courant d'air pour plusieurs jours, la longueur finale est mesurée.

Le Moule pour la confection d'éprouvettes est un demi-cylindre de 140 mm de longueur et de 12,5 mm de rayon, comme le montre la figure 4.17. Cet essai permet la mesure de la limite de retrait linéaire du sol et indique les propriétés plastiques du sol argileux.



Figure 4.17 Matériel utilisé dans l'essai de Limite de Retrait linéaire



Figure 4.18 Deux échantillons pour l'essai du retrait

Le tableau 4.8 résume les longueurs initiales et finales des deux échantillons du sol étudié.

Tableau 4.8 Résultat de l'essai du retrait

Dosage en (%)	Longueur initiale (mm)	Longueur finale(mm)	Retrait linéaire moyen (%) $SL = \frac{(L_0 - L_1)}{L_0} \times 100$
0	14	12.34	11.85
1	14	12.40	11.42
2	14	12.47	10.92
4	14	12,63	9,78

D'après le tableau 4.8, la limite de retrait est déminée en fonction de l'augmentation du dosage du produit de traitement (caséine).

IV.4 Classification du sol étudié

4.1 Selon GTR selon NF P11-300

En tenant compte des résultats d'Analyse granulométrique et limites d'Atterberg et du bleu de méthylène, le sol en question peut être classifié selon GTR, comme le montre le tableau 4.9

Tableau 4.9 Classification des sols fins selon GTR

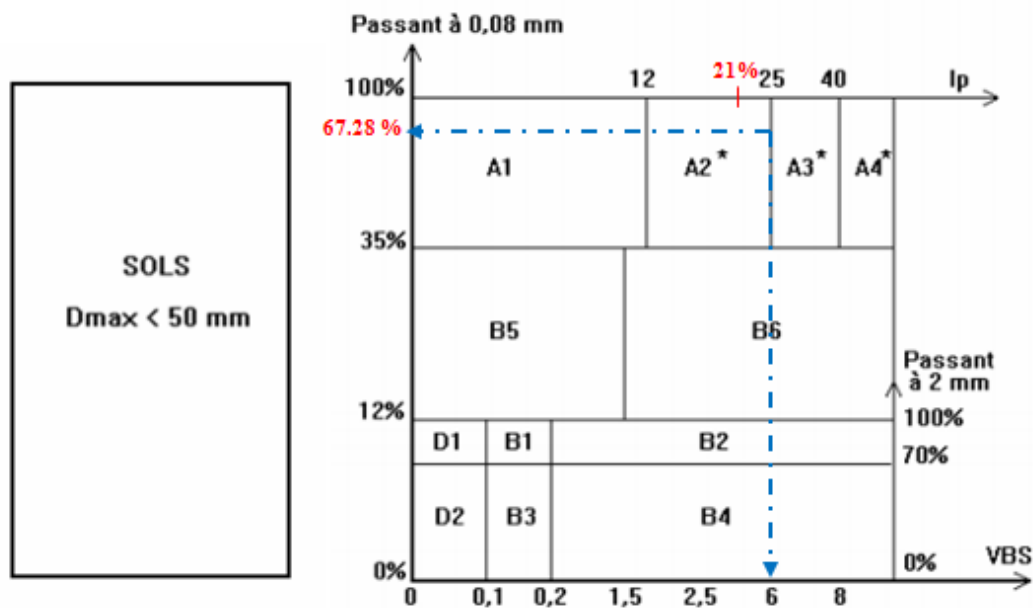
NF P11-300

Classe **A**

Tableau 1 - **Classification des sols fins**

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 µm > 35%	A Sols fins	VBS ≤ 2,5^(*) OU I_p ≤ 12	A₁ Limos peu plastiques, loess, silt alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	IPI^(*) ≤ 3 ou W_n ≥ 1,25 W_{OPN}	A ₁ th	
				3 < IPI^(*) ≤ 8 ou 1,10 ≤ W_n < 1,25 W_{OPN}	A ₁ h	
				8 < IPI ≤ 25 ou 0,9 W_{OPN} ≤ W_n < 1,1 W_{OPN}	A ₁ m	
				0,7 W_{OPN} ≤ W_n < 0,9 W_{OPN}	A ₁ s	
				W_n < 0,7 W_{OPN}	A ₁ ts	
		12 < I_p ≤ 25^(*) OU 2,5 < VBS ≤ 6	A₂ Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	IPI^(*) ≤ 2 ou I_c^(*) ≤ 0,9 ou W_n ≥ 1,3 W_{OPN}	A ₂ th	
					2 < IPI^(*) ≤ 5 ou 0,9 ≤ I_c^(*) < 1,05 ou 1,1 W_{OPN} ≤ W_n < 1,3 W_{OPN}	A ₂ h
					5 < IPI ≤ 15 ou 1,05 < I_c ≤ 1,2 ou 0,9 W_{OPN} ≤ W_n < 1,1 W_{OPN}	A ₂ m
					1,2 < I_c ≤ 1,4 ou 0,7 W_{OPN} ≤ W_n < 0,9 W_{OPN}	A ₂ s
					I_c > 1,3 ou W_n < 0,7 W_{OPN}	A ₂ ts
		25 < I_p ≤ 40^(*) OU 6 < VBS ≤ 8	A₃ Argiles et argiles marnieuses, limons très plastiques...	IPI^(*) ≤ 1 ou I_c^(*) ≤ 0,8 ou W_n ≥ 1,4 W_{OPN}	A ₃ th	
					1 < IPI^(*) ≤ 3 ou 0,8 ≤ I_c^(*) < 1 ou 1,2 W_{OPN} ≤ W_n < 1,4 W_{OPN}	A ₃ h
					3 < IPI ≤ 10 ou 1 < I_c ≤ 1,15 ou 0,9 W_{OPN} ≤ W_n < 1,2 W_{OPN}	A ₃ m
					1,15 < I_c ≤ 1,3 ou 0,7 W_{OPN} ≤ W_n < 0,9 W_{OPN}	A ₃ s
					I_c > 1,3 ou W_n < 0,7 W_{OPN}	A ₃ ts
		I_p > 40^(*) OU VBS > 8	A₄ Argiles et argiles marnieuses, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique		
A ₄ th						
A ₄ h						
A ₄ m						
				A ₄ s		

Tableau 4.10 Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature.



D’après les tableaux 4.9 et 4.10 ce sol est sol fin de classe A2 selon l’ I_p ; V_{BS} et les passant à 0.08mm.

Selon la classification **GTR**, le sol étudié est une argile peu plastique.

4.2 Selon AASHTO

La classification AASHTO (Américain Association of States Highway and Transportation Official) est une version plus élaborée de la classification de Terzaghi (1929). Elle trouve son application essentiellement en géotechnique routière.

Dans le système de classification AASHTO, on trouve huit groupes de sol (A-1 à A-8) et quelques sous-groupes. Les seuls essais qu’il est nécessaire d’effectuer sont l’analyse granulométrique et les essais de limites de consistance. Le tableau ci-dessous fournit la classification de l’AASHTO utilisée de nos jours.

Les sols grenus sont classés dans les catégories A-1 à A-3, de la catégorie A-1 sont bien étalés alors que ceux de la catégorie A-3 sont des sables propres et à granulométrie uniforme. Quant à ceux de la catégorie A-2, ils contiennent un pourcentage significatif de particules fines (jusqu’à 35 % de particules passant le tamis N0. 200).

Dans les catégories A-4 à A-7, On trouve des limons et des argiles ; leur classification repose sur les limites d’Atterberg. Les zones contenant les valeurs de W_L et de I_p propose à chacun des groupes A-4 à A-7 et des sous-groupes de A-2. On classe généralement les sols fortement organiques (les tourbes, par exemple) dans le groupe A-8. Comme dans système **Unified Soil Classification System (USCS)**, les sols A-8 sont classés d’après un examen visuel.

Tableau 4.11 : Tableau de classification AASHTO

General Classification	Granular materials (35% or less passing No. 200 Sieve (0.075 mm))							Silt-clay Materials More than 35% passing No. 200 Sieve (0.075 mm)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
(a) Sieve Analysis: Percent Passing											
(i) 2.00 mm (No. 10)	50 max										
(ii) 0.425 mm (No. 40)	30 max	50 max	51 min								
(iii) 0.075 mm (No. 200)	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
(b) Characteristics of fraction passing 0.425 mm (No. 40)											
(i) Liquid limit				40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
(ii) Plasticity index	6 max		N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min*
(c) Usual types of significant constituent materials	Stone Fragments Gravel and sand		Fine Sand	Silty or Clayey Gravel Sand				Silty Soils		Clayey Soils	
(d) General rating as subgrade.	Excellent to Good							Fair to Poor			

* If plasticity index is equal to or less than (liquid Limit-30), the soil is A-7-5 (i.e. PL > 30%)
 If plasticity index is greater than (Liquid Limit-30), the soil is A-7-6 (i.e. PL < 30%) ←

D'après le tableau 4.11. Ce sol est de classe A-7-6 selon le passant à 0.075 mm, W_L , W_P et IP, nous pouvons alors dire que c'est un **sol argileux**.

4.3 Essai Proctor normal selon la norme NF 94-093

La présente norme détermine les caractéristiques de compactage d'un sol qui sont la teneur en eau optimale (W_{opt} en %) et la masse volumique sèche maximale ($\rho_d \max$). Le principe de l'essai Proctor normal consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter avec une dame normalisée, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe de variation de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.



Figure 4.19 Vue générale de l'équipement de l'essai Proctor.

Les résultats de l'essai Proctor Normal sont rapportés au tableau 4.12

Tableau 4.12 Résultats de l'essai Proctor Normal

N° de l'essai	1	2	3	4	5
Teneur en eau (%)	12	14	16	18	22
Masse du moule m(g)	1839	1839	1839	1839	1839
Masse moule+sol humide (g)	3586,5	3692,5	3765,3	3824,8	3851,5
Masse du sol humide (g)	1747,5	1853,5	1926,3	1985,8	2012,5
Volume du moule (cm ³)	995,282	995,282	995,282	995,282	995,282
ρ_h (g/cm ³)	1,756	1,862	1,935	1,995	2,022
ρ_d (g/cm ³)	1,57	1,63	1,67	1,69	1,66

Les résultats de l'essai Proctor Normal sont illustrés à la figure 4.20.

4.4 Essai de Proctor modifié

Cet essai normalisé (NF P 94-093) permet de reproduire au laboratoire plus ou moins les conditions de compactage sur chantier. Il est effectué généralement selon deux modes de compactages d'intensités différentes : par l'essai Proctor standard (à énergie moyennement poussée) et par l'essai Proctor modifié à énergie plus intense, ce dernier a été choisi pour mener cette investigation. Si l'on fait varier la teneur en eau de l'échantillon et que l'on représente graphiquement la variation de ρ_d en fonction de w (%), on obtient une courbe en cloche qui représente un point haut qu'on l'appelle « optimum Proctor ».

Les résultats de l'essai Proctor modifié sont rapportés au tableau 4.13.

Tableau 4.13 Résultats de l'essai Proctor modifié.

Essai N°	1	2	3	4
Teneur en eau estimée (%)	12	14	16	20
Masse moule m(g)	1839	1839	1839	1839
Masse moule+sol humide m_h (g)	3873,9	3958,2	4014,1	3942,4
Masse sol humide (g)	2034,9	2119,2	2175,1	2103,4
Volume moule (cm ³)	995,282	995,282	995,282	995,282
ρ_h (g/cm ³)	2,045	2,129	2,185	2,113
ρ_d (g/cm ³)	1,79	1,87	1,88	1,76

Les résultats de l'essai Proctor modifié sont illustrés à la figure 4.20.

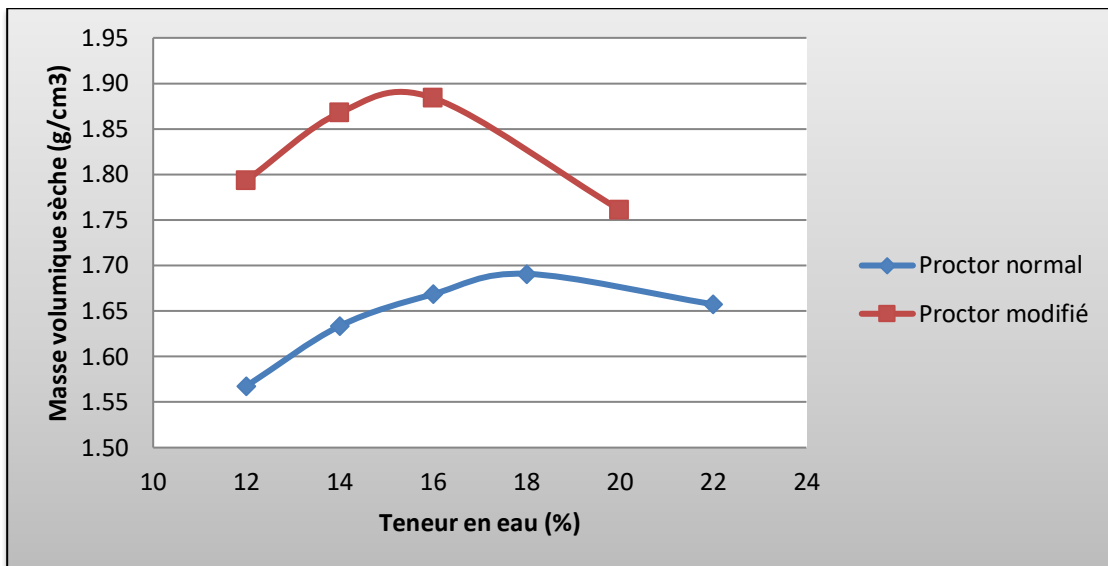


Figure 4.20 Courbes de l'essai Proctor normal et modifié

D'après la figure 4.20, la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale pour chaque essai sont rapportés au tableau 4.14.

Tableau 4.14 La teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale pour chaque essai

	Proctor normal	Proctor modifié
Wopt (%)	17.9	15.2
ρ_d (g/cm³)	1.69	1.88

IV.5 Positionnement du sol naturel (SN) par rapport aux recommandations pour les BTC

La norme [Norme-NF-XP-P13-901, 2001] et les recommandations [CRATerre-EAG, 1998], [MOPT, 1992], [Jiménez et al. 2007], [Houben and Guillaud, 1994] précisent les caractéristiques en termes de granulométrie, de plasticité, de densité et de résistance que doivent vérifier les matériaux aptes à être utilisés dans la confection des BTC.

5.1 Vis-à-vis de la granulométrie

La courbe de la distribution granulométrique est présentée sur la figure 4.21. Sur cette figure, le fuseau déduit des normes [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], [MOPT, 1992] est représenté en pointillés. Il est à noter que la courbe granulométrique du sol naturel se positionne de manière satisfaisante (à plus de 70%) par rapport au fuseau granulométrique, Par conséquent, ce matériau peut être sélectionné en état naturel pour la confection des BTC.

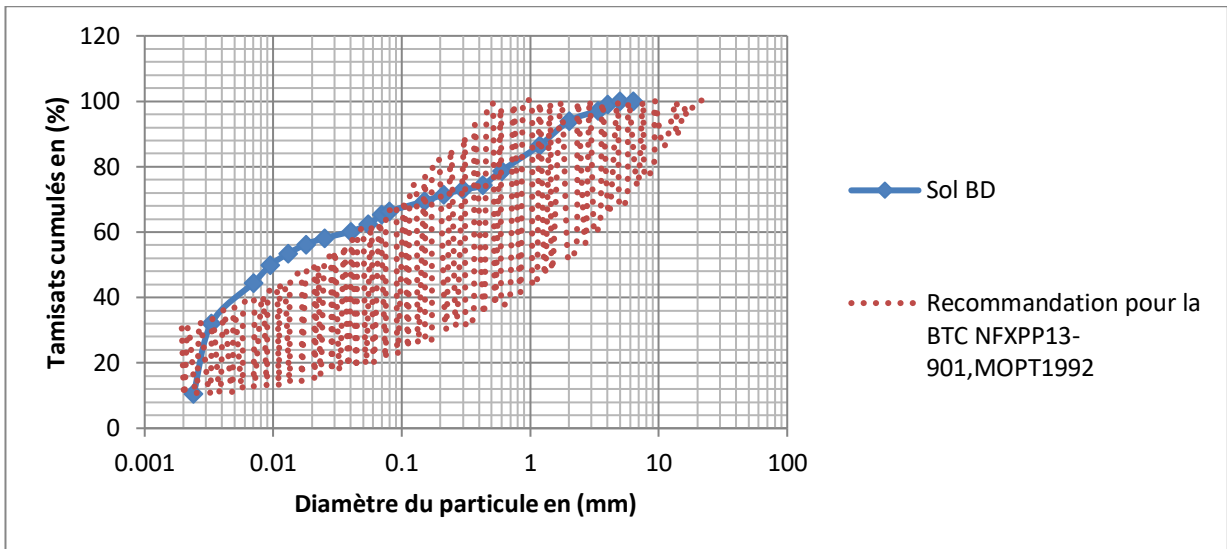


Figure 4.21 Distribution granulométrique du sol naturel et le fuseau recommandé pour le BTC.

5.2 Vis-à-vis des limites d'Atterberg

La limite de liquidité et l'indice de plasticité du sol naturel sont positionnés dans le diagramme de Casagrande dans le plan (LL, PI), (figure 4.22). Sur ce même plan, nous avons rapporté les deux fuseaux recommandés par les normes [Norme-NF-XP-P13-901, 2001] et [MOPT, 1992]. On constate que le sol naturel se positionne au-dessus de la droite (A) de l'équation $I_p = 0.73 (LL-20)$. Par ailleurs, on remarque qu'il se trouve à l'intérieur des fuseaux normalisés, le rendant ainsi approprié pour être utilisé pour les BTC.

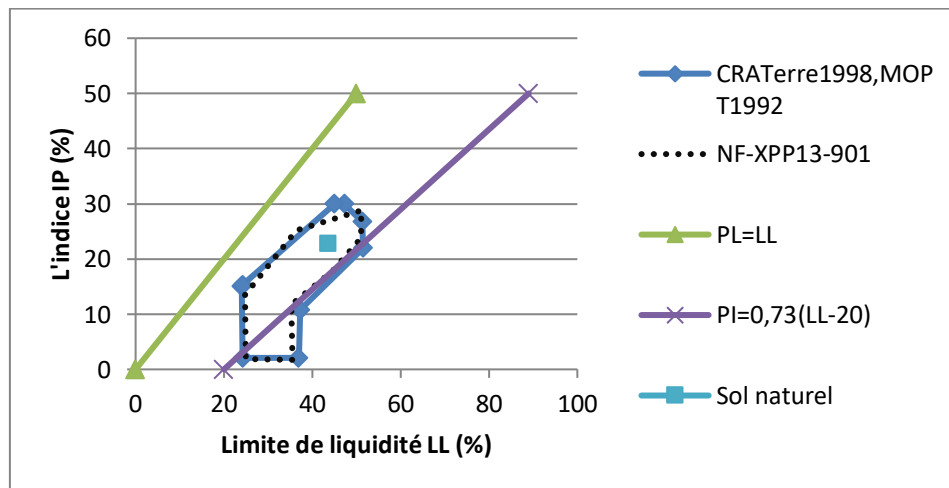


Figure 4.22 Limites d'Atterberg du sol naturel et le fuseau recommandé pour BTC

5.3 Vis-à-vis du compactage

Les courbes de compactage à l'optimum de Proctor Normal (SPO) et à l'optimum de Proctor Modifié (MPO) du matériau naturel (SN) sont représentées dans le plan. Sur ce

même plan, nous avons positionné le domaine du couple recommandé par Moevus et al. [2012], Houben and Guillaud [1994] et Minke [2006]. On constate que pour l'énergie SPO, la masse volumique sèche maximale est bien au deçà du fuseau recommandé, qui borne la teneur en eau de 17.9% et la masse volumique sèche maximale de 1.69 g/cm³ (figure 4.23), mais pour l'énergie MPO, le point correspondant à la masse volumique sèche maximale de 1.88 g/cm³ et à la teneur en eau optimale de 15.2% est bien dans le fuseau recommandé.

Le tableau 4.15 résume les différentes valeurs du poids volumique et la teneur en eau relevées dans la littérature concernant la mise en œuvre des BTC.

Tableau 4.15 Teneurs en eaux initiales et les poids volumiques secs maximales des BTC ([Moevus et al. 2012], [Jiménez et al. 2007], [Houben and Guillaud, 1994])

Référence	Technique	γ_{dmax} (kN/m ³)	Wi (%)
Craterre2012	BTC	16 à 22	5 à 15
Jiménez 2007	BTC	17.5 à 23	5 à 15
Morel 2003	BTC	18.6 à 18.7	/
Hakimi1996	BTC	19.2 à 19.30	9.8 à 10.8
Olivier1994	BTC	18.25à 20.13	12 à 19
Ola 1987	BTC	16 à 19	/

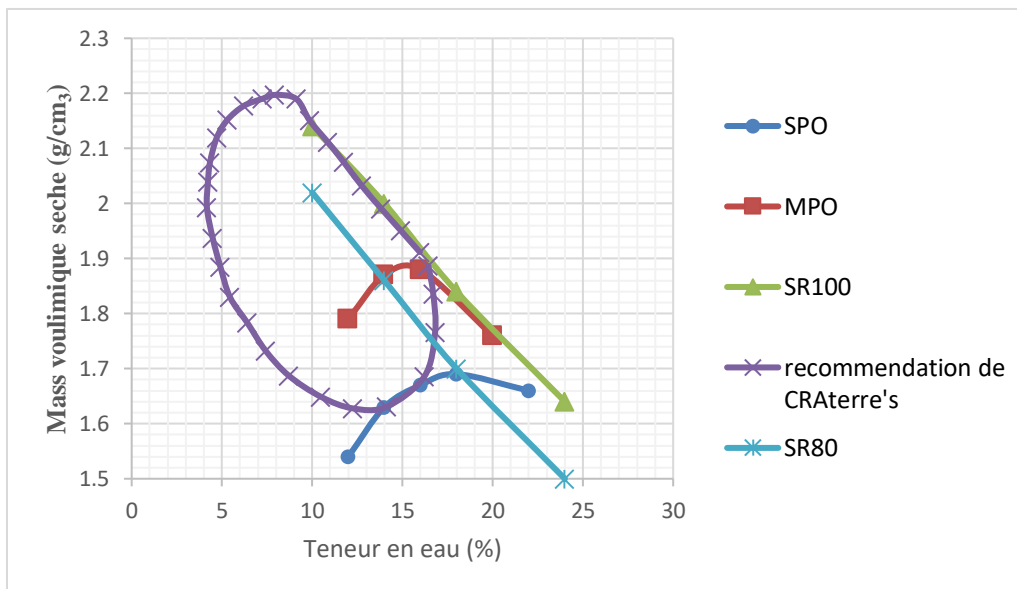


Figure 4.23 Essais de compactage (OPN et OPM) du sol naturel (SN) et la zone recommandée pour les BTC.

5.4 Conclusion sur l'utilisation du sol naturel (SN) dans les BTC

À partir des résultats de d'identification, ce sol a montré qu'en termes de granulométrie, et de masse volumique sèche maximale et de plasticité, il répond aux normes et recommandations concernant son aptitude à être utilisé comme matière première pour les BTC.

IV.6 Produit de traitement utilisé

6.1 Caséine

Le produit de traitement utilisé est la caséine en poudre (figure 4.24). C'est un produit fabriqué par L'unité de production de la **laiterie Soummam** à Bejaïa. Les caractéristiques principales ont été présentées précédemment dans le chapitre 3.

Des études indiquent que la caséine peut être considérée comme une alternative écologique pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols. Étant donné que les matériaux traditionnels de stabilisation des sols, en particulier le ciment, ont des effets néfastes sur l'environnement, les matériaux alternatifs tels que la caséine sont respectueux à l'environnement, renouvelables et peu coûteux.



Figure 4.24 Caséine en poudre

6.2 Choix des dosages de mélanges

Les quantités respectives des différents matériaux (le sol et le produit de traitement) ont été préparés à la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale, l'essai Proctor modifié ($\rho_d=1880 \text{ kg/m}^3$) et ($w_{opt}=15.2\%$). Le sol a été mis en premier lieu à l'étuve pour séchage pendant une période de 24 heures sous une température de $105 \text{ }^\circ\text{C}$. Puis, le sol a été mélangé à sec avec le produit de traitement, à savoir la caséine (figure 4.25). Après avoir mélangé le tout à sec, nous avons ajouté une quantité d'eau qui correspond à la teneur en eau optimale Proctor modifié. Le malaxage est réalisé jusqu'à l'obtention d'un mélange parfaitement homogène et laissé dans un sac en plastique fermé pendant 24 heures (Figure 4.26).



Figure 4.25 Mélange sol-bioliant à sec



Figure 4.26 Échantillons sol-bioliant dans des sacs en plastique

Les mélanges sont :

Mélange 1: sol + 1% caséine

Mélange 2: sol + 2% caséine

Les masses sont présentées dans le tableau 4.16..

Tableau 4.16 Masse de chaque composant des mélanges sol - liant

Dosage (%)	w %	ρ_d (kg/m ³)	Masse du sol (g)	Masse de la caséine (g)	Masse de l'eau (g)
0	15.2	1880	1300	0	197.6
1	15.2	1880	1287	13	197.6
2	15.2	1880	1274	26	197.6

Une fois les mélanges préparés, les éprouvettes sont compactés selon le mode de compactage statique à l'aide de la presse UNIFRAME (figure 4.27).



Figure 4.27 Machine de compactage UNIFRAME

6.3 Confection des éprouvettes

Une fois les mélanges préparés, les éprouvettes sont compactées selon le mode de compactage statique à l'aide de la presse UNIFRAME à une vitesse de 20 mm/min.

Les éprouvettes obtenues sont présentées à la figure 4.28. Pour la réalisation de l'essai triaxial (UU), ces éprouvettes cylindriques doivent être confectionnées par carottage avec une tresse coupante (Figure 4.29.(a)) , ensuite la hauteur des éprouvettes est réglée (Figure

4.29 (b)) à l'aide d'un fil métallique (Figure 4.29 (c)), enfin les éprouvettes ont été scellées à l'aide d'un papier film (Figure 4.30).



Figure 4.28 Eprouvettes compactées statiquement

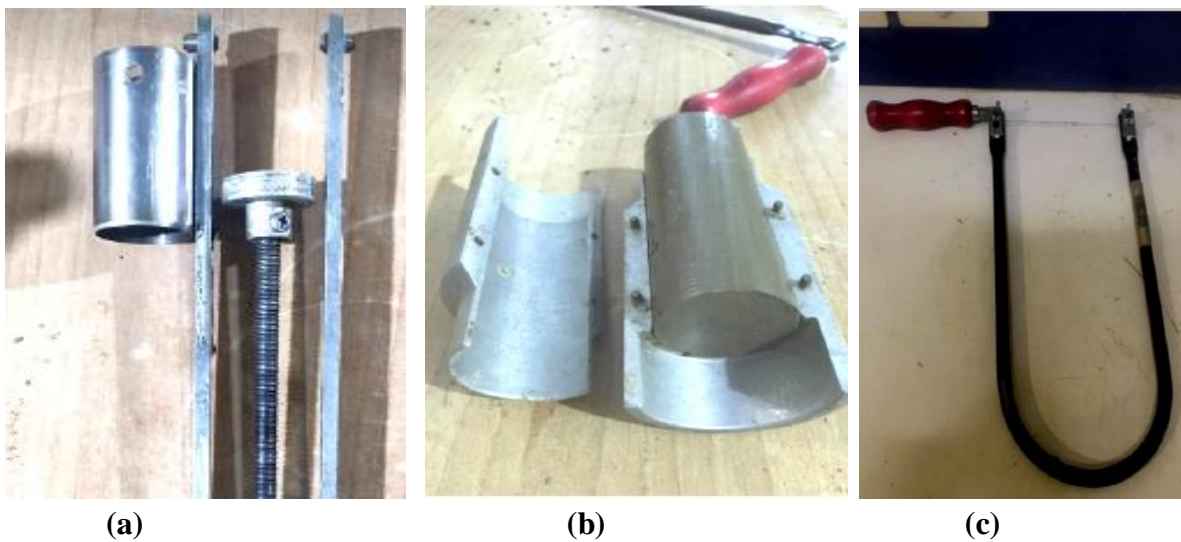


Figure 4.29 (a) Trousse coupante, (b) Echantillon après extraction, (c) Fil métallique.



Figure 4.30 Eprouvettes du sol traité scellées dans un papier film.

IV.7 Essai triaxial (NF P94-074)

Cet essai permet d'étudier le comportement mécanique d'un sol et définir les différents paramètres liés au comportement mécanique d'un sol dans des conditions voisines de celles observées dans la nature. Le principe de cet essai consiste à placer une éprouvette de sol, de forme cylindrique, dans une cellule pleine de liquide. L'échantillon à tester est placé dans une membrane, elle même introduite dans la cellule. Cet échantillon est donc soumis à : une pression hydrostatique de confinement σ_3 appliquée par l'intermédiaire du liquide remplissant la cellule (en général ce liquide est l'eau). Un déviateur de contraintes appliqué par un piston chargé au moyen d'une presse.

7.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental que nous avons utilisé pour réaliser notre programme d'essais se compose des éléments suivants (Figure 4.31) :

- une cellule triaxiale de dimensions appropriées à celles de l'éprouvette à tester.
- un dispositif de chargement et des moyens de mise en pression. Ce dispositif assure le déplacement axial et l'application des contraintes à l'éprouvette. Il comporte :
 - une presse électromécanique.
 - des contrôleurs (pression – volume).
 - un vérin hydraulique.
- un dispositif de mesure pour effectuer les différentes acquisitions nécessaires en cours de l'essai. Il se compose de :
 - capteurs de déplacement
 - capteurs de force
 - capteur de pression interstitielle
- une pompe à vide.
- un système de pilotage et d'acquisition de données

L'ensemble de ces éléments doit assurer les fonctions suivantes :

- appliquer les chargements axiaux et radiaux désirés à une éprouvette,
- mesurer les différentes déformations provoquées durant l'essai (déformation) axiale et déformation volumique),
- mesurer les efforts appliqués (chargement axial, et pression radiale),
- mesurer la pression interstitielle.

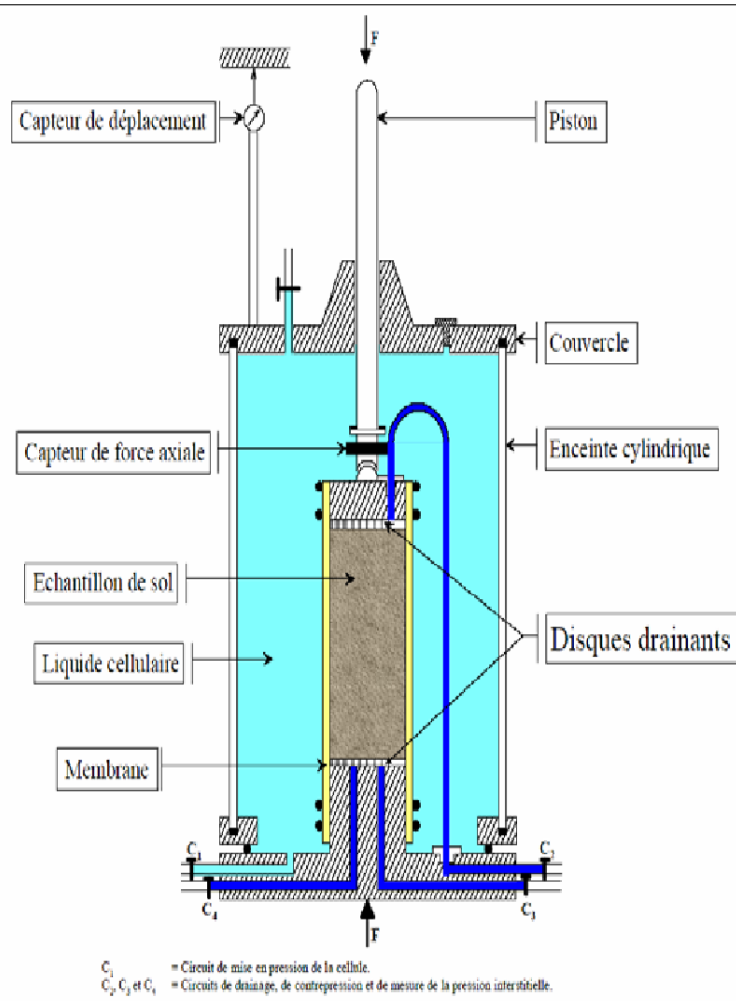


Figure 4.31 Eléments principaux de l'appareil de triaxial



Figure 32 Appareil triaxial du laboratoire (LGCH) Guelma

7.2 Types d'essais triaxiaux

Il existe trois principales modalités de l'essai:

Essai non consolidé - non drainé **UU** : dans cet essai l'eau interstitielle est bloquée dans l'échantillon, et par conséquent la pression interstitielle est libre d'évoluer. Pendant cet essai le volume reste constant.

Essai consolidé - drainé **CD** : dans cet essai, après avoir consolidé l'échantillon, on le cisaille avec le drainage ouvert, on permet donc un changement de volume. La surpression interstitielle est donc à tout instant nul ($u = u_0 \neq 0, \Delta u = 0$).

Essai consolidé - non drainé **CU** : dans cet essai l'échantillon est consolidé sous une contrainte isotrope, puis on cisaille avec le drainage fermé.

7.3 Mode opératoire et procédure de l'essai

Nous avons travaillé sur des échantillons de diamètres 38 mm et de hauteur 76 mm (Figure 4.33(a)). La technique de confection se déroule selon les étapes suivantes :

1. Préparer la base de la cellule triaxiale. Dans cette étape, il faut vérifier que les différents circuits de la cellule (circuits des capteurs de pression, embases) ne sont pas bouchés et qu'ils sont saturés ;
2. Préparer la membrane à utiliser. En ce qui concerne la membrane, il est nécessaire d'effectuer une vérification de l'étanchéité. Cette vérification se fait en mettant la membrane sous air comprimé préalablement introduite dans la cellule, puis remplie d'eau. Nous appliquons ensuite une pression de confinement, une fuite est alors révélée par des bulles d'air qui s'échappent ;
3. Ajuster ensuite la membrane sur le moule de façon à ne pas avoir des torsions dans la membrane ;
4. Placer l'échantillon délicatement dans le moule ;
5. Placer un disque de plexiglas sur l'embase inférieure. Ensuite, placer l'ensemble moule-échantillon sur le disque (Figure 4.33 (b)) ;
6. Placer un second disque de plexiglas sur la surface de l'échantillon et l'embase supérieure ;
7. Fixer la membrane en la déroulant sur l'embase (supérieure et inférieure) à l'aide des joints toriques (2 en haut, 2 en bas) (Figure 4.33(c)) ;
8. Bien placer la cellule cylindrique en assurant le contact entre le piston de la cellule et la tête de l'échantillon, serrer les trois barres d'attache en acier inoxydable (Figure 4.33(d)) ;
9. Enfin placer la bille sur laquelle vient s'appuyer le piston d'application de l'effort axial (Figure 4.33(e)) ;
10. L'eau sous pression est introduite dans la cellule (Figure 4.33 (f)) et exerce une contrainte « σ_3 » sur l'éprouvette. Trois essais sont menés pour trois différentes contraintes de confinement (100 kPa, 200 kPa et 300 kPa, respectivement) ;
11. L'essai est terminé conventionnellement lorsque le système d'acquisition détecte une chute de résistance ;

12. Les pressions et les déformations appliquées et produites durant l'essai sont mesurées à l'aide des capteurs et contrôleurs. Toutes ces données sont enregistrées par un ordinateur (Figure 4.33 (g)) ;
13. A la fin de l'essai la cellule est vidée et démontée, L'échantillon est enlevé (Figure 4.33 (h)), ainsi que la membrane et les disques doivent être bien nettoyés.



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)

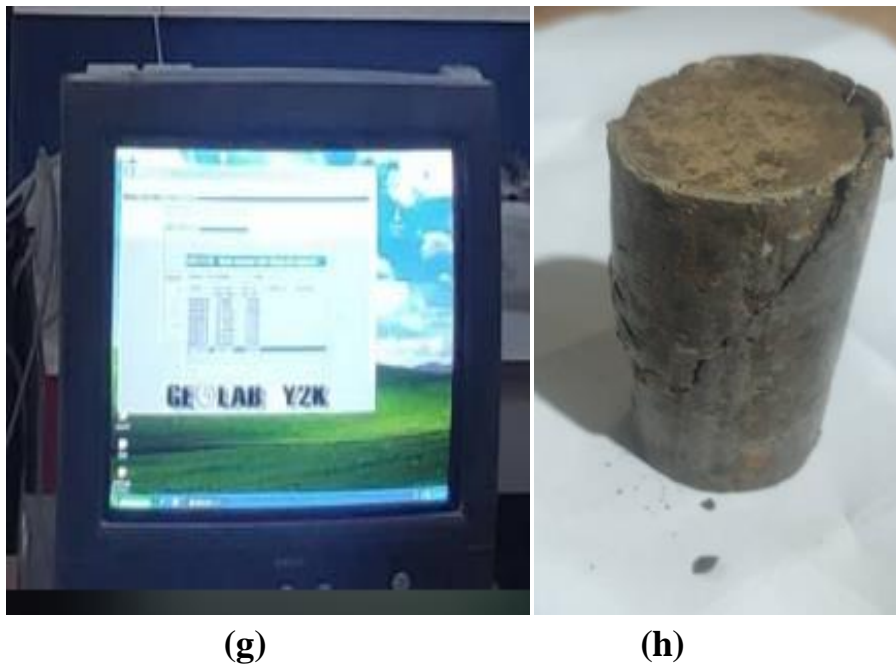


Figure 4.33 Etapes de déroulement de l'essai triaxial

7.4 Résultats des essais triaxiaux(UU)

7.4.1 Echantillon 01 : sol naturel (témoin)

Les relations déviateur-déformation verticale sont rapportées à la figure 4.34.

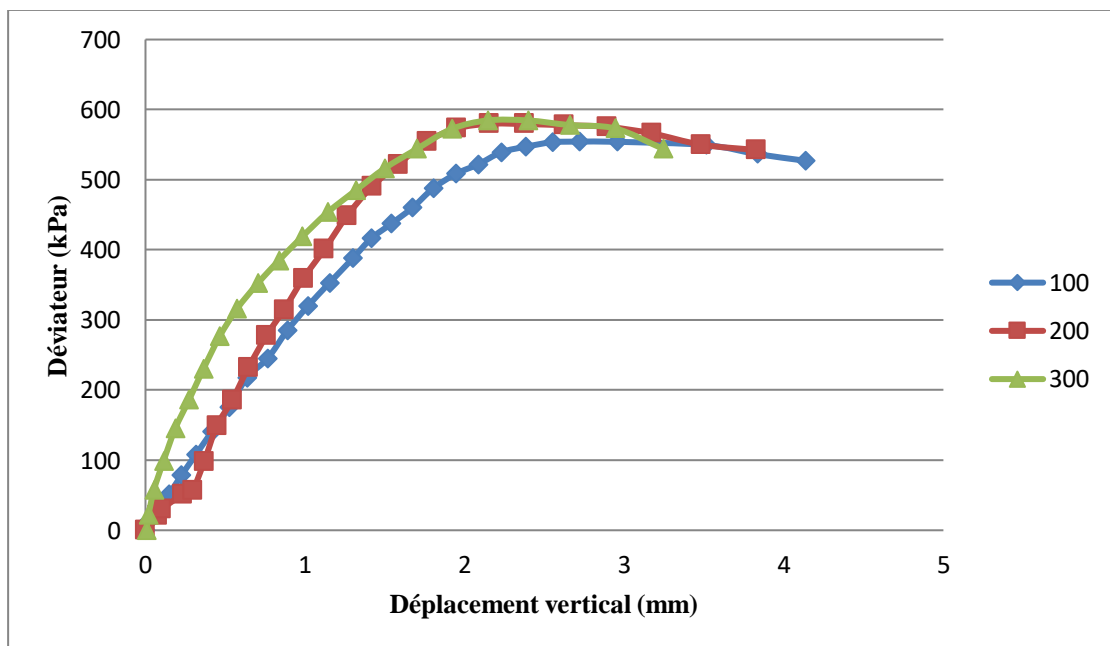


Figure 4.34 Relation déviateur-déplacement vertical du sol témoins.

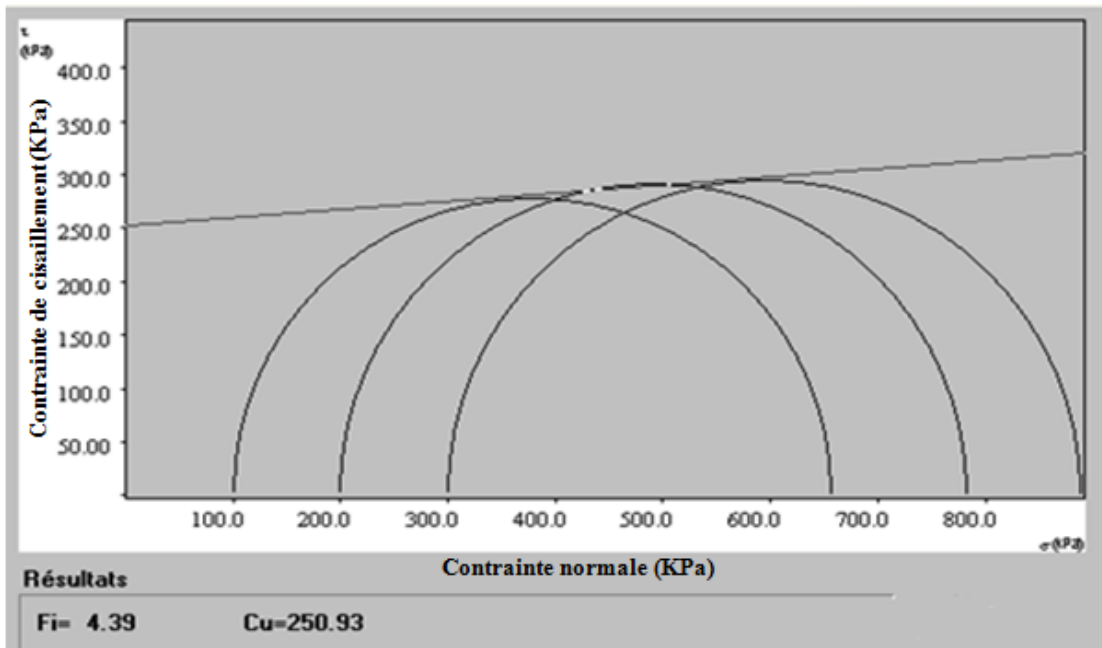


Figure 4.35 Détermination des paramètres de cisaillement de l'échantillon témoin.

La figure 4.35 présente les résultats des trois essais. D'après les cercles de Mohr montrés à cette figure, nous avons déterminé une cohésion $c = 250.93$ kPa et un angle de frottement interne $\varphi = 4,39^\circ$.

7.4.2 Echantillon 02 : 99% sol traité par 1% Caséine à 7 jours de cure

Les relations déviateur-déformation verticale sont rapportées à la figure 4.36

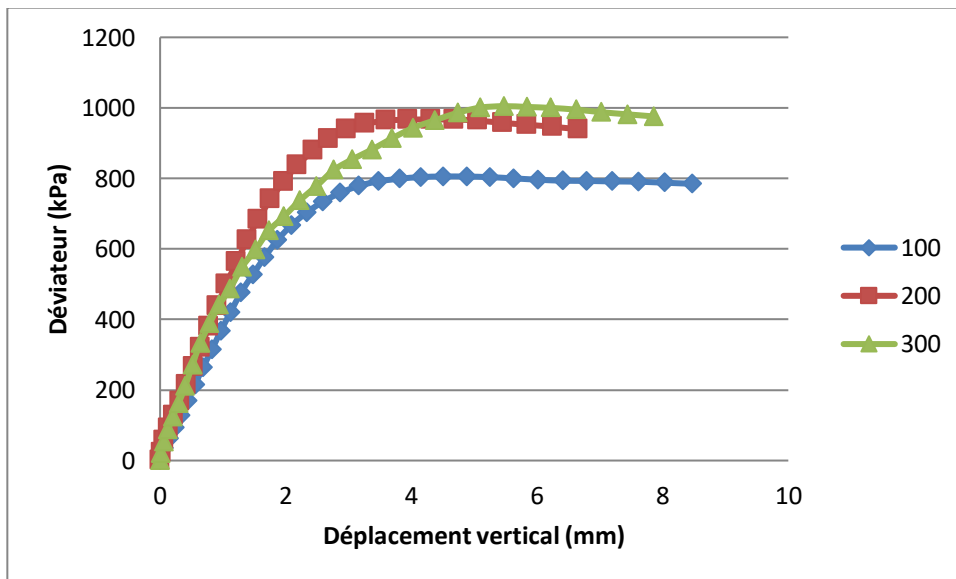


Figure 4.36 Relation déviateur-déplacement vertical du 99% sol traite par 1% Caséine à 7 jours.

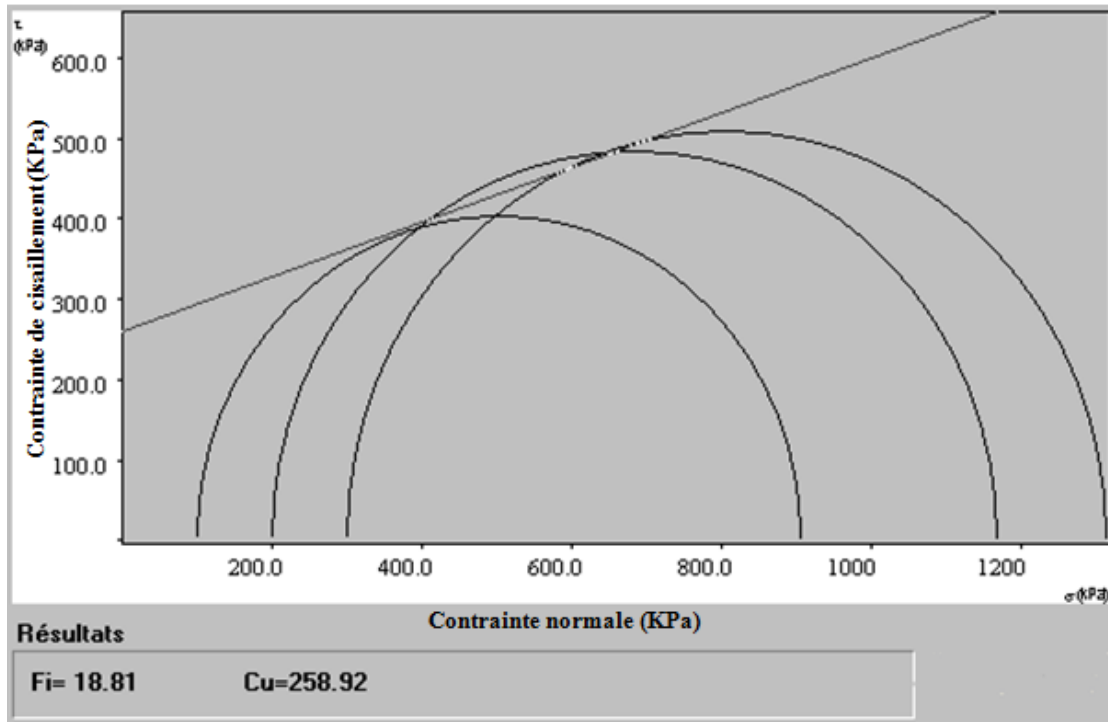


Figure 4.37 Détermination des paramètres de cisaillement du 99% sol traite par 1% Caséine à 7jours.

La figure 4.37 présente les résultats des trois essais. D’après les cercles de Mohr montrés à cette figure, nous avons déterminé une cohésion $c = 258.92$ kPa et un angle de frottement interne $\varphi = 18,81^\circ$.

7.4.3 Echantillon 03 : 99% sol traite par 1% Caséine à 14 jours de cure

Les relations déviateur-déformation verticale sont rapportées à la figure 4.38

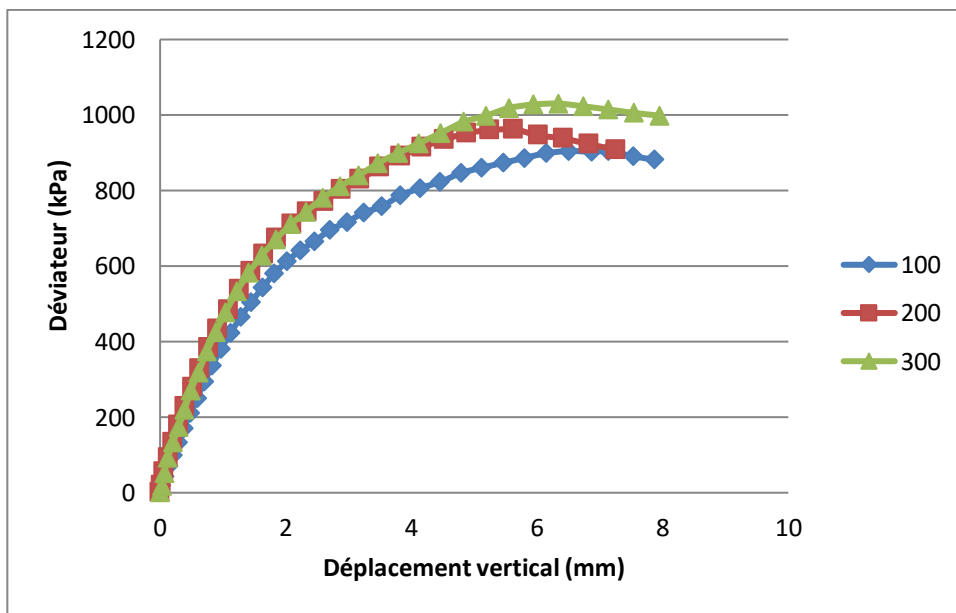


Figure 4.38 Relation déviateur-déplacement vertical du 99% sol traite par 1% Caséine à 14jours.

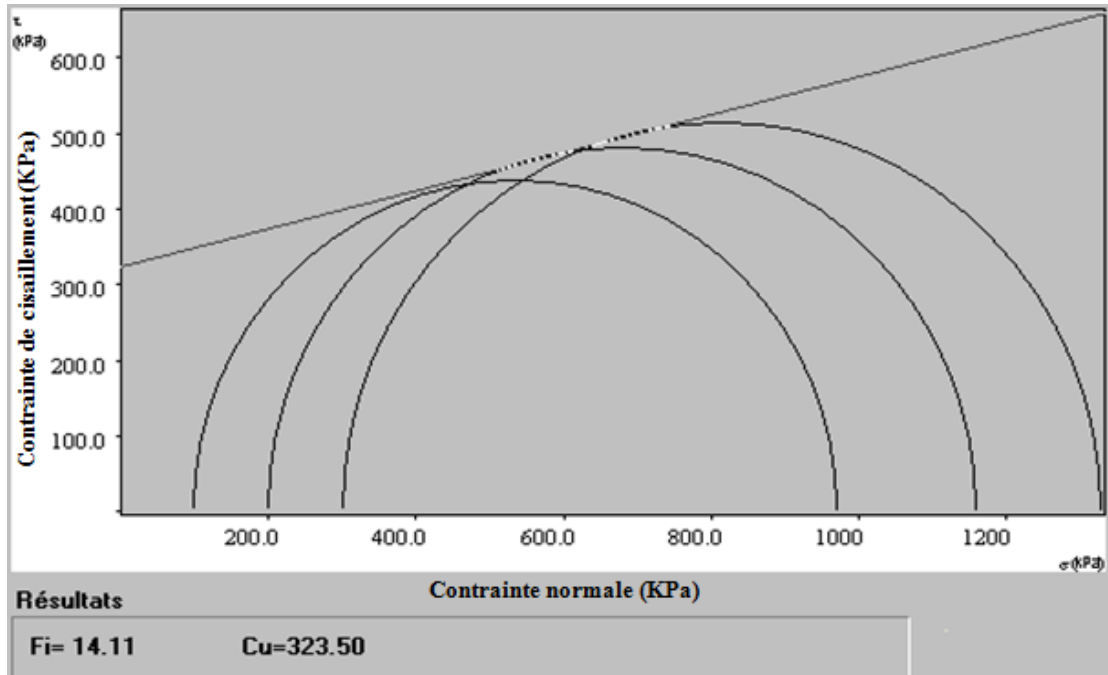


Figure 4.39 Détermination des paramètres de cisaillement du 99% sol traite par 1% Caséine à 14jours.

La figure 4.39 présente les résultats des trois essais. D’après les cercles de Mohr montrés à cette figure, nous avons déterminé une cohésion $c = 323.50$ kPa et un angle de frottement interne $\phi = 14,11^\circ$.

7.4.4 Echantillon 04 : 98% sol traite par 2% Caséine à 7 jours de cure

Les relations déviateur-déformation verticale sont rapportées à la figure 4.40

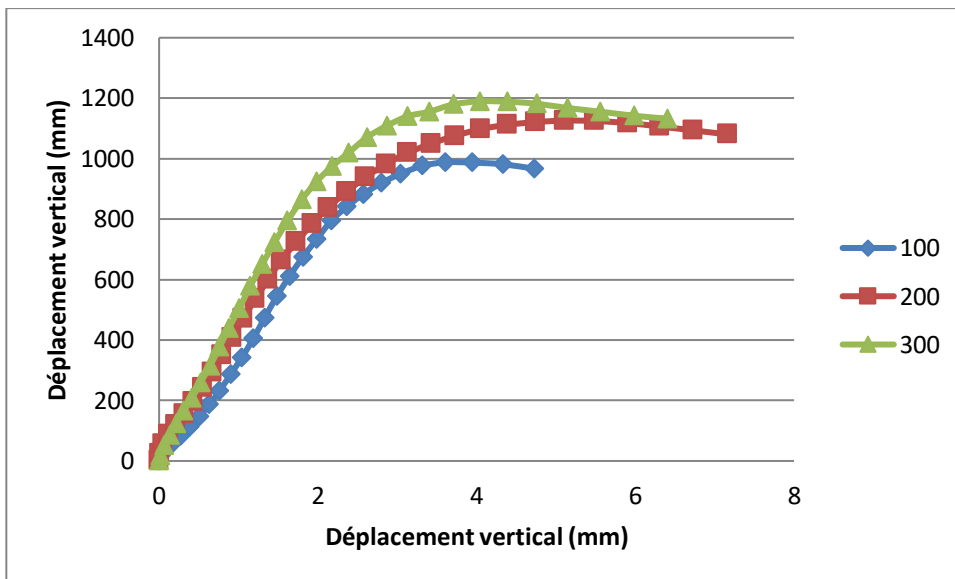


Figure 4.40 Relation déviateur-déplacement vertical du 98% sol traite par 2% Caséine à 7 jours.

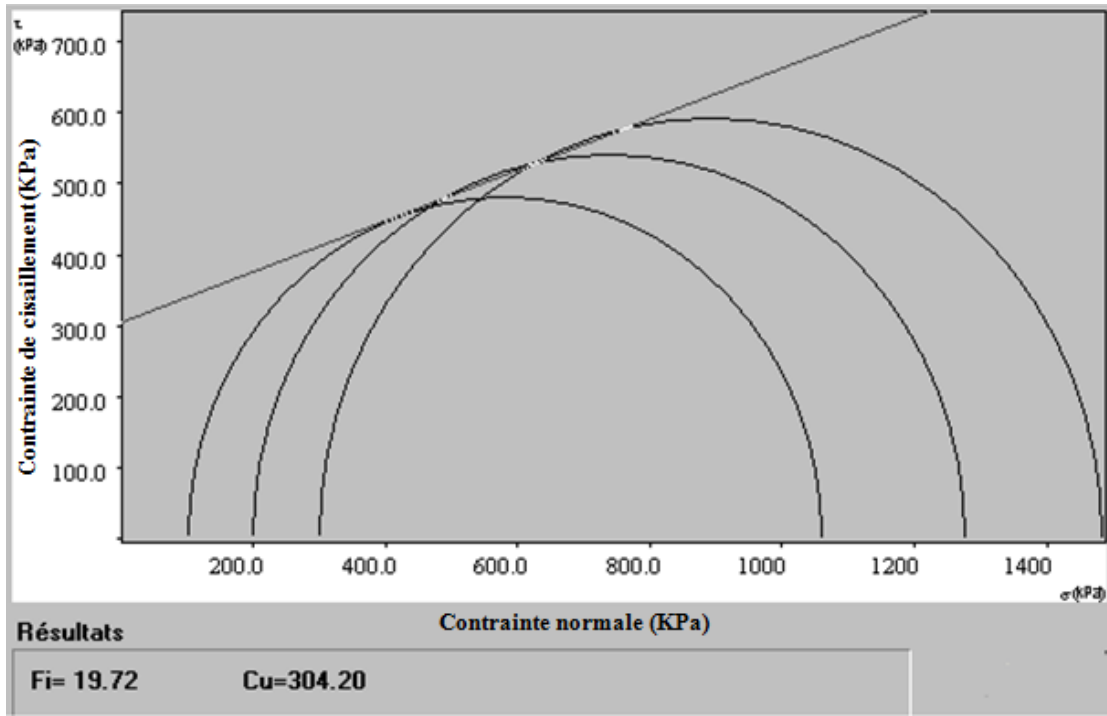


Figure 4.41 Détermination des paramètres de cisaillement du 98% sol traite par 2% Caséine à 7jours.

La figure 4.41 présente les résultats des trois essais. D’après les cercles de Mohr montrés à cette figure, nous avons déterminé une cohésion $c = 304.20$ kPa et un angle de frottement interne $\phi = 19,72^\circ$.

7.4.5 Echantillon 05 : 98% sol traite par 2% Caséine à 14 jours de cure

Les relations déviateur-déformation verticale sont rapportées à la figure 4.42

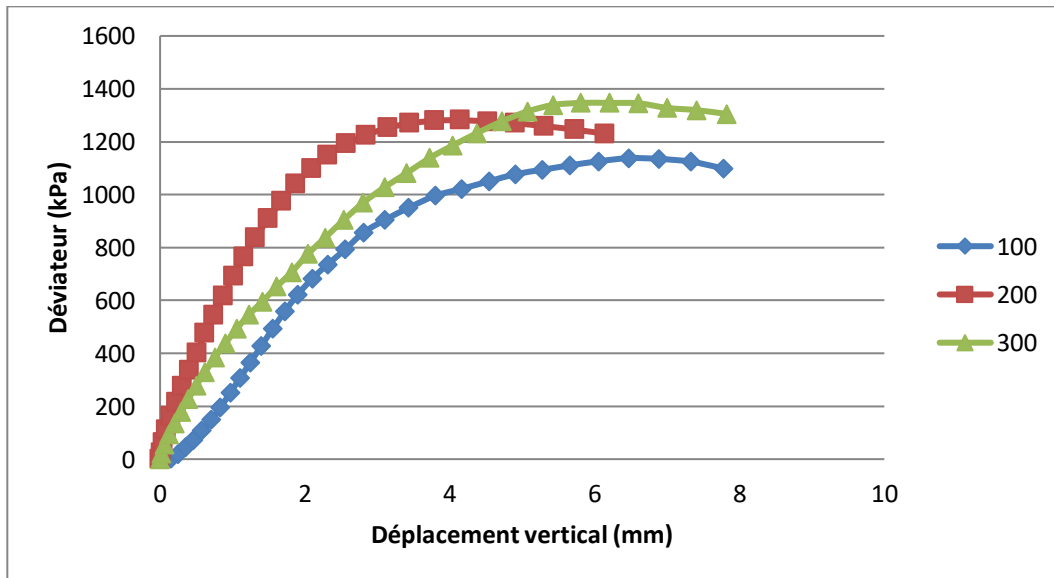


Figure 4.42 Relation déviateur-déplacement vertical du 98% sol traite par 2% Caséine à 14 jours.

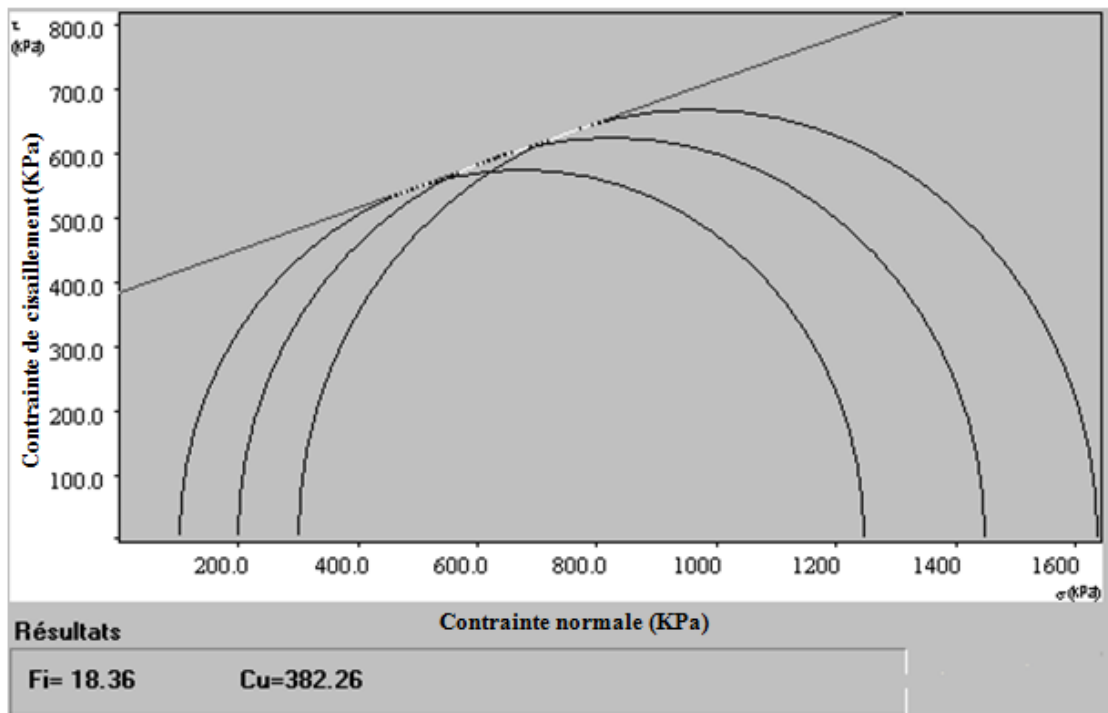


Figure 4.43 Détermination des paramètres de cisaillement du 98% sol traité par 2% Caséine à 14 jours.

La figure 4.43 présente les résultats des trois essais. D'après les cercles de Mohr montrés à cette figure, nous avons déterminé une cohésion $c = 382.26$ kPa et un angle de frottement interne $\varphi = 18,36^\circ$.

7.5 Analyse des résultats des essais triaxiaux réalisés sur des échantillons témoins et des échantillons du sol traité à la Caséine

Nous procédons à l'analyse des résultats d'essais triaxiaux réalisés sur différents échantillons. Nous avons rassemblé les résultats obtenus sur différents échantillons afin d'étudier l'effet de l'ajout de 1% de Caséine après 7 et 14 jours de cure d'une part, et de 2% de Caséine après 7 et 14 jours d'une autre part, sur les paramètres de cisaillement (tableau 4.17). Pour cela, Pour mieux illustrer les résultats un histogramme est présenté à la figure 4.44.

Tableau 4.17 Résultats finaux des essais triaxiaux traité par différents dosages de Caséine

	sol témoins	Sol+ Caséine			
Dosage (%)	0	1		2	
Nombres des jours	0	7	14	7	14
C_u (kPa)	250.93	258.92	323.50	304.20	382.26
Φ (°)	4.39	18.81	14.11	19.72	18.36

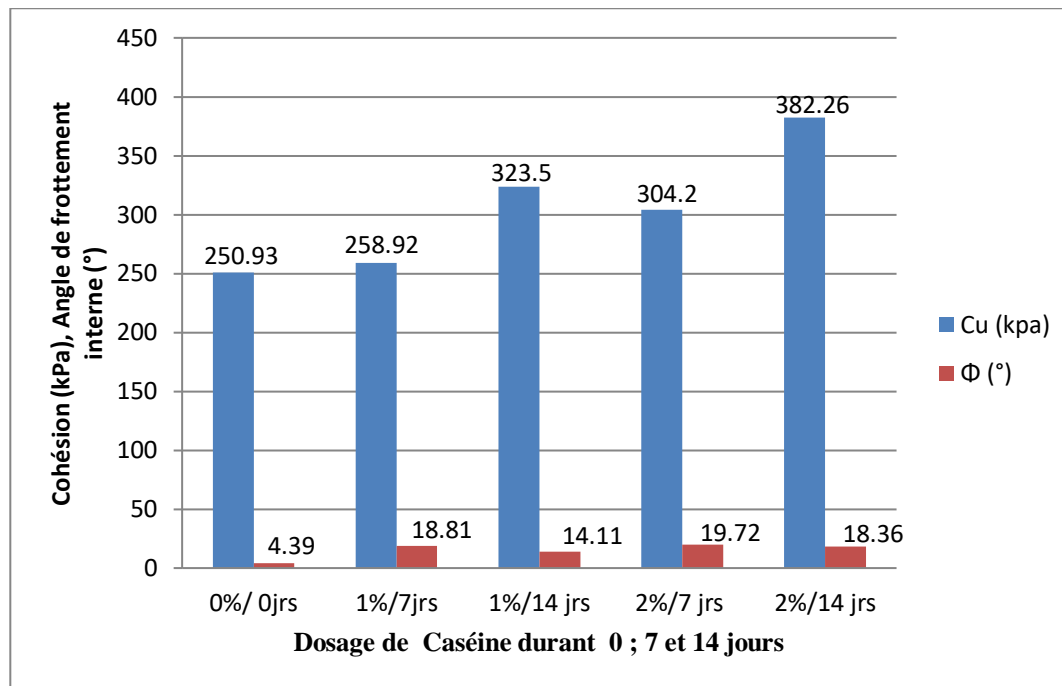


Figure 4.44 Histogramme des résultats finaux des essais triaxiaux traités par différents dosages de Caséine.

Les résultats indiquent qu'avec l'ajout de 1% de caséine, la cohésion augmente pour 7 et 14 jours de temps de cure de 250.93 kPa pour le sol témoins jusqu'à 323.5 kPa. Concernant l'angle de frottement interne, nous pouvons noter qu'il y a une augmentation de 4.39° pour le sol témoins jusqu'à 18.81° à 7 jours ; suivie d'une diminution marquée par 14.11°.

Prenons maintenant le traitement avec 2% de caséine, la cohésion a clairement augmenté de 250.93 kPa pour le sol témoins jusqu'à 382.26 kPa. Pour l'angle de frottement interne, nous pouvons noter qu'il y a une augmentation de 4.39° pour le sol témoins jusqu'à 19.72° à 7 jours ; suivie d'une légère diminution marquée par 18.36° à 14 jours.

Nous pouvons alors conclure que l'augmentation de la cohésion est due à la création de fortes liaisons entre les particules du sol à cause de l'action du produit de traitement (caséine).

Pour l'angle de frottement interne, sa diminution est peut être due à l'augmentation de la quantité des fines entre les particules du sol, ce qui traduit par la facilité de déplacement relatif entre ces dernières.

IV.8 Essai de compression simple (ISO 17892-7:2017)

Il s'agit de la compression d'une éprouvette cylindrique de sol entre deux plateaux, l'axe de l'éprouvette cylindrique est orthogonal aux plateaux. L'essai consiste à imposer une vitesse constante de déformation longitudinale et à mesurer la force axiale appliquée à l'éprouvette. La résistance à la compression, notée R_C est mesuré à plusieurs âges (0, 7, 14 jours).

8.1. Mode opératoire et procédure d'essai

Les éprouvettes soumises aux essais de compression sont de forme cylindrique. Elles ont été confectionnées dans un moule en PVC (Figure 4.45 (a)), spécialement conçu pour ce type

d'essais. Le moule a les dimensions suivantes: H=15cm et Ø= 7,5cm. Au total, 18 éprouvettes ont été confectionnées pour des différents dosages et différents temps de cure.

La technique de fabrication se déroule selon les étapes suivantes :

1. En premier lieu, le sol est mis à l'étuve pour séchage pendant une période de 24 heures sous une température de 105°C;
2. Mélanger le sol à sec avec le produit de traitement;
3. Ajouter une quantité d'eau et malaxer jusqu'à l'obtention d'un mélange parfaitement homogène et laisser le mélange dans un sac plastique fermé pendant 24 heures ;
4. Compacter le mélange selon le mode de compactage statique à l'aide de la presse UNIFRAME (Figure 4.45(b)) ;
5. Réaliser le compactage en deux couches, la première couche 2/3 de la masse totale (de chaque mélange), et la 2^{ème} couche 1/3 de la masse totale;
6. Après le démoulage, sceller les éprouvettes immédiatement à l'aide d'un papier film (Figure 4.45 (c, d)) afin de prévenir l'évaporation de l'eau contenu dans les mélanges;
7. À l'échéance des temps de cure (7, 14 jours), réaliser les essais de compression simple selon la norme NF P94-077;
8. Prendre les dimensions de l'échantillon à l'aide d'un pied à coulisse (la hauteur et le diamètre sont pris quatre fois selon deux directions). Pour les calculs de la section nous utiliser les valeurs moyennes ;
9. Placer l'éprouvette du sol sur le plateau d'une presse à chargement axial. Après la mise en contact des deux plateaux de la presse avec l'éprouvette (Figure 4.45 (e, f)), le chargement axial est appliqué avec une vitesse de déplacement constante de 1,00 mm/min ;
10. A la fin de l'essai, l'échantillon est enlevé (Figure 4.45 (g)) ;
11. La force maximale (F_{max}) à la rupture est affichée par la machine. La résistance à la compression simple R_c (la contrainte à la rupture résultant du rapport entre la force de rupture F_{max} et la section transversale de l'éprouvette (A)) s'écrit : $R_c = \frac{F_{max}}{A}$.

Où :

R_c (kPa): Résistance à la compression simple,

F (kN): Force maximale de compression,

A (m²) : Aire de la section transversale de l'éprouvette.



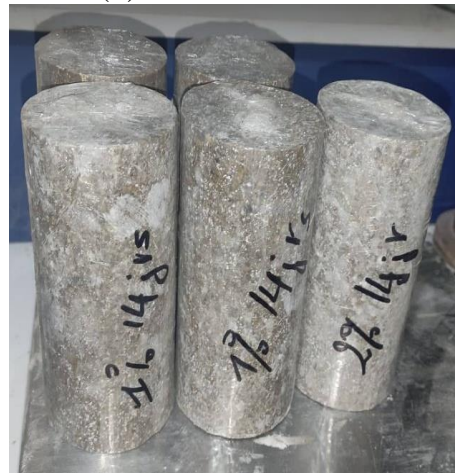
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Figure 4.45 Diverses procédures de l'essai de compression simple.

Les quantités de chaque composant du mélange sont synthétisées dans le tableau 4.18 :

Tableau 4.18 Quantités de chaque composant des mélanges sol – liant.

Dosage (%)	w %	ρ_d (kg/m ³)	Masse sol (g)	Masse de la caséine (g)	Masse de l'eau (g)
0	15.2	1880	1300	0	197.6
1	15.2	1880	1287	13	197.6
2	15.2	1880	1274	26	197.6
4	15.2	1880	1248	52	197.6

8.2 Résultats des essais de compression

Le tableau 4.19 et la figure 4.46 synthétisent les résultats des essais de compression simple du sol naturel et de sol traité avec 1 % ; 2% ; 4% respectivement de Caséine, après 0 ; 7 ; 14 jours.

Notons bien que nous avons pris la moyenne de trois résistances de compression pour chaque dosage.

Tableau 4.19 Résultats finaux de la résistance à la compression simple.

	sol témoin	Sol+ Caséine					
Dosage (%)	0	1		2		4	
Nombres de jours	0	7	14	7	14	7	14
Résistance à la compression (MPa)	0.7	1.1	1.2	1.2	1.3	1.59	1.71

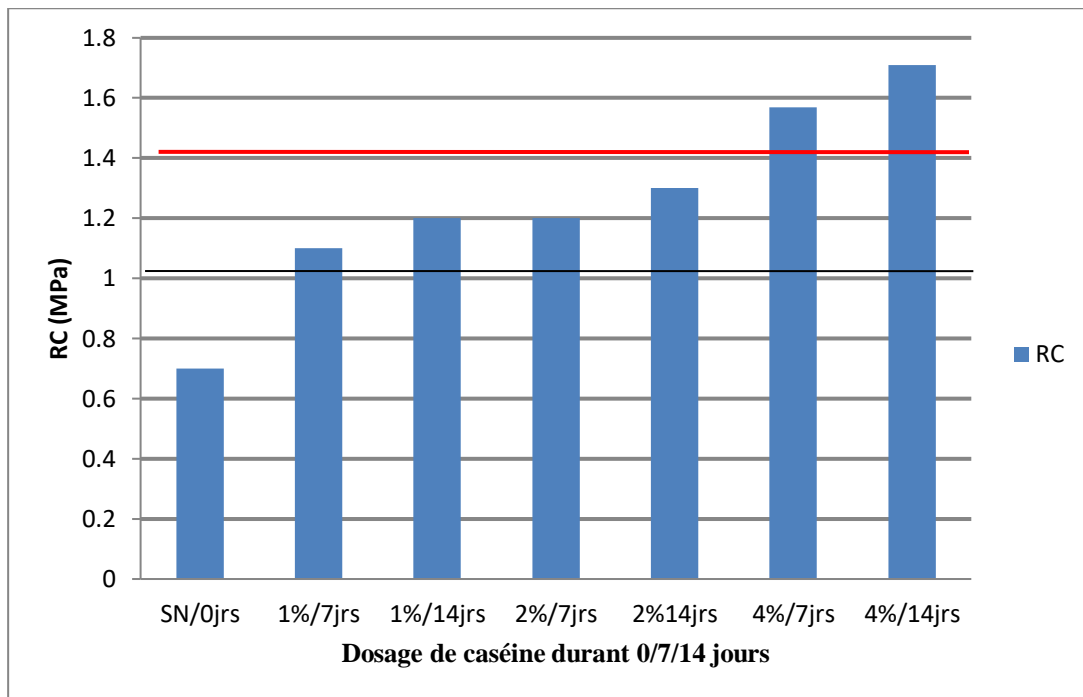


Figure 4.46 Histogramme des résultats finaux de la résistance à la compression simple.

Les figures 4.47 et 4.48 présentent les résultats des essais de compression simple traités par logiciel MiniTab18 en utilisant la méthode du plan d'expérience.

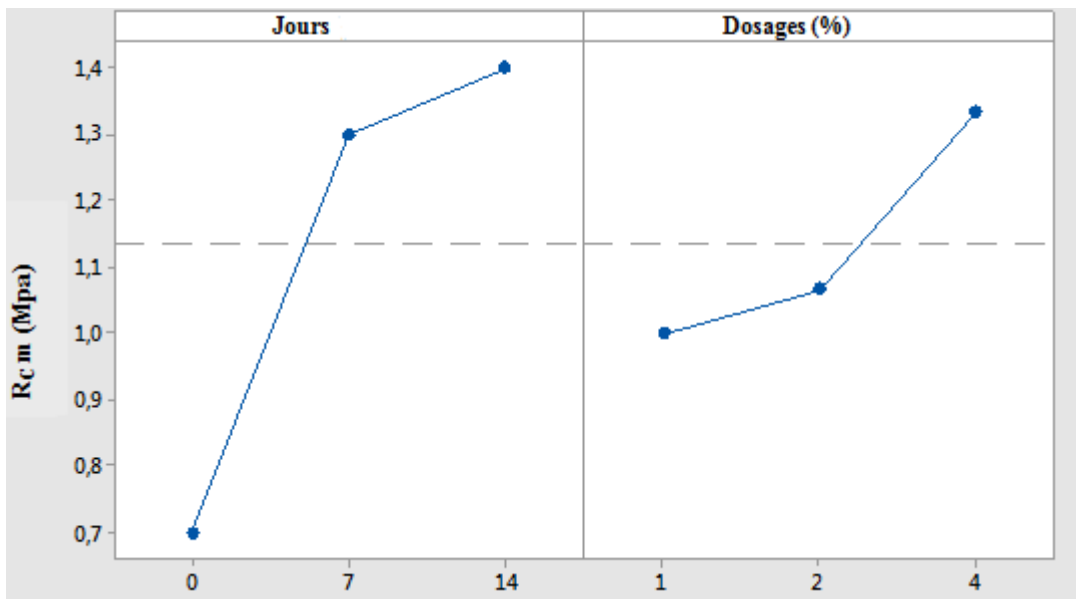


Figure 4.47 Courbes des effets du dosage et le temps sur la résistance moyenne à la compression simple.

La figure 4.47 montre les facteurs principaux qui influent sur la résistance à la compression simple moyenne; à savoir le temps et le dosage du liant; il est à noter que pour le facteur temps, la résistance moyenne augmente en fonction du temps pour les jours de 0 à 7; après le 7^{ème} jour, l'influence du temps de cure diminue. Quant à l'influence du dosage du liant, la résistance à la compression moyenne augmente avec l'augmentation du dosage.

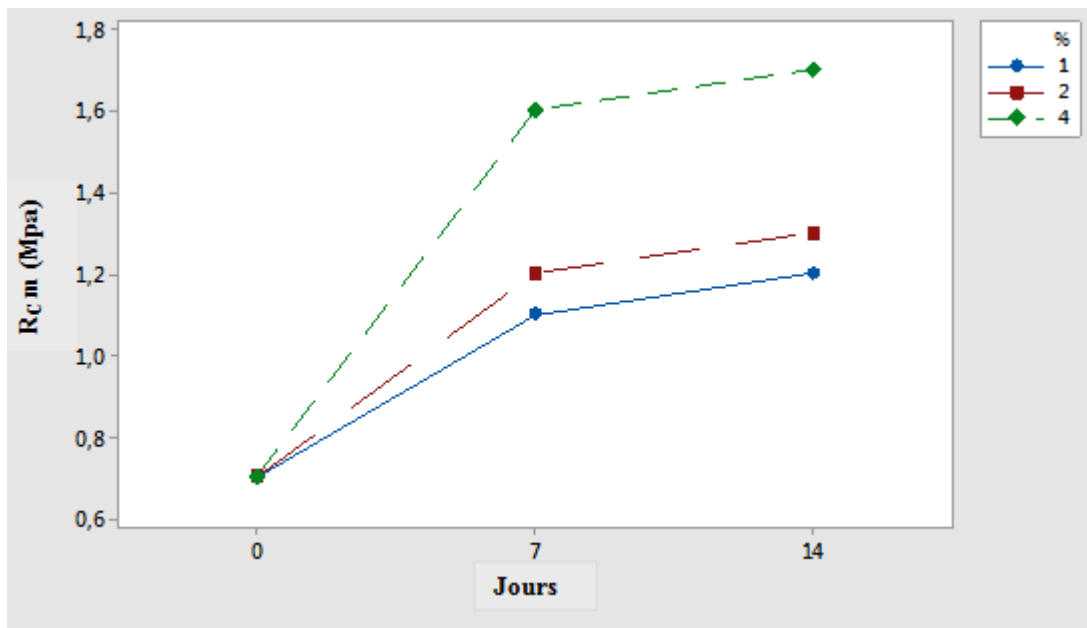


Figure 4.48 Courbes des interactions de la résistance moyenne à la compression en fonction de temps pour différents dosages.

D'après la figure 4.48, pour les trois dosages (1%, 2% et 4 %), il est nettement clair que la résistance à la compression augmente en augmentant le temps de cure (de 0 à 14 jours).

8.3 Prévision pour la résistance à la compression simple

Nous avons utilisé le logiciel MiniTab18 afin de prédire la valeur de la résistance à la compression pour un dosage de 3% en liant, et un temps de cure de 7 jours et 14 jours respectivement. Nous avons obtenu que pour 7 jours, la valeur de la résistance à la compression est égale à 1.2 MPa. Par contre, pour 14 jours cette résistance est égale à 1.61 MPa. Cette dernière résistance vérifie le seuil minimal recommandé par la Norme [NF-XP-P13-901, 2001] de construction en BTC qui est 1.6MPa.

IV.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des essais réalisés au laboratoire sur le sol de gisement de Kaolin de Bendjerrah afin d'évaluer l'efficacité de l'ajout du produit de traitement (la caséine) sur les propriétés mécaniques du sol traité, à savoir les paramètres de cisaillement et la résistance à la compression simple.

À partir des résultats d'identification, ce sol a montré qu'en termes de granulométrie, et de masse volumique sèche maximale et de plasticité, il répond aux normes et recommandations concernant son aptitude à être utilisé comme matériau de construction des BTC.

Les résultats ont clairement montré que l'ajout de produits de traitement au sol a amélioré la cohésion du sol tout en réduisant l'angle de frottement et augmentant la résistance à la compression.

Conclusion
Générale

Conclusion Générale et Perspective

La présente étude a pour objectif de proposer un matériau à base de terre crue stabilisée comme alternative écologique. Le but est de remplacer les liants minéraux (ciment et chaux) par d'autres liants organiques qui sont moins nocifs à l'environnement.

Dans la partie de l'état de l'art, nous avons exposé les différents types d'argiles et leurs propriétés. En outre, nous avons rappelé l'intérêt du matériau de terre crue pour les constructions contemporaines grâce à son faible impact environnemental, à son accessibilité pour des populations aux revenus modestes et à sa capacité à assurer passivement un confort naturel dans l'habitat. La plupart des stabilisations de la terre crue sont faites à base de liants minéraux en l'occurrence le ciment et la chaux. Mais les quantités de liants utilisées sont souvent très élevées pour des gains en résistances mécaniques relativement faibles, ce qui pose la question de la pertinence écologique de ces solutions. En plus, la résistance mécanique, la résistance à l'eau qui est un paramètre crucial n'est pas toujours évalué et quand c'est le cas, les méthodes ne font pas consensus. Pour tout cela, nous rejoignons les conclusions de (Van Damme et al., 2017) qui suggèrent que la quantité de liants minéraux soit réduite au strict nécessaire pour une amélioration de la tenue à l'eau de briques de terre crue. Nous proposons l'utilisation de liants alternatifs naturels de type organique pour stabiliser la terre crue.

En vue de l'utilisation du sols de Bendjerrah comme matériau dans les constructions en terre crue dans le domaine de Génie Civil, et plus particulièrement en matériaux de construction par l'élaboration de BTC (Blocs de Terre Crue Comprimée). Après avoir fait un état de l'art, nous avons décidé de nous intéresser aux caractéristiques suivantes :

- Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à l'identification du sol de BenDjerrah et le positionnement de ses propriétés par rapport aux normes et recommandations de BTC (granulométrie, plasticité, compactage).
- Ensuite, les résistances mécaniques que nous avons limitées dans un premier temps à la résistance en compression UCS et sa comparaison avec la norme française [NF-XP-P13-901(2001)].

-Dans un second temps, nous avons conduit des essais triaxiaux non consolidés non drainés sur ce sol non traité. Ensuite, nous avons procédé à son traitement pour étudier le changement des paramètres mécaniques du sol traité avec la caséine en différents pourcentages (1%,2% et 4%). Les résultats du sol traité par la caséine indiquent que la cohésion et l'angle de frottement interne augmentent avec l'augmentation de la teneur en liant.

CONCLUSION GENERALE

- Les résultats obtenus sur le sol de Bendjerrah montrent que leurs propriétés en termes de granulométrie, densité, plasticité vérifient les normes et les recommandations concernant son aptitude à être utilisé comme matière première pour les BTC.

- L'ajout d'un pourcentage de 4% de caséine comme bio-liant est nécessaire pour vérifier les recommandations et normes vis à vis de la résistance mécanique et la consistance du matériau, La résistance à la compression simple dans ces conditions est de l'ordre de 1.7 MPa.

- Finalement, nous avons utilisé le logiciel **MinTtab18** dans l'interprétation des résultats de compression simple, ce logiciel nous a permis de prédire la résistance à la compression simple de l'ordre 1.6 MPa à une teneur en caséine de 3% et au temps de cure de 14 jours. Cette dernière valeur est acceptable vis-à-vis des normes en vigueur...

Afin de mieux utiliser notre matériau dans la fabrication des biques en terre compressée, il serait intéressant de réaliser des essais de durabilité à la tenue d'eau.

*Références
bibliographiques*

Références Bibliographiques

- [1] **Benayache Zinedine, Yahamdi Abd Raouf**, Amélioration des argiles gonflantes, Mémoire de Master. Université 08 mai 1945. (2019).
- [2] **Benmessaoud Ahmed**, Types de solutions de construction sur sols gonflants, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla. (2017)
- [3] **Jean- Pierre Magnan**, Cours de mécanique des sols et des roches. Ecole nationale des ponts et chaussées, (1999-2000).
- [4] **Guefaifia Lamia & Benrdjem Hiba**, Traitement et renforcement d'un sol fin par différentes techniques d'amélioration étude expérimentale et numérique, Mémoire de Master. Université 8 Mai 1945 de Guelma. 2020
- [5] **Boumzaout Nada & Benamara Meryem & Noureddine Khaoula** .Amélioration d'un sol argileux par le laitier de haut fourneau activé par la poudre de dolomie. Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 de Guelma. 2019
- [6] **Benayache Zinedine Yahamdi Abd Raouf**, Amélioration des argiles gonflantes, Mémoire de Master Université 8 Mai 1945 de Guelma. 2019
- [7] **Mouaziz Soumia**, Préparation et Caractérisation des bentonites modifiées par des sels de Bis-imidazolium – Application à l'adsorption du bleu TELON, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen 2012.
- [8] **Guenoun Narimane Gada Sadia**, Activation de la Bentonite de MAGHNIA pour usage pharmaceutique, Mémoire de Master, Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2017
- [9] **SERBAH Boumediene**. Cartographie des sédiments de dragage des barrages de l'ouest Algérien : Une solution de valorisation en BTC. THÈSE Doctorat. Université ABOUBAKR BELKAÏD-Tlemcen. 2018
- [10] **Jehanne Paulus**. Construction en terre crue: dispositions qualitatives, constructives et architecturales – Application à un cas pratique : Ouagadougou. Mémoire de Master. Université de Liège. 2015.
- [11] **Anger & Fontaine**, Principes techniques généraux de conception architecturale en terre crue en Île-de-France 2009 : p. 9).
- [12] **Anger & Fontaine**, Bâtir en terre du grain de sable à l'architecture, 2009

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[13] **Antoine Carnaval**, Architectures contemporaines en terre crue en France de 1976 à 2015 : pourquoi et comment les acteurs construisent avec ce matériau aujourd'hui ?

[14] **Anger 2011** Conception architecturale en terre crue en Île-de-France 2009 : p. 25).

[15] <http://craterre.org/>

[16] **Benouali**, 2015 Programme de construction en Terre, en Algérie depuis 1970

[17] **Anger 2011**, Principes techniques généraux de conception architecturale en terre crue en Île-de-France 2009 : p. 26

[18] Caractérisation expérimentale et modélisation numérique des résistances mécaniques du pisé

[19] **Van-Damme and Houben**,(2017) Earth Concrete. Stabilisation revisitée. Recherche sur le ciment et le béton, 114, 90-102.

[20] **Boubekeur & Houben, 1998**, Blocs de terre comprimée: une alternative de construction durable.

[21] <https://www.pinterest.com/pin/513551163735452583/>

[22] **Kouka Amed Jeremy Ouedraogo**, Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux. THÈSE Doctorat. L'Université Toulouse 3 Paul Sabatier.2019

[23] **Boumzaout Nada & Benamara Meryem & Noureddine Khaoula**. Amélioration d'un sol argileux par le laitier de haut fourneau activé par la poudre de dolomie. Mémoire master. Université 08 mai 1945.2019

[24] **Boukemmoum Nour El Houda.Nouaouria Abdessalam**. Valorisation des sédiments de barrages Cas du barrage d'Ain Dalia (Souk Ahras). Mémoire master. Université 08 mai 1945.2019

[25] **Bouhemame Nesrine**. Etude expérimentale du comportement des sédiments de barrage traités avec du Ciment et Métakaolin. Mémoire master. Université 08 mai 1945.2021.

[26] **Hamlaoui Asma**. Comportement D'une Marne Stabilisée Par Différents Agents De Traitement. Mémoire master. Université 08 mai 1945.2021

[30] **Aurélié Vissac, Ann Bourgès, David Gandreau, Romain Anger, Laetitia Fontaine**. Argiles & Bio polymères - Les Stabilisants Naturels Pour La

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Construction En Terre. CRA terre éditions.2018

[33] **A.E. Losini, A.C. Grillet, M. Bellotto, M. Woloszyn, G. Dotelli.** Natural additives and biopolymers for raw earth construction stabilization. Review. Construction and Building Materials.2021

[35] **Ilhan Chang, Jooyoung Im, Moon-Kyung Chung c, Gye-Chun Cho.** Bovine casein as a new soil strengthening binder from diary wastes. Article. Construction and Building Materials.2018

[38] **Actes du colloque.** Sciences des matériaux du patrimoine culturel. Appels à projets. (PNRCC).2008-2011. Paris, Institut national d’histoire de l’art.

[40] **Hadi Fatehi, Sayyed Mahdi Abtahi, Hamid Hashemolhosseini, Sayyed Mahdi Hejazi.** A novel study on using protein based biopolymers in soil strengthening. Article. Construction and Building Materials.2018

[41] **Ilhan Changa, et al.** Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices. Review. Transportation Geotechnics.2020

Neto graphique

[27] <https://www.oqai.fr/fr/pollutions/les-fibres-minerales-artificielles/>

[28] https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_textile#Fibres_chimiques/

[29] <https://www.theses-algerie.com/2430937793013176/>

[31] <https://fr.wikipedia.org/Amidon/wiki/Amidon/>

[32] https://fr.wikipedia.org/wiki/Farine_de_bl%C3%A9/

[34] https://fr.wikipedia.org/wiki/Huile_de_lin

[36] <https://tpe-colles.jimdofree.com/la-fabrication-d-une-colle/>

[37] <https://www.hl-process.com/fr/caseines-et-caseinates/>

[39] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Albumine>

Normes

- **NF P18-560**, Norme française, Analyse granulométrique par tamisage.
- **NF P94-057**, Norme française, Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation.
- **NF P 94-068**, Norme française, Valeur au bleu de méthylène.
- **NF P 94-051**, Norme française, limite de plasticité
- **NF P 94-052-1**, Norme française, limite de liquidité
- **BS 1377**, Normes anglaises BSI ,limite de retrait
- **NF P11-300**, Norme française, Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières
- **La classification AASHTO.**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **NF P 94-093**, Norme française, paramètres optimaux de compactage (Proctor).
- **Norme-NF-XP-P13-901, 2001**, Norme française, Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons.
- **NF P94-074**, Norme française, Essais à l'appareil triaxial de révolution
- **NF P94-077**, Norme française, Essai de compression uni axiale.

Annexes

Annexes

A.1 Valeurs de déviateur ($q = \sigma_1 - \sigma_3$) en fonction du déplacement vertical pour chaque contrainte de confinement (σ_3).

Echantillon 01 : sol naturel (témoin)

$\sigma_3 = 100$ (kPa)		$\sigma_3 = 200$ (kPa)		$\sigma_3 = 300$ (kPa)	
DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)
0	0	0	0	0	0
0,0201	12,430574	0,075	21,208327	0,019	21,8305198
0,071	31,5119799	0,0997	29,7290266	0,053	57,583272
0,1453	51,1568589	0,2301	50,9124073	0,1134	99,0231022
0,2248	78,3179211	0,2938	56,7963401	0,1866	145,215772
0,316	108,12	0,368	98,0414815	0,2725	185,821634
0,4157	140,549753	0,4465	148,566458	0,3638	230,548939
0,525	175,586391	0,543	185,350493	0,4656	276,934927
0,6353	217,741232	0,6438	231,662782	0,5727	315,680719
0,7647	244,944222	0,7583	277,782467	0,7053	352,561684
0,8877	284,686633	0,8676	314,46393	0,8358	384,882497
1,0171	319,754426	0,9885	359,068903	0,9821	418,785529
1,1529	352,854088	1,12	400,456475	1,1423	453,64197
1,3003	388,189857	1,2632	448,512721	1,3184	485,017929
1,4138	416,055366	1,4191	490,34363	1,4987	516,18585
1,54	437,209726	1,5835	521,815226	1,7013	544,067455
1,6737	460,313546	1,7639	554,505353	1,9187	572,431562
1,8031	487,801744	1,9505	573,07082	2,1457	584,654167
1,9463	508,564971	2,1542	579,882833	2,3971	584,57701
2,0842	521,89783	2,3759	579,457478	2,658	577,977578
2,2295	539,232362	2,6219	577,785276	2,9454	573,076481
2,3822	547,025424	2,8913	575,536755	3,2435	544,086655
2,5487	553,501193	3,1745	566,091006		
2,7195	554,356813	3,4832	549,976283		
2,955	554,083922	3,8279	542,421265		
3,5118	549,549106				
3,8332	536,603667				
4,1344	527,126138				

Echantillon 02 : 99% sol traité par 1% Caséine à 7 jours de cure

$\sigma_3 = 100$ (kPa)		$\sigma_3 = 200$ (kPa)		$\sigma_3 = 300$ (kPa)	
DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)
0	0	0	0	0	0
0,0053	4,85221892	0,0159	22,134698	0,0148	19,709565
0,0572	34,5480525	0,0593	56,6691525	0,0572	52,4278835
0,1389	62,9676001	0,1325	91,1283254	0,1251	86,8990518

ANNEXES

0,2344	93,7223918	0,2174	127,007783	0,2015	123,103082
0,3288	127,128389	0,3118	167,932535	0,2927	161,632591
0,4359	169,165245	0,4147	214,151334	0,4009	211,19924
0,5568	214,956746	0,5271	265,640368	0,5154	271,768734
0,6788	263,000194	0,6438	319,65879	0,6406	333,313024
0,8252	314,685006	0,7785	379,720897	0,7901	388,502453
0,9673	367,989669	0,9111	437,783342	0,9429	441,95241
1,1221	420,714684	1,0521	499,470045	1,1137	487,268395
1,2887	476,724046	1,2176	562,829016	1,3056	548,655086
1,4743	526,394396	1,3852	624,690301	1,5146	597,082793
1,6599	575,518172	1,5613	683,814434	1,7299	651,414547
1,8667	624,796526	1,7575	740,374769	1,9717	691,855037
2,0895	667,16181	1,9664	790,287892	2,2231	737,572111
2,3313	702,905938	2,1839	837,754151	2,4872	777,776752
2,5901	733,834948	2,4331	878,357237	2,7672	823,979464
2,8659	758,801079	2,6835	912,543042	3,0621	854,428941
3,1639	778,958527	2,9666	939,017805	3,3697	881,585408
3,479	791,795291	3,2668	954,568395	3,6932	913,818882
3,8141	799,083775	3,5967	963,848349	4,0294	943,47424
4,1482	803,705702	3,9435	966,672762	4,3699	964,526258
4,5036	805,429544	4,3116	966,891722	4,7369	986,127043
4,878	805,189439	4,6786	966,824371	5,0986	1000,70156
5,2471	803,547509	5,0572	963,667687	5,4698	1004,79184
5,63	800,048046	5,4539	957,378615	5,8453	1002,5356
6,0097	796,283405	5,8442	952,081868	6,2218	999,908069
6,4096	793,40517	6,2515	946,311625	6,627	994,906572
6,7925	792,902227	6,6567	939,446267	7,0248	987,60091
7,1924	791,34648			7,4427	981,617333
7,6113	790,615397			7,8638	975,587937
8,0356	787,610746				
8,4683	784,751201				
0,0053	4,85221892				
0,0572	34,5480525				

Echantillon 03 : 99% sol traite par 1% Caséine à 14 jours de cure

$\sigma_3 = 100$ (kPa)		$\sigma_3 = 200$ (kPa)		$\sigma_3 = 300$ (kPa)	
DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)
0,0031	4,24577037	0	0	0	0
0,0222	19,7076455	0,019	19,4052004	0,0275	16,9770999
0,0689	42,7240188	0,0615	54,5466535	0,0668	51,2097998
0,1336	69,6322284	0,1304	92,6450003	0,1251	92,9508023
0,2015	99,5149944	0,2068	133,383861	0,2047	132,78073
0,2831	132,942093	0,2959	178,842416	0,2927	174,018566
0,3733	170,209215	0,3966	227,475142	0,3892	219,961243

ANNEXES

0,4773	210,35487	0,5154	278,03109	0,49	269,687333
0,5876	250,377148	0,6332	328,422392	0,6077	318,604725
0,7074	294,752742	0,7795	383,32047	0,7488	374,466051
0,8305	337,165525	0,9206	433,232809	0,8835	424,757207
0,9683	379,964206	1,0871	484,286204	1,0447	477,985279
1,1179	422,232727	1,2653	537,41797	1,225	533,230846
1,2823	464,54081	1,4467	585,499113	1,4096	582,216049
1,451	503,947918	1,6504	631,372897	1,6164	627,80366
1,627	542,825213	1,8593	673,979774	1,8413	670,589665
1,819	579,907024	2,099	711,613535	2,0799	710,613827
2,0184	612,890824	2,3398	743,678794	2,3239	743,839322
2,2369	642,286048	2,6081	770,553637	2,5944	780,969353
2,4618	666,147693	2,8839	802,695734	2,8648	811,67988
2,7057	695,846818	3,1777	829,424231	3,1618	840,093609
2,972	716,79019	3,5012	861,650896	3,4705	872,703651
3,2445	741,585405	3,8364	890,489982	3,7919	899,417471
3,5256	757,826044	4,1716	915,107018	4,1143	924,428215
3,8269	787,000324	4,5301	935,086086	4,4633	952,311983
4,1429	806,774873	4,8875	952,605835	4,8292	981,546608
4,4558	822,487677	5,2513	959,635551	5,1888	998,442521
4,7868	846,288864	5,6268	962,136145	5,5557	1018,60771
5,1156	860,229207	6,0193	946,132828	5,9418	1027,9007
5,4645	873,509458	6,4223	937,858699	6,3428	1030,26122
5,8029	886,42328	6,8254	922,79353	6,7384	1023,04392
6,1487	898,833794	7,2541	908,300338	7,1404	1014,54934
6,5019	904,771979			7,5456	1005,56101
6,8667	902,589682			7,9518	998,330828
7,1345	903,887654				
7,5367	890,664763				
7,8667	881,628332				

Echantillon 04 : 98% sol traite par 2% Caséine à 7 jours de cure

$\sigma_3 = 100$ (kPa)		$\sigma_3 = 200$ (kPa)		$\sigma_3 = 300$ (kPa)	
DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)
0	0	0,001	0,90977639	0	0
0,0222	16,9782843	0,0063	24,2598936	0,0169	18,4958862
0,0827	35,7485355	0,0466	56,073181	0,0657	51,5136304
0,1707	57,1913618	0,123	87,5071769	0,14	85,6708182
0,2715	83,4073193	0,2121	120,368604	0,2184	122,776673
0,3882	113,149237	0,315	154,937164	0,3086	164,918443
0,508	147,911203	0,4316	196,312646	0,4136	207,524064
0,6332	187,367615	0,5504	242,070093	0,5229	259,927635
0,7615	232,086643	0,6692	292,192671	0,6417	314,255233
0,9026	286,791136	0,7933	349,331038	0,7626	377,697265
1,0426	342,493671	0,9206	407,167929	0,8792	439,764889
1,1858	404,236616	1,0596	470,707866	1,0108	505,131233

ANNEXES

1,329	473,191853	1,2123	535,707773	1,1476	577,990389
1,4828	544,474278	1,3746	600,361101	1,3003	650,736108
1,6429	610,937135	1,54	663,801949	1,4552	722,864171
1,8116	674,663029	1,7288	724,063193	1,6175	794,012301
1,9855	733,291806	1,9261	783,627327	1,7989	864,921854
2,1711	795,358541	2,1287	838,380627	1,9845	924,420823
2,3663	841,382756	2,3642	890,287102	2,1818	975,232091
2,57	882,346004	2,5954	938,169114	2,3896	1019,97517
2,8012	919,486458	2,8616	982,375056	2,623	1071,23064
3,043	950,140824	3,1332	1019,14092	2,8701	1109,0316
3,3167	976,177942	3,4291	1050,03147	3,1342	1140,45156
3,6084	988,051600	3,7282	1075,38936	3,4047	1155,5072
3,9467	986,945612	4,0475	1097,68805	3,7081	1179,53297
4,3286	981,548239	4,3901	1112,15366	4,039	1189,74785
4,7316	966,519376	4,7422	1120,90643	4,3879	1188,38329
		5,1071	1125,94219	4,7571	1181,67787
		5,4868	1124,65707	5,1453	1167,59311
		5,9047	1117,74773	5,561	1155,34868
		6,3056	1106,34118	5,9864	1141,95347
		6,731	1093,47993	6,4096	1132,06327
		7,1648	1080,32224		

Echantillon 05 : 98% sol traite par 2% Caséine à 14 jours de cure

$\sigma_3 = 100$ (kPa)		$\sigma_3 = 200$ (kPa)		$\sigma_3 = 300$ (kPa)	
DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)	DEPL VER (mm)	Déviateur (kPa)
0,0021	2,72946602	0,001	0,3032588	0	0
0,053	2,72763795	0,0137	24,5608275	0,0159	22,4379855
0,1463	2,42152006	0,0403	63,6558221	0,0604	55,4567732
0,246	19,3472256	0,0869	110,570076	0,124	94,1670955
0,3553	44,6755225	0,1537	162,527786	0,2036	134,902184
0,4624	72,9476343	0,2269	215,896714	0,2906	179,153614
0,5791	107,744143	0,3128	276,054888	0,3935	227,186198
0,7074	149,922991	0,4072	337,248580	0,5016	278,984213
0,8358	196,762684	0,5101	400,354690	0,6236	329,968535
0,9705	251,804657	0,6226	477,362212	0,7605	385,512517
1,1031	306,951801	0,7403	545,393556	0,9026	438,434138
1,2452	365,134835	0,8739	617,281589	1,0585	492,844883
1,399	428,689145	1,0129	691,549440	1,2272	546,046886
1,557	493,729913	1,1614	764,537466	1,4128	596,185259
1,7257	559,004942	1,3194	836,240057	1,609	652,224629
1,9007	622,446501	1,4944	908,583793	1,8179	707,253643
2,1022	682,678344	1,6790	975,752013	2,0439	776,297061
2,3133	736,012007	1,8710	1039,71892	2,2825	838,285945
2,5562	793,101687	2,0948	1099,43675	2,5381	904,891314
2,8076	856,391165	2,3207	1149,33689	2,8065	970,036384
3,1056	904,498182	2,5721	1191,93391	3,1003	1028,22885

ANNEXES

3,4333	950,615013	2,8468	1224,90698	3,4068	1081,60364
3,7993	995,83417	3,1438	1252,73372	3,725	1139,2554
4,1652	1022,2106	3,4524	1269,48199	4,0411	1186,03937
4,5417	1050,35012	3,7897	1279,66666	4,3773	1232,85384
4,9045	1077,10705	4,1493	1281,38084	4,7231	1277,68127
5,2789	1094,08292	4,5227	1276,38036	5,0731	1314,53097
5,6586	1110,7353	4,9087	1269,4875	5,4316	1339,24713
6,0564	1126,28479	5,3065	1259,02085	5,8124	1346,84225
6,4743	1137,94849	5,7308	1245,59381	6,2102	1346,73972
6,8901	1135,07221	6,1487	1230,0812	6,6047	1345,24654
7,3292	1124,59351			7,0067	1327,76719
7,7832	1098,87431			7,413	1319,39092
				7,8266	1304,86912

A.2 Equation de régression en unités non codées

Contrainte = 0,717 + 0,0286 % + 0,0214 Tps + 0,01224 %*Tps

Configuration

Variable	Configuration
%	3
Tps	7

Prévision

Valeur ajustée	ErT ajust	IC à 95 %	IP à 95 %
1,20952	0,0662401	(1,03925; 1,37980)	(0,727911; 1,69114)

Configuration

Variable	Configuration
%	3
Tps	14

Prévision

Valeur ajustée	ErT ajust	IC à 95 %	IP à 95 %
1,61667	0,104735	(1,34744; 1,88590)	(1,09184; 2,14149)