

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 : DJEMAL Roumayssa

Stabilisation d'un sol argileux par un nouveau liant et une fibre naturelle

Sous la direction de : Dr. BOUTELDJA FATHE

Juin 2024

REMERCIEMENTS

Nous exprimons toute notre gratitude et sincère dévouement à Dieu Le Tout puissant qui grâce à son aide nous avons terminé ce modeste travail

*Je tiens ensuite à remercier mon encadreur **Dr BOUTELDJIA FATHE** son aide et son encadrement, ses encouragements et surtout sa compréhension durant toute la période de préparation de ce mémoire.*

*Je remercie la Doctorante **LACHEHEUB Loubna Kamar**, dont l'aide sur le plan expérimental, notamment les essais que nous avons réalisés en laboratoire, qui ont nécessité beaucoup de rigueur, d'assiduité et de patience. Et aussi pour sa disponibilité qui a permis de mener à bout ce projet fin d'étude.*

Je remercie tous les enseignants et les travailleurs d'université de 8 mai 1945 'Guelma', pour les moyens qui ont été mis à notre disposition durant toute la durée de la formation.

Mes remerciements, également à tout l'ensemble des responsables, ingénieurs et techniciens du Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction (LNHC) d'Annaba de m'avoir accueilli pendant ma période de stage.

Un énorme merci à tous mes amis et mes collègues d'étude sans exception, et toute personne qui m'a aidée de près ou de loin dans l'élaboration de ce travail.



DEDICACE

A mes plus grands soutiens et sources d'inspirations, je dédie ce travail avec tout mon amour et ma reconnaissance infinis

*A Mon père, **Hamid***

L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments. Que dieu vous préserve et vous procure santé et longue vie.

*Ma mère, **Fatima Zahra***

Qui a toujours été mon part d'attachement et ma boussole, merci pour ton amour inconditionnel, ton dévouement et ton soutien inébranlable. Tu as été la lumière qui a éclairé mon chemin dans les moments sombres et tu as toujours cru en moi, même lorsque je doutais.

Tout ce que je peux vous offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je vous porte. J'avoue vraiment que vous êtes pour moi la lumière qui me guide vers le chemin de la réussite. C'est à vous que je dois mon succès.

En témoignage, je vous offre ce modeste travail pour vous remercie de vous sacrifices consentis et pour l'affection dont vous m'avez toujours témoigné.

*A mes seures et frère : **Hanin, Ghada, Salah et Abdou***

Aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous.

Votre joie et votre gaieté me comblent de bonheur.

Puisse dieu vous garde, éclaire votre route et vous aide à réaliser à votre tour vos vœux les plus chers.

*Mes nièces et neveux **Sara, Hatem, Alla, Adem et Lina** qui ont rempli ma vie de tant de bonheur et de joie, je vous aime.*

*A mes très chers amies **Chirez, Imane et Donya** qui ont été mes piliers dans les moments difficiles et mes partenaires de fête dans moments de joie, merci pour votre amitié sincère, votre soutien sans faille et votre amour inconditionnel.*

RESUME

Le traitement des sols par les techniques de stabilisation chimique est largement utilisé dans les opérations de terrassement des terres. Les sols fins argileux sont des matériaux relativement tendres qui présentent une résistance élevée à l'état sec mais leur comportement est différent en contact avec l'eau, ils deviennent gonflants et non résistants, ce qui limite leur utilisation en tant que matériaux de remblais dans les travaux de terrassement. Cette étude a pour but d'évaluer au laboratoire le comportement d'un sol argileux de type marne argileuse, compactée et traitée avec un nouveau liant composé de chaux de coquille d'œuf et de zéolite associé avec la fibre naturelle de bambou. Dans ce contexte, la démarche adoptée dans ce travail est basée sur une étude expérimentale. Dans cette étude, des essais de CBR (IPI), des essais de compression non confinée, cisaillement rectiligne et des essais eodométriques ont été réalisés sur différents échantillons de marne traitée à différents dosages. Les résultats montrent que l'ajout de la chaux de coquille d'œuf calcinée et de la zéolite associé avec la fibre de bambou au sol conduit à une amélioration des caractéristiques mécaniques.

Mots Clés : Marne, nouveau liant, fibre naturelle, étude expérimentale

ABSTRACT

Soil treatment using chemical stabilization techniques is widely used in earthmoving operations. Clay soils are relatively soft materials with high strength in the dry state, but their behavior is different in contact with water, they become swollen and non-resistant, which limits their use as fill materials in earthworks. The aim of this study is to evaluate in the laboratory the behavior of a clayey marl soil, compacted and treated with a new binder composed of eggshell lime and zeolite combined with natural bamboo fiber. In this context, the approach adopted in this work is based on an experimental study. In this study, CBR tests, unconfined compression tests, rectilinear shear tests and eodometric tests were carried out on different samples of treated marl at different dosages. The results show that the addition of eggshell lime and zeolite combined with bamboo fiber to the soil leads to improved mechanical properties.

Keywords: Marl, new binder, natural fiber, experimental study

ملخص

تُستخدم معالجة التربة باستخدام تقنيات التثبيت الكيميائي على نطاق واسع في عمليات الحفر. التربة الطينية هي مواد لينة نسبياً وذات مقاومة عالية في الحالة الجافة، ولكن سلوكها يختلف عند ملامستها للماء، حيث تصبح منتفخة وغير مقاومة، مما يحد من استخدامها كمادة ردم في أعمال الحفر. الهدف من هذه الدراسة هو تقييم سلوك التربة الطينية في المختبر، مضغوطة ومعالجة بمادة رابطة جديدة مكونة من جير قشر البيض والزيوليت مع ألياف الخيزران الطبيعية. في هذا السياق، يعتمد النهج المتبع في هذا العمل على دراسة تجريبية. في هذه الدراسة، تم إجراء اختبارات مؤشر التحميل الفوري، واختبارات الضغط غير المحصور، واختبارات القص المستقيم، واختبارات قياس الأودومترية على عينات مختلفة من الطين المعالج بجرعات مختلفة. وتظهر النتائج أن إضافة جير قشر البيض والزيوليت مع ألياف الخيزران إلى التربة يؤدي إلى تحسن في الخواص الميكانيكية لها.

الكلمات الرئيسية: التربة الطينية، مادة رابطة جديدة، ألياف طبيعية، دراسة تجريبية

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	I
DEDICACE.....	II
RESUME.....	III
LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
INTRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SOLS

I.1. INTRODUCTION	3
I.2. LE SOL ET LEURS CONSTITUANTS	3
I.2.1. Définition d'un sol.....	3
I.2.2. Origine des sols.....	3
I.2.3. Les principaux constituants d'un sol	4
I.3. PROCESSUS DE FORMATION GEOLOGIQUE D'UN SOL	5
I.4. DIFFERENTS TYPES DES SOLS FINS.....	6
I.4.1. Les argiles	6
I.4.2. Les limons.....	7
I.4.3. Les vases	7
I.4.4. Les tourbes	8
I.4.5. Les marnes	9
I.5. STRUCTURE ET TEXTURE DES SOLS FINS	10
I.5.1. Structure des sols fins	10
I.5.2. La texture de sol.....	12
I.6. CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE DES SOLS FINS	13
I.6.1. Classification USCS / LCPC	13
I.6.2. Classification GTR	15
I.6.3. Système AASHTO.....	16

I.7. PRINCIPAUX PROBLEMES DES SOLS FINS	17
I.7.1. Faible capacité portante en sol support.....	17
I.7.2. Tassements excessifs	18
I.7.3. Risque de glissement des talus	19
I.7.4. Retrait et gonflement	19
I.7.5. Erosion.....	20
I.8. CONCLUSION.....	21_Toc169000671

CHAPITRE II : STABILISATION DES SOLS PAR DES AJOUTS MINERAUX ET DES POLYMERES NATURELS

II.1. INTRODUCTION	22
II.2. STABILISATION DES SOLS PAR DES AJOUTS MINERAUX	22
II.2.1. Stabilisation par ajout de chaux.....	22
II.2.2. Stabilisation au ciment	25
II.2.3. Stabilisation par d'autres ajouts minéraux	27
II.3. STABILISATION DES SOLS PAR DES POLYMERES NATURELS.....	36
II.3.1. Différents types de fibres naturelles	36
II.3.2. Fibre de bambou	39
II.4. TECHNIQUE DE STABILISATION DE SOL SUR LE TERRAIN	40
II.4.1. Préparation du sol	40
II.4.2. Épandage du liant	41
II.4.3. Malaxage en place	42
II.4.4. Compactage	42
II.4.5. Réglages	43
II.4.6. Protection superficielle.....	44
II.5. CONCLUSION.....	45

CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE DE TRAITEMENT DE MARNE

III.1. INTRODUCTION.....	46
--------------------------	----

III.2. OBJECTIFS ET DEMARCHE EXPERIMENTALE	46
III.3. CARACTERISATION DE LA MARNE.....	47
III.3.1. Identification du sol.....	47
III.3.2. Classification du sol	53
III.4. CHOIX DES MELANGES DU SOL.....	53
III.5. TRAITEMENT DU SOL	54
III.5.1. Effet du traitement au liant seul sur ρ_d et IPI	54
III.5.2. Effet combiné du traitement au liant et des fibres sur ρ_d et IPI	56
III.5.3. Essai de compression non confinée.....	58
III.5.4. Essai de cisaillement rectiligne	61
III.5.5. Essai oedométrique (XP P94-090-1).....	70
CONCLUSION GENERALE	74
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	76

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SOLS

Figure I. 1: Différentes phases du sol.....	4
Figure I. 2: Processus de formation des sols	6
Figure I. 3 : Photo de différentes argiles	7
Figure I. 4: Photo d'un sol limoneux.....	7
Figure I. 5: Différents types des tourbes	9
Figure I. 6: Photos d'une marne alterné avec du calcaire	10
Figure I. 7: Structure des sols.....	12
Figure I. 8: Diagramme de classification triangulaire des sols	13
Figure I. 9: Classification des sols fins selon le système USCS/LCPC	14
Figure I. 10 : Classification GTR des sols	16
Figure I. 11 : Difficulté de la traficabilité des engins sur les sols fins	18
Figure I. 12 : Tassement de la ville de Mexico	18
Figure I. 13 : Photo d'un glissement de terrain	19
Figure I. 14 : Phénomène de retrait-gonflement	20
Figure I. 15: Phénomène d'érosion dans les remblais routiers	21

CHAPITRE II : STABILISATION DES SOLS PAR DES AJOUTS MINERAUX ET DES POLYMERES NATURELS

Figure II. 1: Le cycle de la chaux.....	23
Figure II. 2: Transformation du calcaire en chaux vive	24
Figure II. 3 : La chaux éteinte en poudre	24
Figure II. 4: Les grandes étapes de la fabrication du ciment.....	26
Figure II. 5: Schéma de principe d'un haut fourneau.....	28
Figure II. 6 : Agrégat de laitier de haut fourneau.....	28
Figure II. 7 : Fumée de silice.....	30
Figure II. 8: Diagramme ternaire de classification des cendres volantes (Fly Ash)	31
Figure II. 9: Pouzzolane naturelle	32
Figure II. 10 : Coquille d'œuf	33
Figure II. 11 : Photos d'une zéolithe naturelle	34
Figure II. 12 : Zéolithe synthétique	35
Figure II. 13: Représentation schématique des différentes unités structurales constituant les zéolithes.....	36
Figure II. 14 : Classification des fibres naturelles.....	37
Figure II. 15 : Structure du bois	38
Figure II. 16: Photo des tiges de bambou.....	39
Figure II. 17 : Scarification des sols.....	41
Figure II. 18 : Epandage du liant.....	42
Figure II. 19 : Malaxage du liant avec le sol avec pulvimalaxeur	42
Figure II. 20: Compactage aux compacteurs à pneus et cylindrique	43
Figure II. 21: Réglage d'une couche compactée avec niveleuse.....	43

CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE DE TRAITEMENT DE MARNE

Figure III. 1: Essai de détermination de la limite de liquidité.....	49
Figure III. 2: Détermination de la limite de liquidité	50
Figure III. 3 : Détermination de la limite de plasticité	50
Figure III. 4: Essai au bleu de méthylène	52
Figure III. 5 : Courbe granulométrique par tamisage et sédimentation de la marne.....	53
Figure III. 6 : Compactage du sol.....	54
Figure III. 7 : Poinçonnement du sol.....	55
Figure III. 8: Valeurs ρ_d en fonction des proportions Coq -Zéo pour différents dosages	55
Figure III. 9 : Valeurs IPI en fonction des proportions coq – Zéo pour différents dosages	56
Figure III. 10 : Comparaison des ρ_d avec et sans fibre de bambou	57
Figure III. 11: Comparaison des IPI avec et sans fibre de bambou	57
Figure III. 12 : Photos des éprouvettes durant la cure et au cours d'essai	59
Figure III. 13: Evolution de Rc en fonction du dosage avec et sans bambou	60
Figure III. 14 : Appareille de cisaillement	61
Figure III. 15 : Préparation des éprouvettes	62
Figure III. 16 : Préparation des éprouvettes	63
Figure III. 17 : Cisaillement des éprouvettes dans la boîte de Casagrande.....	63
Figure III. 18 : Courbe contrainte de cisaillement-déplacement de la marne naturelle	64
Figure III. 19 : Courbe contrainte cisaillement - contrainte normal de la marne naturelle	64
Figure III. 20: Courbe contrainte cisaillement-déplacement de la marne traitée à 4%	65
Figure III. 21: Courbe contrainte cisaillement - contrainte normal de la marne traitée à 4% .	65
Figure III. 22 : Courbe contrainte cisaillement-déplacement de la marne traitée à 6%	66
Figure III. 23 : Courbe contrainte cisaillement - contrainte normal de la marne traitée à 6%	66
Figure III. 24 : Courbe contrainte cisaillement-déplacement de la marne traitée à 8%	67
Figure III. 25 : Courbe contrainte cisaillement - contrainte normal de la marne traitée à 8%	67
Figure III. 26 : Evolution de l'angle de frottement et la cohésion en fonction du dosage	68
Figure III. 27 : Résistances au cisaillement maximales (τ_{max}) avant et après traitement	69
Figure III. 28 : Principe de l'essai	70
Figure III. 29 : Photos de l'oedomètre	70
Figure III. 30 : Courbe de compressibilité oedométrique du sol naturel.....	71
Figure III. 31 : Courbe de compressibilité oedométrique du sol traité à 4% en liant + 1% de bambou	72
Figure III. 32 : Courbe de compressibilité oedométrique du sol traité à 6% en liant + 1% de bambou	72
Figure III. 33 : Courbe de compressibilité oedométrique du sol traité à 8% en liant + 1% de bambou	73

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SOLS

Tableau I. 1: Dénomination des sols fins calcaires	14
Tableau I. 2 : Classes principales des sols selon GTR	15
Tableau I. 3: Classification des sols selon l'AASHTO	17

CHAPITRE II : STABILISATION DES SOLS PAR DES AJOUTS MINERAUX ET DES POLYMERES NATURELS

Tableau II. 1: Différents types de ciment en fonction de leur composition	26
Tableau II. 2 : Composition chimique de laitier de haut Fournaux.....	29
Tableau II. 3 : Classification des zéolithes en fonction du rapport Si/Al.....	35
Tableau II. 4: Composition des fibres naturelles.....	38
Tableau II. 5 : Présente les propriétés physiques des fibres naturelles les plus courantes.....	40
Tableau II. 6 : Protection de la surface du sol traité.....	44

CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE DE TRAITEMENT DE MARNE

Tableau III. 1: Résultats de la teneur en eau	47
Tableau III. 2 : Résultats de la limite de liquidité.	49
Tableau III. 3: Résultats de la détermination de la limite de plasticité	51
Tableau III. 4 : Résultat de l'essai VBS	52
Tableau III. 5 : Classifications de la marne de Mila	53
Tableau III. 6 Classifications de la marne de Mila	54
Tableau III. 7 : Angle de frottement et la cohésion à différents dosages	67
Tableau III. 8 : Valeurs des indices Cc et Cs et coefficient de gonflement Cg.....	71

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'amélioration des sols fins qui sont souvent rencontrés dans les travaux de terrassements des projets d'infrastructures tel que les routes, chemins de fer, aérodromes, ...) est primordial pour leur réutilisation en géotechnique routière (remblais, couche de forme, ...). Ce type de sol engendre le plus souvent des pathologies liées à leur très faible portance. Deux solutions se présentent comme solution technique à savoir les méthodes chimiques de stabilisation et les méthodes de renforcement de sol. Le choix entre ces méthodes dépend de paramètres, tels que des considérations économiques, la nature des sols à améliorer et le respect des conditions environnementales.

Afin d'éviter des choix coûteux, la technique de stabilisation par ajout d'additives a été une méthode souvent utilisée pour améliorer la résistance, la perméabilité, la durabilité et réduire les déformations et les sensibilisations à l'eau des sols. Les additives les plus couramment utilisées pour cette technique sont la chaux et le ciment. En effet, la stabilisation des sols par la chaux est ancienne, les chinois et les romains l'ont utilisé pour la construction de la grande muraille et de Via Appia à Rome. L'utilisation du ciment pour le traitement des sols date du début du siècle en Allemagne, un grand nombre des sols d'aérodromes ont été stabilisés au ciment. Cependant, il est néfaste pour l'environnement de produire ces additifs en raison de leur empreinte carbone élevée, de leur consommation d'énergie considérable, de leur émission de poussière dans l'air et de leur épuisement des ressources naturelles.

Dans ce contexte, notre travail de fin de cycle Master vise à étudier le comportement d'une marne argileuse de la région de Mila plus exactement de Sidi Marouane pour sa réutilisation dans la construction de remblais routiers. Ce sol présente des caractéristiques géotechniques initialement mauvaises, pour cela il est nécessaire de la traiter en ajoutant des produits de traitement adaptés. Afin d'y parvenir, nous avons testé un nouveau liant composé de matériaux recyclés qui est la chaux de coquille d'œuf calcinée et la zéolithe et en ajoutant un polymère naturel qui est la fibre de bambou.

Pour atteindre l'objectif visé, le travail est divisé en trois chapitres y compris une introduction générale et une conclusion.

Premier chapitre : synthèse bibliographique sur les sols fins leurs constituants et leur formation. Il contient aussi les systèmes de classification des sols (GTR et USCS...). Il

présente également les principaux problèmes des sols argileux (tassement, gonflement, glissement...).

Deuxième chapitre : Il explore les différentes méthodes de traitement des sols, en mettant l'accent sur les produits utilisés, les techniques de mise en œuvre et les équipements nécessaires. Une connaissance approfondie des méthodes de stabilisation par des polymères naturels est également élaborée dans ce chapitre.

Troisième chapitre : Ce chapitre décrit les essais menés dans le cadre de notre étude pour identifier et caractériser la marne de Mila. Il présente également les résultats obtenus concernant son comportement mécanique et géotechnique après traitement au liant et polymère.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SOLS

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SOLS

I.1. INTRODUCTION

Le sol est un milieu complexe qui abrite un quart de la vie terrestre. Il joue un rôle essentiel dans la construction et les travaux de bâtiment et de génie civil. Les sols peuvent :

- Supporter les ouvrages : fondations superficielles, fondations profondes, ...
- Être supportés : murs de soutènement, rideaux de palplanches, ...
- Constituer l'ouvrage lui-même : remblais, digues, barrages, ...

Ce chapitre fournit un aperçu des sols naturels. D'abord, la définition et un aperçu global sur les sols, leur origine et leurs différents constituants sont présentés. Ensuite, nous mettons la lumière sur les principaux facteurs entrant en jeu dans la formation géologique des sols. Puis, nous avons évoqué les divers types des sols fins tels que les argiles, les limons, sables, ...etc. Nous avons également évoqué la structure et la texture de ce dernier. Les différents systèmes de classification des sols comme la classification USCS/LCPC, GTR et AASHTO ont été abordés. Enfin, Ce chapitre a été clôturé par la présentation des diverses pathologies liées au comportement des sols fins.

I.2. LE SOL ET LEURS CONSTITUANTS

I.2.1. DEFINITION D'UN SOL

Le sol est la couche externe de la croûte terrestre. Il est le milieu des échanges de matières et d'énergie entre l'air, l'eau et les roches. Le sol en tant que partie de l'écosystème, occupe une position clé dans les cycles globaux des matières. [1]

Cependant, Les sols sont des matériaux meubles, poreux, hétérogènes et souvent anisotropes. Les matériaux, minéraux ou organiques, sont généralement à l'état de grains ou de particules dont les formes et les dimensions sont essentiellement variables. [2]

I.2.2. ORIGINE DES SOLS

Les sols ont deux origines principales : la désagrégation des roches et la décomposition d'organismes vivants :

- ❖ **La désagrégation des roches** par altération mécanique et physico-chimique sous l'effet des agents naturels suivie des fissurations consécutives à la décompression, aux effets des chocs thermiques ; des actions mécaniques tels que les chocs et les frottements dans un

processus naturel de transport gravitaire, fluvial, ou éolien ; des attaques chimiques sous l'effet des circulations des eaux acides ou basiques considérées comme agressives ;

❖ **La décomposition d'organismes vivants** tels que les végétaux et les animaux. Les sols sont composés des particules regroupées en agrégats sous forme de grains polygonaux plus ou moins réguliers correspondant à des fragments de roches. Leurs formes résultent de la morphologie des minéraux qui les constituent. La taille des particules est inférieure à $2 \mu\text{m}$ pour les argiles, elle est de $2 \mu\text{m}$ à $80 \mu\text{m}$ pour les limons, quelques millimètres pour les sables et beaucoup plus pour les graves. [3]

I.2.3. LES PRINCIPAUX CONSTITUANTS D'UN SOL

De manière générale, les sols proviennent de l'altération et de la désagrégation des matériaux constituant l'écorce terrestre. Des éléments d'origine organique sont susceptibles de s'y ajouter. Les sols peuvent donc être considérés comme formés de grains ou de particules dont la forme, la taille et l'arrangement diffèrent sensiblement d'un sol à l'autre. Le fait qu'il inclut ou non de l'eau n'est pas sans conséquence sur son comportement, c'est pourquoi on considère qu'un sol est la réunion d'un squelette solide, d'eau et de gaz (l'air).

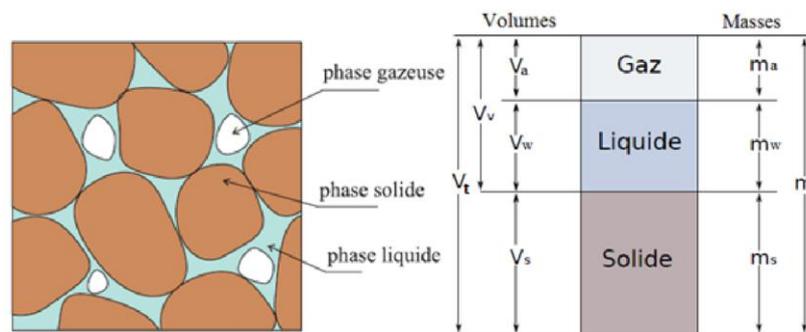


Figure I. 1: Différentes phases du sol

a) **LE SQUELETTE SOLIDE**

Lorsque le sol provient de la désagrégation physique d'une roche, les grains sont constitués des mêmes éléments que celui-ci ; ils ont en général des dimensions supérieures à $2 \mu\text{m}$ et sont de forme ramassée. Si, en revanche, une attaque chimique s'est produite, les grains peuvent être différents de la roche mère (composition chimique ou cristallisation différente). Les plus petites particules que l'on rencontre sont les constituants des argiles. Ces particules très plates, en forme de feuillets, sont l'objet d'importantes forces d'attraction mutuelles.

Le sol peut également contenir des particules solides de manières organiques. La tourbe en un exemple. Les sols de ce type se caractérisent par des poids volumiques plus faible que

ceux des sols d'origine minérale. Les particules organiques ayant la faculté de pouvoir être brûlées, c'est souvent ainsi, par perte de poids à la calcination, que l'on peut avoir la confirmation de leur présence. [4]

b) L'EAU

Celui-ci peut se présenter de diverses manières suivant la dimension des grains solides. Dans tous les cas on rencontre l'eau libre qui peut circuler entre les grains. Elle disparaît complètement par séchage à 100 °C. Lorsque les grains sont de petits diamètres (inférieur à 2 µm), il existe de l'eau absorbé qui est solidaire aux grains et qui ne peut s'évacuer qu'à une température de l'ordre de 300°C.

Dans le cas des sols non saturé, des effets de capillarité créent entre les grains des forces d'attraction dû à l'eau de capillarité. Celles-ci donnent à un milieu granulaire une certaine cohésion dont il est dépourvu lorsqu'il est totalement sec.

c) LE GAZ (l'air)

Celui-ci est en général de l'air sec ou humide dont on néglige le poids devant celui de l'eau et des grains. Si tous les vides sont remplis d'eau le sol est dit saturé ; c'est le cas de tous les sols baignés par la nappe phréatique. Par contre au-dessus, à cause des forces d'ascension capillaire, le sol peut être, soit saturé, soit humide (après de la nappe), soit sec (loin de la nappe).

I.3. PROCESSUS DE FORMATION GEOLOGIQUE D'UN SOL

Globalement, on distingue 3 phases dans la formation d'un sol :

1. Altération de la roche mère : elle est le résultat de processus physique (gel, pénétration des racines...) qui fragmentent la roche, et de processus chimique (action des eaux chargées d'acides) qui dissolvent calcaires et hydrolysent minéraux silicatés pour engendrer des complexes d'altérations (argiles, oxydes de fer, sels...) cimentant les grains résultent de la précédente fragmentation. Les propriétés physiques et la composition chimique de la roche mère ont une influence directe sur la nature et sur l'évolution d'un sol.
2. Incorporation de la matière organique par minéralisation de molécules organiques et humidification : c'est-à-dire édification d'acides humiques à partir des molécules issues de cette minéralisation. Les végétaux fournissent donc l'essentiel de la matière organique présente dans le sol, et qui influencent aussi son évolution.

3. Les horizons se différencient enfin sous l'action des eaux d'infiltration (lessivage). Les éléments solubles sont entraînés et accumulés pour former des horizons dits d'accumulation. Le climat affecte cette opération par la température et les précipitations. [5]

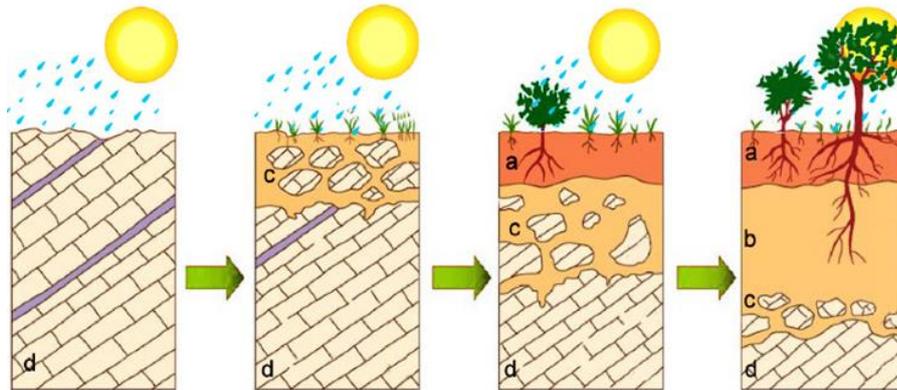


Figure I. 2: Processus de formation des sols

I.4. DIFFERENTS TYPES DES SOLS FINS

I.4.1. LES ARGILES

Les argiles sont très abondantes dans la nature et couvrent environ 42% du volume de l'écorce terrestre. Il n'y a pas de définition unique du terme « argile », ce mot englobe deux connotations dont l'une liée à la taille des grains et l'autre à la minéralogie. La définition dépend de la discipline concernée. Le géologue ou le pédologue considère comme argile tout minéral de faible granulométrie, la limite étant fixée à 2 ou 4 microns selon les cas. Les céramistes définissent l'argile comme une matière première qui en présence d'eau, forme d'une pâte plastique qui durcit après cuisson.

Dans le domaine du génie civil, le sol argileux désigne un sol qui contient un certain pourcentage de minéraux argileux et dont le comportement est influencé par la présence de ces derniers. Un sol argileux est un sol fin, plastique et cohérent, actif sur le plan électrochimique et dont le comportement est très sensible à la présence de l'eau. L'influence de la proportion en argiles sur les propriétés du sol augmente avec la quantité d'eau. Lorsque la quantité d'argile excède 50% en masse, le comportement du mélange est gouverné par l'effet de l'argile.

En géotechnique les sols sont classés suivant leur granulométrie tous sols dont le diamètre moyen est $< 20 \mu\text{m}$ est dit sol argileux ce pendant les tailles des particules n'est pas

suffisante pour dire c'est une argile, il faut aussi que ce soit minéralogiquement un phyllosilicates (texture en feuillets). [6]



Figure I. 3 : Photo de différentes argiles

I.4.2. LES LIMONS

Le limon est un dépôt terreux argileux ou calcaire accumulé sur les bords d'un fleuve. Il est la conséquence de la dégradation du granit. Les sols limoneux possèdent une capacité de rétention de l'eau et sont friables. Néanmoins, il faut compenser leur acidité des apports de chaux. Les limons est une formation sédimentaire dont les grains sont de taille intermédiaire entre les argiles et les sables c'est-à-dire entre 2 et 50 micromètres. Le limon n'a pas d'action sur le Ph. [7]



Figure I. 4: Photo d'un sol limoneux

I.4.3. LES VASES

Les vases sont des dépôts formés par les marées ou que l'on rencontre dans les lits des lacs et des rivières. Leur composition est extrêmement variable et dépend plus ou moins de leur mode de formation. Elles se composent en grande partie de roche broyée, d'argile et de sable, avec de coquillages (en partie rompus) et des débris organiques (restes végétaux et animaux) en quantités variables. Il existe plusieurs types de vases à savoir :

Vases marines : les vases marines ou de marée ; aussi connues sous les noms de tange, vases marais, vases salines et parfois de vases rivières sont déposées par la marée à l'embouchure des rivières et des ruisseaux qui se jettent dans la mer et sur les bords peu élevés des baies et des anses. Elles se composent principalement de particules rocheuses broyées, sous forme d'un sable très fin, et de limon et d'argile en différentes proportions.

Vases de moules et de coquillage d'huitres : les vases de coquillages sont importantes en raison du carbonate de chaux qu'elles renferment.

Vases d'étangs, de lacs et de rivières : ces catégories de vases sont généralement formées par le dépôt des fines substances portées par les eaux des rivières et des ruisseaux. Ce sédiment, qui se compose surtout de particules rocheuses finement broyées, contient souvent une quantité considérable de débris organiques, aussi ces vases sont généralement plus riches en matières organiques que les vases de marées ou d'eau salée. [8]

I.4.4. LES TOURBES

La tourbe est un sol organique issu de la décomposition incomplète de végétaux en milieu humide et anaérobique. L'accumulation des plantes entièrement ou partiellement décomposées et des débris de micro-organismes représente environ 20% de la masse humide de la tourbe, le reste étant essentiellement constitué d'eau.

Ce type de sol se forme dans des endroits mal drainés issus généralement d'étangs, marais, lacs, cuvettes glacières, anciens lits de fleuves ou de rivières. Ces milieux, sous l'effet d'une longue sédimentation de débris de végétaux tels que les arbres, arbustes, plantes herbacées, graminées et mousse, finiront avec le temps par constituer une tourbière. Cette sédimentation, très lente, se fait à une vitesse d'environ 3.5 cm par siècle ; c'est ainsi que la plupart des tourbières remonte de 9000 à 14000 ans. La tourbe produite par une telle sédimentation présente une couleur qui varie généralement de 40 cm à 10 cm. On constate alors une modification de la composition de la tourbe d'une tourbière à une autre : Cette variation se révèle comme un critère essentiel dans l'utilisation qu'on fait de ce sol.

Les tourbières sont sujettes à de nombreuses classifications permettant de différencier les types de tourbe selon leur utilisation. Ainsi, entre autres, nous notons celle basée sur le matériel de dépôt :

- Tourbière de mousse de sphaignes

- Tourbière d'hypne
- Tourbière de joncs-carex
- Tourbière humique etc. [9]



Figure I. 5: Différents types des tourbes

I.4.5. LES MARNES

La marne définit comme étant un matériau de transition entre le calcaire et l'argile. C'est une roche carbonatée contenant de 30 à 70 % d'argile. Ainsi, elle tient de la fraction carbonatée une structure plus ou moins résistante et de la fraction argileuse une possibilité d'évolution par destruction de la structure par suite de l'action de l'eau sur l'argile, conduisant à un matériau plastique. Cette définition purement pétrographique, a été sensiblement élargie sur le plan du pourcentage d'argile. En pratique, en génie civil, le nom marne peut être attribué pour toutes roches carbonatées contenant de 10 à 90 % d'argile, que l'effervescence à l'acide chlorhydrique dilué à froid soit visible ou non sur le matériau. La marne renferme de très nombreux éléments accessoires, visibles uniquement au microscope et dont le rôle peut être prépondérant, tels que : grains de quartz, paillettes de micas, cristaux de gypse, micro-organismes, etc. A côté de ces éléments visibles uniquement au microscope, on peut trouver des éléments volumineux tels que : nodules de pyrite, quartz, gypse, fer de lance ou encore en rose des sables, macrofossiles, etc. Ces différents éléments responsables de la couleur et de l'aspect permettent de définir :

➤ **Selon la couleur :**

- Les marnes bleues d'Argenteuil.
- Les marnes rouges de Marseille.
- Les marnes vertes du bassin de Paris.
- Les marnes bariolées du Trias lorrain.

- Les marnes grises, vertes et bleues de la Grandes Kabylie.

➤ **Selon les constituants remarquables :**

- Les marnes micacées.
- Les marnes sableuses.
- Les marnes dolomitiques.
- Les marnes bitumineuses.
- Les marnes glauconieuses.
- Les marnes gypseuses, etc.

➤ **Selon l'intérêt stratigraphique et paléontologique**

- Les marnes à spongiaires.
- Les marnes à foraminifères.
- Les marnes à pholadomyies.
- Les marnes à radiolaires, etc. [10]



Figure I. 6: Photos d'une marne alterné avec du calcaire

I.5. STRUCTURE ET TEXTURE DES SOLS FINS

I.5.1. STRUCTURE DES SOLS FINS

La structure d'un sol est l'assemblage temporel de ses constituants solide. Le complexe argilo-humique joue un rôle structural, ce rôle est plus ou moins important selon les teneurs en eau du sol et varie en fonction du type d'argile. La matière organique augmente la stabilité des agrégats. Une mauvaise structure peut donc empêcher l'écoulement des eaux dans le sol, les échanges gazeuses entre le sol et l'atmosphère. [11]

I.5.1.1. Classes de développement de la structure

Classe 0 : Non structuré (sans agrégats) aucune agrégation observable massive si le matériau est cohérent, ou élémentaire (particulaire).

Classe 1 : Faible (faiblement agrégé) ; les unités structurales sont mal formées, pratiquement invisibles ; à la main l'échantillon se divise en peu d'agrégats entiers et une masse importante de matériaux élémentaires.

Classe 2 : Moyenne : unités structurales bien formées moyennement stables et apparentes, l'échantillon se décompose en nombreuses unités structurales entières et peu de matériaux élémentaires.

Classe 3 : Forte : unités structurales stables et distinctes, elles sont plus ou moins cohérents les unes aux autres, elles s'observent parfaitement, l'échantillon se décompose presque uniquement en unités structurales entières.

I.5.1.2. Type de la structure

Selon la forme on distingue :

Classe 1- Feuilletée : lamellaire, en plaquettes à dimension verticale beaucoup plus faible que les deux autres dimensions, arrangement autour d'un plan horizontal.

Classe 2- Prismatique à dimension horizontale limitée beaucoup plus faible que la verticale, faces verticales, arrangement autour d'une ligne verticale.

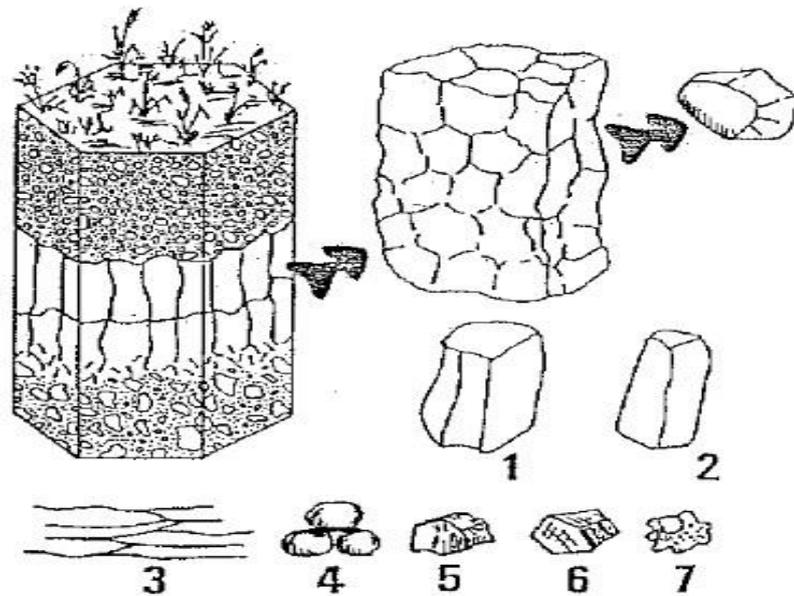
- En prisme : sommets plus ou moins planes
- En colonne : sommets arrondis.

Classe 3- polyédrique : blocs ou polyèdres à faces planes ou bombées, arrangement autour d'un point.

- polyédrique angulaire : faces planes arêtes anguleuses.
- Polyédrique sub-angulaire : faces planes et bombées, arêtes amassées.

Classe 4- sphéroïde : dimensions de même ordre de grandeur, arrangement autour d'un point :

- Granulaire : agrégats peu poreux.
- Grumeleuse : agrégats poreux. [12]



Différentes échelles de structuration du sol :
Types d'éléments structuraux
 1. prismatique
 2. collinaire
 3. en plaquettes (feuilletée)
 4. grenu
 5. polyédrique subangulaire
 6. polyédrique angulaire
 7. grumeleux.

Figure I. 7: Structure des sols

I.5.2. LA TEXTURE DE SOL

La texture d'un sol est l'ensemble des propriétés qui découlent de la composition granulométrique du sol (teneur en pourcentage de sables grossiers et fins, de limons, d'argile, d'humus et de calcaire), elle est déterminée par l'analyse granulométrique. [13]

Le triangle de texture (référence) ou le triangle équilatéral est représenté de la manière suivante :

- Chaque côté du triangle est divisé en 10 parties égale. Un coté du triangle attribué à l'argile, un autre aux limons et le troisième aux sables, la somme de leurs pourcentages respectifs est égale à 100.
- L'intérieur du triangle est divisé en cases, chacune d'elles représentant un type granulométrique de sol caractérisé par les proportions d'un ou deux éléments dominants (voir figure I.8).
- L'emplacement du point représentatif d'un sol dans le triangle ne donne qu'une indication simple. [13]

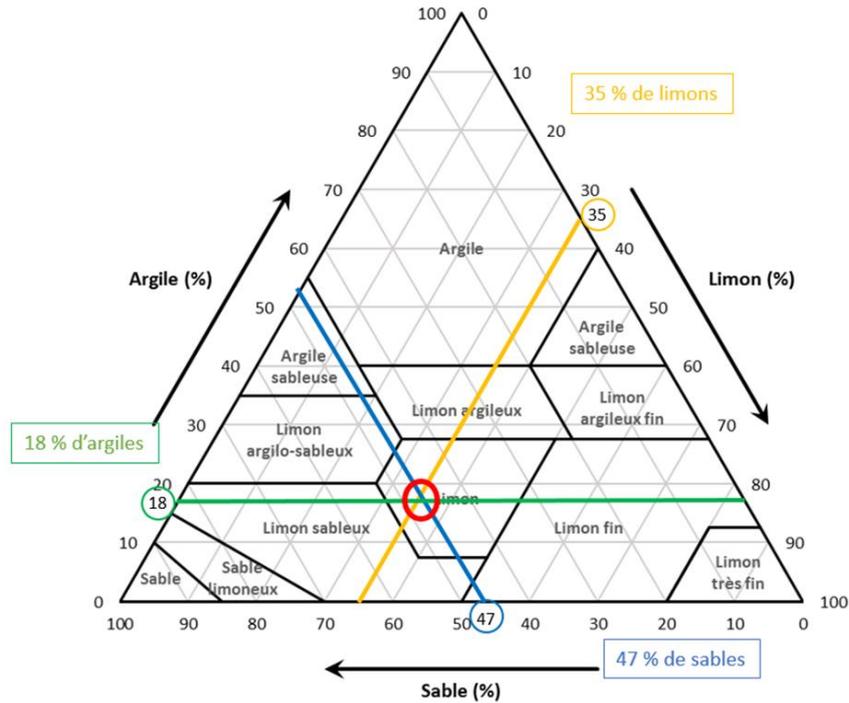


Figure I. 8: Diagramme de classification triangulaire des sols

I.6. CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE DES SOLS FINS

Pour résoudre les problèmes de mécanique des sols, il est important de caractériser un sol mais aussi de les classer, c'est à dire de les mettre dans un groupe ayant des comportements similaires. Il existe de par le monde de nombreuses classifications, parmi elles on peut citer :

- Classification U.S.C.S (Unified Soil Classification System) établie par Casagrande.
- Classification L.C.P.C (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) similaire à la classification U.S.C.S
- Classement G.T.R (Guide des terrassements routiers Français).
- Classification A.A.S.H.T.O (American Association State Highways and Transportation Officials).

I.6.1. CLASSIFICATION USCS / LCPC

Cette classification est la plus utilisée en mécanique des sols. Elle a été développée aux Etats-Unis dans les années 1950 sous le nom United Soil Classification System (USCS) puis francisée au début des années 1960 sous le nom de Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).

La classification USCS/LCPC est basée sur les dimensions des particules (granulométrie) et leur comportement à l'eau (plasticité). Elle prend en compte également la teneur de la fraction organique dans le cas des sols fins en mesurant la teneur en matières organiques par la méthode de la perte au feu. D'après cette classification, on peut distinguer :

- Les sols grenus : plus de 50 % des éléments > 0,08 mm
- Les sols fins : plus de 50 % des éléments < 0,08 mm

Pour les sols fins, la méthode de classification est basée sur les limites d'Atterberg.

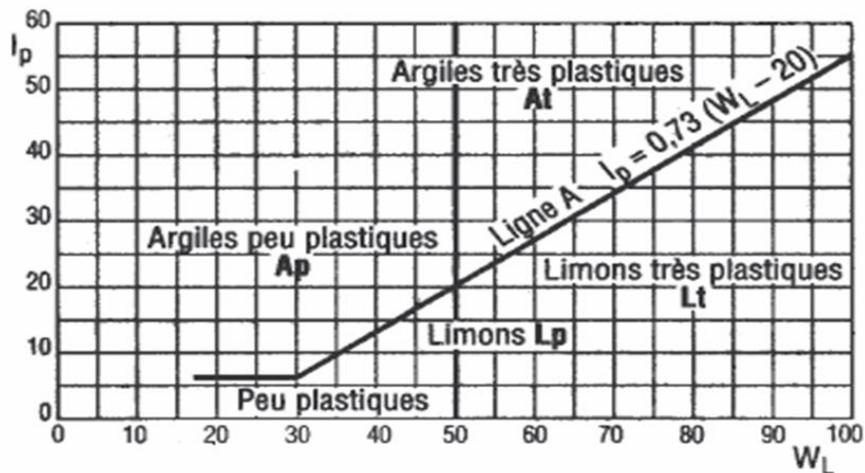


Figure I. 9: Classification des sols fins selon le système USCS/LCPC

Cette classification ne traite pas deux problèmes importants, qui sont celui des carbonates et celui des particules de nature argileuse, qui peuvent avoir une influence décisive dans certaines circonstances (géotechnique routière notamment).

Pour les sols fins carbonatés, on utilise en complément de la classification à base granulométrique, un vocabulaire exprimant la proportion des carbonates de calcium (Ca CO_3) dans le sol (ou la roche), défini dans le tableau suivant.

Tableau I. 1: Dénomination des sols fins calcaires

Pourcentage de Ca CO_3	Dénomination
0 à 10	Argile
10 à 30	Argile marneuse
30 à 70	Marne
70 à 90	Calcaire marneux
90 à 100	Calcaire

Pour les particules argileuses, qui ne sont pas décrites quantitativement par les courbes granulométriques (poudre de roche par exemple), on peut utiliser la notion de sensibilité à l'eau selon l'essai bleu de méthylène pour préciser l'argilosité minéralogique du sol. [14]

I.6.2. CLASSIFICATION GTR

La classification géotechnique des matériaux identifie les sols en 6 classes : A, B, C, D, R et F.

Tableau I. 2 : Classes principales des sols selon GTR

CLASSE	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ Passant à $80\mu\text{m} > 35\%$	A ₁ à A ₄ selon VBS ou IP
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ Passant à $80\mu\text{m} > 35\%$	B ₁ à B ₆ selon VBS ou IP et tamisat
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	ou $D_{max} > 50 \text{ mm}$ Passant à $80\mu\text{m} > 12\%$ Passant à $80\mu\text{m} \leq 12\%$ + VBS > 0,1	30 sous-classes selon VBS ou IP et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	VBS $\leq 0,1$ Passant à $80\mu\text{m} \leq 12\%$	D ₁ à D ₃
R	Matériaux rocheux	Nature pétrographique (Norme NF P 11-300)	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	Teneur en éléments chimiques (Norme NF P 11-300)	

Les caractéristiques permettant la classification sont regroupées selon trois catégories : les paramètres de nature (granulométrie, argilosité, indice de plasticité, VBS, équivalent de sable), les paramètres de comportement mécanique (Los Angeles, Micro-Deval, friabilité des sables), et les paramètres d'état (teneur en eau naturelle, indice de consistance, indice portant immédiat).

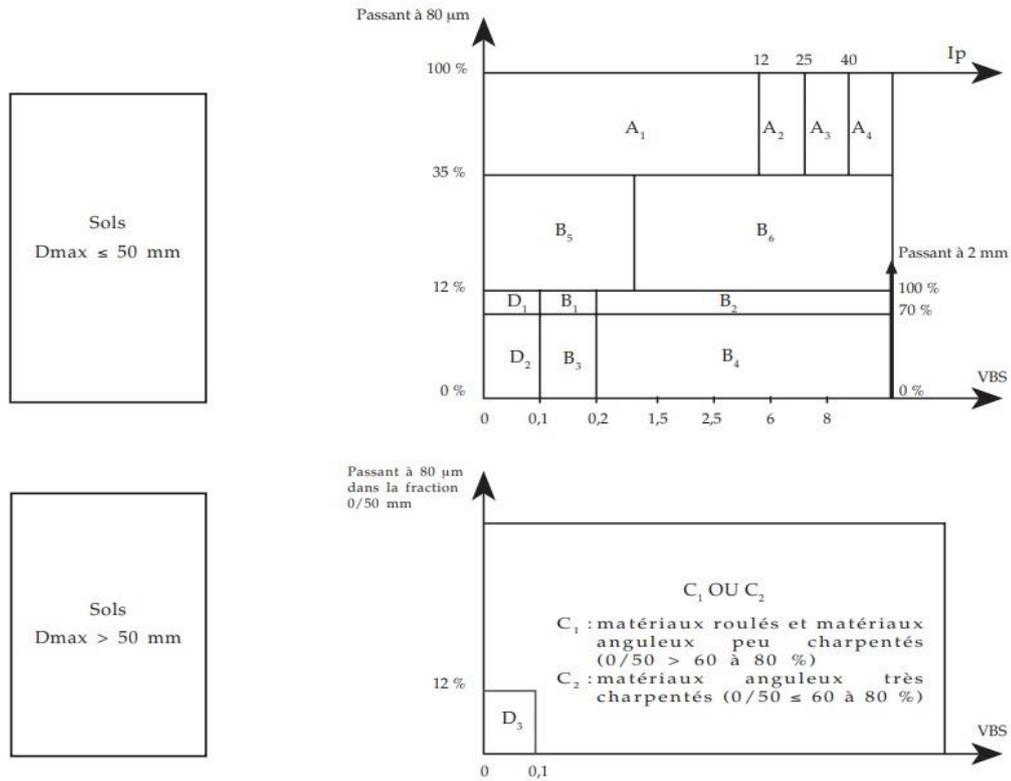


Figure I. 10 : Classification GTR des sols

I.6.3. SYSTEME AASHTO

Le système de classification AASHTO comporte deux classifications générales :

- Les matériaux granulaires contenant $\leq 35\%$, en poids, de particules d'un diamètre inférieur à $0,075$ mm.
- Des matériaux limono-argileux contenant $> 35\%$, en poids, de particules d'un diamètre supérieur à $0,075$ mm.

Ces deux divisions sont subdivisées en 7 classifications de groupes principaux, plus 8 sous-groupes, pour un total d'une quinzaine pour les sols minéraux. [15]

Tableau I. 3: Classification des sols selon l'AASHTO

AASHTO Soil Classification System (from AASHTO M 145 or ASTM D3282)											
General Classification	Granular Materials (35% or less passing the 0.075 mm sieve)							Silt-Clay Materials (>35% passing the 0.075 mm sieve)			
Group Classification	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
Sieve Analysis, % passing											
2.00 mm (No. 10)	50 max	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0.425 (No. 40)	30 max	50 max	51 min	...	...	...	...	...	...	...	...
0.075 (No. 200)	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
Characteristics of fraction passing 0.425 mm (No. 40)											
Liquid Limit	...	...	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	41 min
Plasticity Index	6 max	N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min	11 min ¹
Usual types of significant constituent materials	stone fragments, gravel and sand		fine sand	silty or clayey gravel and sand				silty soils		clayey soils	
General rating as a subgrade	excellent to good							fair to poor			

I.7. PRINCIPAUX PROBLEMES DES SOLS FINS

I.7.1. FAIBLE CAPACITE PORTANTE EN SOL SUPPORT

En raison de leur texture fine, les sols fins ont une capacité de support relativement faible. Cette caractéristique rend ces sols moins adaptés pour supporter des charges importantes, telles que les structures de construction et les infrastructures routières, sans la mise en place de mesures de renforcement appropriées.

La faible capacité de support des sols fins est principalement due à leur composition granulométrique dominée par des particules de taille réduite, telles que les argiles et les limons. Ces particules ont une surface spécifique élevée, ce qui augmente leur capacité à retenir l'eau et à se dilater lorsqu'elles sont mouillées. En conséquence, les sols fins ont tendance à présenter une faible cohésion et une résistance au cisaillement réduite, ce qui limite leur capacité à supporter des charges sans déformation excessive.

Pour pallier cette faiblesse, des techniques de renforcement des sols peuvent être utilisées, telles que l'amélioration de la compaction du sol, traitement par des liants chimiques ou la mise en place de géotextiles et de géogrilles pour renforcer la structure du sol et améliorer sa capacité de support. [16]



Figure I. 11 : Difficulté de la traficabilité des engins sur les sols fins

I.7.2. TASSEMENTS EXCESSIFS

Le tassement est une diminution de volume des sols fins sous l'effet des charges appliquées et de drainage. Ces phénomènes peuvent être de grande extension et affecter des agglomérations entières (Mexico, construite sur des alluvions, s'est tassée de sept mètres depuis le début du siècle par exploitation excessive de la nappe). [17]

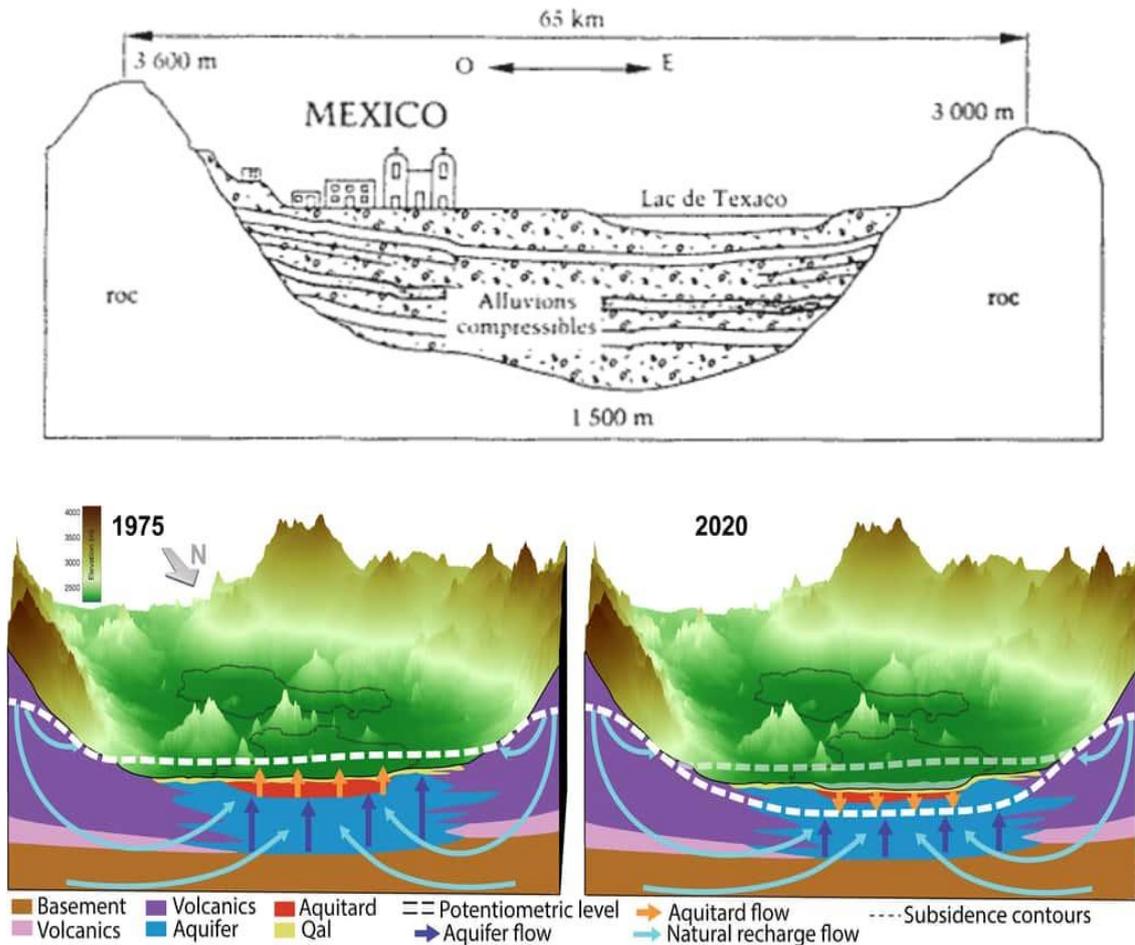


Figure I. 12 : Tassement de la ville de Mexico

I.7.3. RISQUE DE GLISSEMENT DES TALUS

Le glissement des talus (la rupture des pentes) peut se produire rapidement ou progresser graduellement sur une période de plusieurs années. Les modes de rupture des pentes comprennent :

- Un mouvement de rotation le long d'une surface courbe qui donne un effet d'affaissement.
- Des cales ou des blocs qui se déplacent le long d'une surface planent généralement le long d'une base inclinée.
- Une combinaison des deux phénomènes.

Le développement de pressions interstitielles positives, perte de résistance du matériau à cause des intempéries, la déclivité excessive, et la faiblesse des matériaux de fondation contribuent tous à des conditions d'instabilité des pentes. [18]



Figure I. 13 : Photo d'un glissement de terrain

I.7.4. RETRAIT ET GONFLEMENT

Les phénomènes de retrait-gonflement provoqués par la variation de la teneur en eau des sols argileux peuvent produire des désordres aussi bien sur les ouvrages construits en surface (bâtiments, fondations superficielles, ouvrages de soutènement, remblais, etc.) que sur les ouvrages enterrés (tunnels, pieux, canalisations, barrière ouvragée). Ce phénomène provoque des dégâts importants à travers le monde. Les maisons individuelles en maçonnerie sont les plus touchées par ce phénomène car elles induisent de faibles contraintes sur le sol, et de faible résistance au cisaillement, ce qui les rend vulnérables vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. [19]

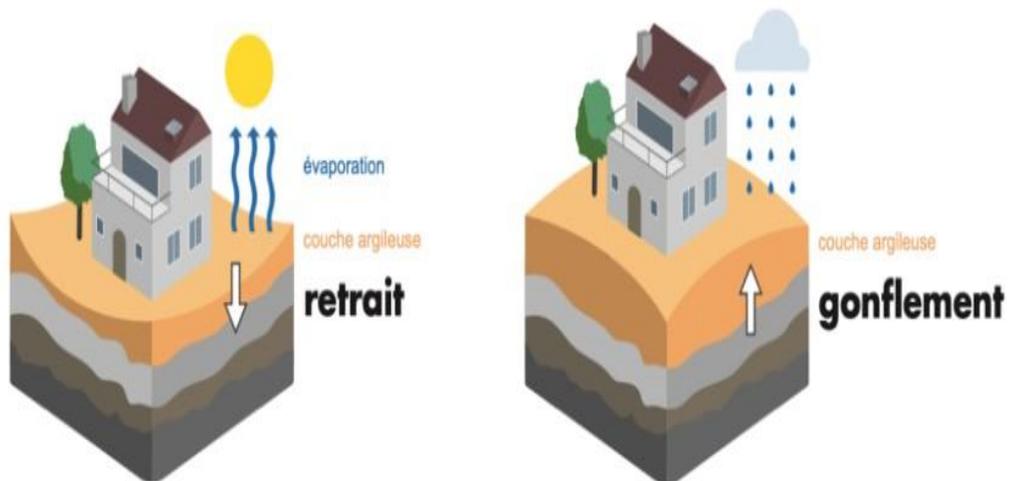


Figure I. 14 : Phénomène de retrait-gonflement

I.7.5. EROSION

L'érosion des sols fins est un phénomène dangereux en géotechnique, car il peut entraîner des problèmes de stabilité des ouvrages en terre, les fondations et les structures souterraines. Ce phénomène est caractérisé par le transport de particules du sol, qui peuvent être érodées par l'eau, le vent, ou d'autres forces environnementales. Les sols fins sont particulièrement susceptibles à l'érosion en raison de leur faible cohésion, de leur porosité élevée et de leur faible densité. Les processus d'érosion peuvent être influencés par de nombreux paramètres, tels que la vitesse de l'eau, le type de sol, la teneur en eau du sol, la pente du terrain et les propriétés du sol. La caractérisation des sols érodables ou érosifs est également cruciale pour comprendre et prévenir l'érosion. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la résistance des sols à l'érosion, notamment l'essai de perte de masse, l'essai de micro-chambre, et l'essai de disque rotatif. Ces méthodes permettent de déterminer les propriétés du sol qui sont importantes pour la prévision de l'érosion. La compréhension de l'érosion du sol fin est essentielle pour prévenir les problèmes de stabilité des structures et des fondations. La caractérisation des sols érodables ou érosifs est également importante pour prévoir le phénomène et mettre en place des mesures préventives appropriées. [20]



Figure I. 15: Phénomène d'érosion dans les remblais routiers

I.8. CONCLUSION

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur les sols. Ce chapitre a permis de fournir des notions de base sur les caractéristiques des sols, leurs classifications et leurs principaux problèmes.

**CHAPITRE II : STABILISATION DES SOLS PAR DES
AJOUTS MINERAUX ET DES POLYMERES
NATURELS**

CHAPITRE II : STABILISATION DES SOLS PAR DES AJOUTS MINÉRAUX ET DES POLYMERES NATURELS

II.1. INTRODUCTION

Les sols de mauvaise qualité ont toujours existé, mais la raréfaction des sols de bonne qualité pour développer les réseaux routiers, autoroutiers, ferroviaires et aéroports ainsi que les zones industrielles entraîne la nécessité de mettre en œuvre des techniques de traitement et de renforcement des sols.

Le présent chapitre se focalise sur les différentes méthodes de stabilisation des sols par différents agents d'amélioration. La stabilisation des sols est essentielle pour améliorer leurs propriétés mécaniques et leur résistance afin de garantir des appuis solides et durables pour les différentes infrastructures de génie civil (chemin de fer, route, structure, ...). Ce chapitre fournit une compréhension approfondie des différentes techniques de stabilisation chimique des sols fins, en mettant en évidence leurs avantages, leurs limites et leurs applications appropriées. Une connaissance approfondie des méthodes de stabilisation par des polymères naturels est également élaborée dans ce chapitre. Enfin, ce chapitre est clôturé par une synthèse sur les étapes de traitement chimique des sols en géotechniques routière.

II.2. STABILISATION DES SOLS PAR DES AJOUTS MINÉRAUX

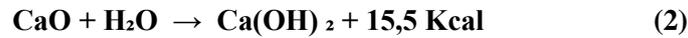
II.2.1. STABILISATION PAR AJOUT DE CHAUX

Le terme de chaux regroupe un grand nombre de produit, dont le seul point commun est d'être obtenu par calcination, c'est-à-dire chauffage à haute température de calcaire. La cuisson décompose le carbonate de calcium CaCO_3 qui est le principal constituant du calcaire, pour libérer le gaz carbonique CO_2 , et laisser la chaux vive CaO selon l'équation suivante :

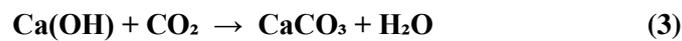


Il s'agit d'une réaction de décarbonatation. Le dégagement de dioxyde de carbone (CO_2) entraîne une perte de poids importante, jusqu'à 44 % de la masse initiale. Le volume est en revanche conservé. Les chaux vives les plus réactives sont obtenues après calcination du calcaire à une température de 900°C.

L'extinction de la chaux vive est la deuxième étape du cycle de la chaux. Elle s'effectue par aspersion d'eau ou par immersion dans des bacs, est une réaction d'hydratation qui correspond à l'équation suivante :



La carbonatation est la dernière étape des transformations liées à la chaux. Elle intervient lorsque la chaux est exposée au contact de l'air elle provoque alors le durcissement de la matière par reformation de calcite (étape lente). On peut exprimer cette dernière étape par l'équation suivant : [21]



Il faut noter que la chaux vive CaO se présente sous forme de poudre blanche, légèrement soluble dans l'eau, et présentant les propriétés d'un liant. Dans le schéma ci-dessous on peut voir l'ensemble des transformations que subit la pierre à chaux (chaux vive et chaux éteinte).

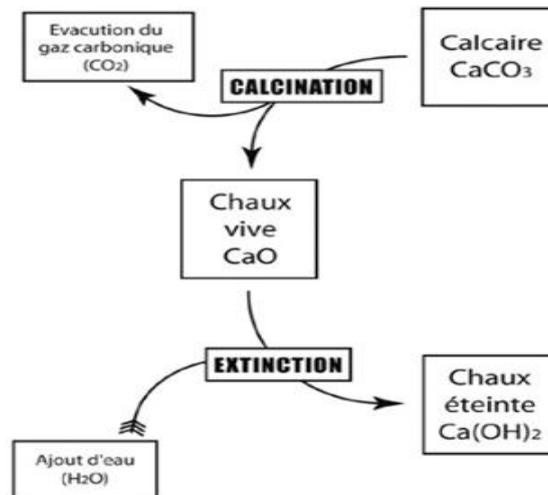


Figure II. 1: Le cycle de la chaux

II.2.1.1. Différents types de la chaux

a) Chaux aérienne

- **Chaux vive** : c'est une chaux aérienne constitué principalement d'oxyde de calcium et de magnésium produite par la calcination de calcaire et/ou dolomie.



Figure II. 2: Transformation du calcaire en chaux vive

La chaux vive est vide d'eau, à son contact, elle produit une grande quantité de chaleur (réaction exothermique). La chaux vive peut-être classée selon le calcaire utilisé lors de la fabrication, elle peut être calcique ou dolomitique : La chaux calcique est fabriquée à partir d'un calcaire pur (CaCO_3) ou contenant moins de 5% de magnésium. La chaux dolomitique est fabriquée à partir d'un calcaire dit dolomitique ou le carbonate de calcium est associé au carbonate de magnésium. La chaux dolomitique contient entre 35 et 46% d'oxyde de magnésium.

- **Chaux éteinte** : c'est une chaux produite par l'extinction contrôlée de la chaux vive par addition d'eau, elle est constituée principalement d'hydroxyde de calcium et éventuellement d'hydroxyde de magnésium.



Figure II. 3 : La chaux éteinte en poudre

b) Chaux hydrauliques

Les chaux hydrauliques sont produites :

- Soit à partir d'un calcaire contenant entre 12 et 20% d'argile donnant une chaux hydraulique naturelle (NHL).

- Soit par ajout de silice et d'alumine au calcaire lors de fabrication ainsi on aura une chaux hydraulique (HL).
- Si on ajoute à la chaux hydraulique naturelle des matériaux pouzzolaniques tel que le laitier et le clinker (maximum 20%) on obtient la chaux NHL-Z.
- Les chaux hydrauliques sont constituées de silicate de calcium, d'aluminate de calcium et d'hydroxyde de calcium, Elles font prises en deux phases :
- Une prise hydraulique : 70% à 80% en fonction du taux d'argile.
- Une prise aérienne par carbonatation : 20% à 30%. [22]

II.2.1.2. Avantages et inconvénients de stabilisation à la chaux

❖ Avantages de la stabilisation à la chaux

- Augmenter la résistance au cisaillement.
- Diminuer l'argilosité.
- Augmenter la résistance à la compression.
- Faciliter le compactage et la maniabilité.

❖ Inconvénients de stabilisation à la chaux :

- Emprunte carbone élevée (nocif pour l'environnement).
- Consommation élevée d'énergie de production.
- Epuisement des ressources naturelles en pierre calcaire.
- Il n'est pas efficace pour les sols sableux.
- Il y a pourcentage limite de la quantité de chaux nécessaire environ 2 à 10% du sol. [23]

II.2.2. STABILISATION AU CIMENT

Le ciment est un liant hydraulique fabriqué à partir du clinker broyé, obtenu par la combinaison chimique à très haute température de calcaire et d'argile. Des ajouts sont ensuite mélangés au clinker, dans des proportions très précises, qui donneront au ciment des caractéristiques spécifiques.



Figure II. 4: Les grandes étapes de la fabrication du ciment

La composition classique du mélange cuit dans les fours d'une cimenterie est de 80 % de calcaire et 20 % d'argile. Les deux éléments sont préparés par broyage, cuits à très haute température, puis le résultat (clinker) est à nouveau broyé. Les ajouts au clinker permettront d'optimiser les caractéristiques de prise et les caractéristiques mécaniques du ciment. On distingue ainsi 5 types de ciments, selon les constituants utilisés et leurs proportions. [24]

Tableau II. 1: Différents types de ciment en fonction de leur composition

	Cim. Portland	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pozzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
Clinker (K)	/95%	/80% ≤94%	/65% ≤79%	/35% ≤64%	/20% ≤34%	/5% ≤19%	/65% ≤90%	/45% ≤64%	/40% ≤64%	/20% ≤39%
Laitier (S)	*	6%≤	21%≤	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18% ≤30%	/31% ≤50%
Pouzzolanes (Z)	*	total	total	*	*	*	10% ≤ total	36% ≤ total	18%≤ total	31%≤ total
Cendre siliceuses (V)	*	≤20%	≤35%	*	*	*	≤35% (fumée ≤10%)	≤55% (fumée ≤10%)	≤30%	≤50%
Fumée de silice (D)	*	(fumée	(fumée	*	*	*	*	*	*	*
Cendres calciques (W)	*	de	de	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (I)	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*	≤10%)	≤10%)	*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

II.2.2.1. Avantages et inconvénients de stabilisation au ciment

❖ Avantages de stabilisation au ciment

- Largement disponible et durable.
- Coût est relativement faible.
- Très résistant aux intempéries.
- Réduit le potentiel de gonflement du sol.
- Couramment utilisé pour stabiliser les sols sableux et d'autres à faible plasticité. Le ciment interagit avec les fractions limon et d'argile et réduit leur affinité pour l'eau.

❖ Inconvénients de stabilisation au ciment

- Apparition des fissures.
- Nocif pour l'environnement.
- Temps de maniabilité très réduit. [25]

II.2.3. STABILISATION PAR D'AUTRES AJOUTS MINÉRAUX

II.2.3.1. Laitier de haut fourneau

Pour fabriquer de l'acier industriel, le minerai de fer aggloméré est chargé dans la partie supérieure du haut fourneau en couches alternées avec du coke, un combustible puissant proche du carbone pur fabriqué à partir de charbon. On insuffle de l'air chaud et du charbon pulvérisé dans le bas du haut fourneau à une température proche de 1200°C. Ceci provoque la combustion du coke qui entraîne la fusion du minerai, ainsi que la formation d'un gaz réducteur qui transforme les oxydes de fer du minerai en métal, formant ainsi du CO et du CO₂. On recueille alors la fonte liquide à 1500°C (environ 96% Fe et 4% C) et le laitier dans le bas du haut fourneau (Figure II.5).

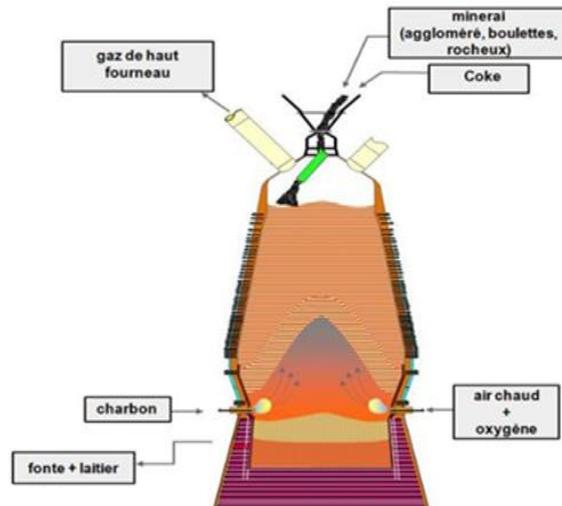


Figure II. 5: Schéma de principe d'un haut fourneau

Les constituants non-métalliques et/ou non absorbés par la fonte et non gazeux constituent le laitier de haut fourneau, qui est à l'état liquide. Il surnage car sa densité d'environ 3, est inférieure à celle de la fonte qui est de 7. La séparation de la fonte et du laitier se fait par un dispositif de siphonage. On peut obtenir deux types de laitiers de haut fourneau suivant le processus de refroidissement :

- Le laitier de haut fourneau est **crystallisé** lorsqu'il refroidit et se cristallise lentement à l'air sous forme de roche dure. Après le début de la solidification, ce laitier est arrosé afin d'en abaisser la température puis fragmenté, concassé et criblé.
- Le laitier de haut fourneau est dit **vitriifié**, s'il subit une trempe (arrosage violent et abondant d'eau sous haute pression). Le laitier en fusion trempé dans l'eau provoque son explosion et forme instantanément de fines particules vitreuses désordonnées.



Figure II. 6 : Agrégat de laitier de haut fourneau

On distingue deux types de laitiers vitrifiés :

- Le laitier vitrifié granulé, pour lequel le refroidissement se fait en bassin ou par jet d'eau sous pression. Le principe de la granulation est d'extraire le plus possible de chaleur d'une quantité de laitier fondu, en un minimum de temps.
- Le laitier vitrifié bouleté soumis à deux types d'actions, un jet d'eau et une action mécanique. Le laitier liquide se déverse sur un tambour tournant cannelé qui comporte des trous en périphérie, alimentés en eau sous pression. Les particules de laitiers sont alors projetées à plusieurs mètres du tambour, ce qui permet une trempe à l'air pendant la durée du trajet des particules. [26]

Tableau II. 2 : Composition chimique de laitier de haut Fournaux

Composition	Laitier	Clinker
CaO	28-46	60-70
SiO ₂	31-36	19-25
AL ₂ O ₃	9-18	2-9
MgO	4-10	0-3
Na ₂ O+K ₂ O	0.5-2	1-1.5

II.2.3.2. Fumée de silice

La fumée de silice est un résidu de l'industrie de fabrication de silicium et de ferro-silicium obtenus par réduction de quartz. Constituée de silicium réoxydé qui s'échappe de la chaîne de fabrication sous forme de fumée et qui est récupéré dans des filtres électrostatiques, elle se présente sous forme de fines particules sphériques, de diamètre moyen 0,1 µm. Sa surface spécifique est donc extrêmement élevée ; de l'ordre de 20000 m²/kg, contre environ 350 m²/kg pour le ciment. Sa masse volumique est d'à peu près 2,2 g/cm³. Elle contient essentiellement de la silice amorphe (≈ 90 %). Une faible teneur en résidu de carbone imbrulé lui confère sa couleur foncée. [27]



Figure II. 7 : Fumée de silice

II.2.3.3. Cendres volantes

Les cendres volantes sont définies comme des matériaux extraits des gaz de combustion d'un four chauffé avec les charbons. Les cendres volantes se présentent sous forme de poudre constituée essentiellement de particules sphériques (des microbilles). Les cendres volantes peuvent être considérées comme des limons fins non plastiques par la classification USCS. Elles n'ont pas de propriétés hydrauliques par elles-mêmes mais elles fixent la chaux libre pour former des composés qui possèdent les propriétés des liants hydrauliques.

Selon l'ASTM (American Society for Testing and Materials), les cendres volantes sont classées en 2 types suivant leurs compositions chimiques par :

- ❖ La classe "**F Fly ash**" est un produit de l'antracite et de charbon bitumineux en général. Ces cendres volantes sont pouzzolaniques dans la nature et elles comprennent moins de 10% de chaux (CaO). Selon les propriétés pouzzolaniques, la silice et l'alumine (Figure II.8) de la classe des cendres volantes F a besoin d'un agent de cimentation (le ciment Portland, la chaux) afin d'obtenir des composés cimentaires. D'ailleurs le produit chimique comme le silicate de sodium peut être l'agent de cimentation.
- ❖ La classe "**C Fly ash**" est un produit du lignite et de charbon sous-bitumineux sans les propriétés pouzzolaniques. Elles ont une certaine propriété cimentaire. Elles contiennent plus de 20% de chaux (CaO). La classe C n'a pas besoin d'activateur par rapport à la classe F parce que les valeurs des alcalins et du sulfate (SO_4) sont plus élevées dans la classe C. Mais la classe C durcira très longtemps avec de l'eau. [28]

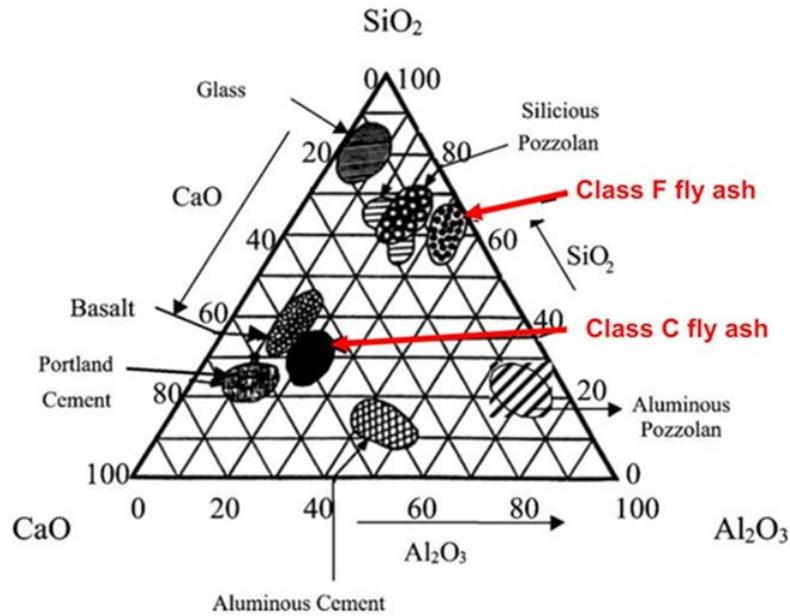


Figure II. 8: Diagramme ternaire de classification des cendres volantes (Fly Ash)

II.2.3.4. Pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes naturelles désignent au sens strict les pyroclastites ou pyroclastiques qui veut dire « brisé par le feu » [29], qui est une roche naturelle correspondant à des projections volcaniques. Sa couleur varie généralement du noir au rouge selon le degré d'oxydation du fer, présent respectivement sous forme de magnétique ou d'hématite [30]. Les pouzzolanes naturelles sont des produits essentiellement composés de silice SiO₂, d'alumine Al₂O₃ et d'oxyde de fer Fe₂⁺, présentant des propriétés pouzzolanique [31].

On peut citer comme exemples :

- Le tuf : substance pierreuse formée soit par des dépôts calcaires, soit par des cendres, des boues ou des débris volcaniques [32]. C'est un produit composé de la silice, l'alumine et l'oxyde de fer qui présentent naturellement des propriétés pouzzolaniques. Ils se forment dans l'eau de chaux c'est-à-dire en présence d'eau et d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) de composés silicates ou d'aluminates semblables à ceux formés lors du durcissement des matières hydrauliques (réaction pouzzolanique lente) [33].
- Les schistes calcinés : Le schiste bitumineux est une sédimentaire, qui contient des composants organiques combustibles. Les schistes calcinés sont produits dans un four spécial à une température d'environ 800 °C [34]. Ils contiennent principalement du

silicate bi-calcique (C_2S) et de l'aluminate Monocalcique (CA), de même que des petites quantités de chaux libre CaO et de sulfate de calcium, ainsi que SiO_2 , qui réagissent de façon pouzzolanique. Ainsi, les schistes calcinés finement broyés ont de fortes propriétés hydrauliques, (comme le ciment Portland) couplées à des propriétés pouzzolaniques [35].



Figure II. 9: Pouzzolane naturelle

II.2.3.5. Coquille d'œuf

En 2019, la production d'œufs au niveau mondial a été estimée par la FAO à plus de 66,4 millions de tonnes soit environ 1000 milliards d'œufs [36]. L'Algérie est un pays consommateur d'œufs et la valorisation des déchets d'œufs est un objectif intéressant. Une coquille d'œuf est un sous-produit animal, classé en catégorie, selon la réglementation européenne. En tant que tel, les coquilles peuvent être incinérées, subir un traitement thermique, être compostées ou être transformées en biogaz. Elles peuvent aussi servir à la production d'aliments pour les animaux de compagnie ou à la combustion de carburant (bien que leur valeur calorifique soit très faible). Mais elles peuvent aussi être utilisées ou éliminées par toute autre méthode qui empêche le risque biologique.

La valorisation de ces déchets serait à la fois bénéfique sur le plan environnemental et économique. Les applications industrielles se divisent en deux catégories : celles qui utilisent les coquilles comme matières premières et celles qui l'utilisent comme catalyseur ou sorbant. Dans le premier cas, cela peut être comme additif alimentaire pour l'homme ou les animaux ou comme amendement pour le sol. Il peut aussi servir à produire du carbonate de calcium purifié, ou un biomatériau composite pour des implants orthopédiques et dentaires. Enfin, les particules de coquilles peuvent remplacer les microbilles de plastique dans les cosmétiques.

Dans le second cas, il peut être utilisé comme catalyseur dans la production de biodiesel, l'isomérisation du lactose ou la synthèse du carbonate de diméthyle [37].



Figure II. 10 : Coquille d'œuf

Bensaifi a utilisé de la chaux de coquille d'œuf hydratée et du laitier de haut fourneau pour stabiliser une marne locale. Il a montré que le laitier de haut fourneau activé par la coquille d'œuf calcinée peut être utilisé comme liant efficace pour stabiliser les sols argileux [38]. Récemment, Consoli a étudié un mélange de chaux vive et éteinte de coquille d'œuf avec de la poudre de verre pour la stabilisation des sols. L'auteur a constaté que la chaux de coquille d'œuf possède des caractéristiques satisfaisantes pour les pratiques géotechniques et que sa combinaison avec le verre broyé constitue un nouveau liant. Quelques études récentes ont examiné les chaux en coquille d'œuf et leur utilisation pour différentes applications de génie civil [39].

II.2.3.6. Les zéolithes

Les zéolithes sont des aluminosilicates cristallins et poreux, résultant de l'assemblage de tétraèdres SiO_4 et AlO_4 joints par les atomes d'oxygène qu'ils partagent [40]. Cette structure cristalline crée un réseau de pores de tailles uniformes qui distingue les zéolithes des autres matériaux microporeux. [41]

Les zéolithes sont naturelles ou synthétiques, à ce jour, 55 zéolithes naturelles sont connues, et plus de 170 types de zéolithes ont été synthétisées.

❖ Zéolithes naturelles

Les zéolithes naturelles (figure II.11) se forment sur des terrains où les roches et les cendres volcaniques ont réagi avec les eaux souterraines alcalines et aussi dans les couches de

dépôts organiques des bassins superficiels [42]. Généralement cette réaction a duré de 50 ans à 50.000 ans et une température favorable entre 27 °C et 55 °C avec un pH entre 9 et 10. [43] Parmi les zéolithes naturelles, une petite dizaine existe dans des gisements suffisamment importants pour être exploités à grande échelle dans des carrières. Les zéolithes naturelles contiennent généralement des impuretés : quartz, minéraux métalliques... (Impuretés variables d'un gisement à l'autre), qui affectent leurs propriétés physico-chimiques. C'est pourquoi, les zéolithes naturelles sont exclues de nombreuses applications industrielles. [42]



Figure II. 11 : Photos d'une zéolithe naturelle

❖ Zéolithe synthétique

Depuis les années 1980, les zéolithes de synthèse ont remplacé progressivement les zéolithes naturelles. Ces zéolithes se trouvent principalement sous forme de poudre (figure II.28) ou de grains mais d'autres mises en forme sont en cours de développement pour diminuer la perte de charge, augmenter la surface spécifique et développer les réseaux macroporeux [44]. Les zéolithes synthétiques présentent l'avantage d'être très pures et de structure uniforme par rapport à leurs analogues naturels. Le processus de synthèse des zéolithes, appelé encore zéolithisation, correspond à la transformation d'un mélange de composés aluminiques et siliciques, de cations de métaux alcalins, éventuellement de molécules organiques et d'eau en un aluminosilicate cristallin microporeux, via une solution alcaline super saturée. [42]



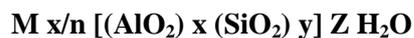
Figure II. 12 : Zéolithe synthétique

Tableau II. 3 : Classification des zéolithes en fonction du rapport Si/Al

Degré de Zéolithe	Rapport molaire Si/Al	Certains des noms minéraux communs et leurs codes-cadres
Teneur faible en silice	≤ 2	Analcime (ANA), Cancrinite (CAN), Na-X (FAU), Natrolite (NAT), Phillipsite (PHI), Sodalite (SOD)
Teneur moyenne (intermédiaire) en silice	2-5	Chabazite (CHA), faujasite (FAU), mordenite (MOR), Na-Y (FAU)
Teneur élevé en silice	>5	ZSM-5(MFI), zéolithe-b (BEA)

❖ *La composition des zéolithes*

La composition des différentes zéolithes est proche de celle des argiles, leur formule générale est :



Où :

M : représente un cation échangeable de valence n.

X : représente le nombre d'atome d'aluminium.

Y : représente le nombre d'atomes de silicium ($y/x \geq 1$).

Z : représente de molécules d'eau par maille.

Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est l'une des variables qui détermine le degré de polymérisation des espèces aluminosiliciques. Il intervient à la fois dans la composition de la charpente, dans la structure de la zéolithe et dans sa cinétique de cristallisation. Le changement de rapport Si/Al de la zéolithe change aussi la teneur en cations, moins il y a d'aluminium, moins il y a de cations échangeables. Les zéolithes les plus riches en silice sont de nature hydrophobe et manifestent une affinité pour l'hydrocarbure. [45]

❖ *Structure des zéolithes*

La structure des cristaux de la zéolithe est constituée d'un assemblage de tétrades SiO_4 et AlO_4 reliés les uns aux autres par la mise en commun d'un atome d'oxygène. Structurellement les zéolithes sont formées par des unités de construction primaire et secondaire [46].

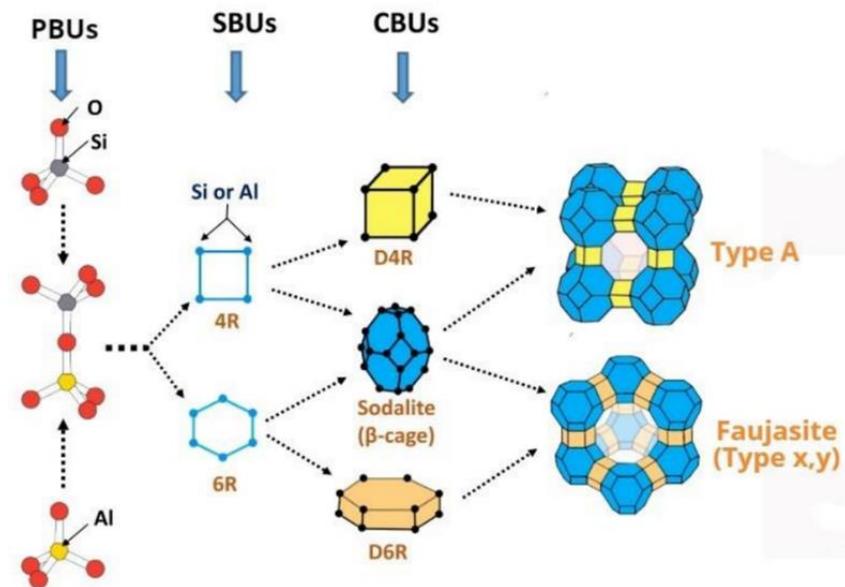


Figure II. 13: Représentation schématique des différentes unités structurales constituant les zéolithes

II.3. STABILISATION DES SOLS PAR DES POLYMERES NATURELS

II.3.1. DIFFERENTS TYPES DE FIBRES NATURELLES

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, par exemple dans l'ancienne Égypte, où la paille et d'argile étaient mélangés pour construire des murs. Au cours de la dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant auprès du monde universitaire que de diverses industries. Il existe

une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges. (Figure II.14)

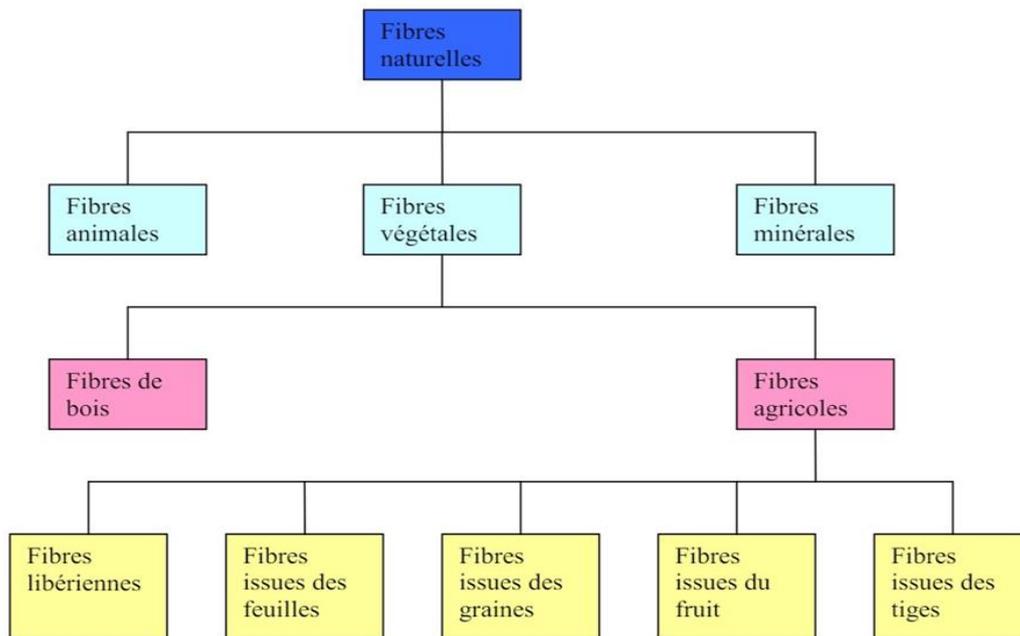


Figure II. 14 : Classification des fibres naturelles

Les principales catégories de fibres agricoles sont :

- Fibres libériennes : extraites de la partie extérieure de la tige (lin, chanvre, jute, kéraf, ramie...)
- Fibres extraites des feuilles : fibres de sisal, de bananier, de palmier...
- Fibres extraites de poils séminaux des graines : fibres de coton, de kapok...
- Fibres extraites de l'enveloppe du fruit : fibres de coco...
- Fibres extraites des tiges ou des troncs : paille de blé, de riz, diss, d'orge ou d'autres cultures telles que le bambou...

Les fibres naturelles contiennent principalement de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine. Il existe aussi, en faible proportion, des constituants extractibles comme les protéines ou encore des composés inorganiques. La proportion d'holocellulose (comprenant la cellulose et l'hémicellulose) et de lignine varie selon les fibres naturelles et l'âge de ces fibres. La composition dépend de la condition de croissance, de l'âge du végétal, des conditions climatiques et bien sûr de la nature des fibres. [47]

Tableau II. 4: Composition des fibres naturelles

Fibres	Cellulose (%)	Lignine (%)	Hémicellulose (%)	Pectine (%)	Cendre (%)
Fibres de tige :					
Bambou	46-58	20-22	16-20	8-10	-
Kénaï	37-49	15-21	18-24	-	2-4
Jute	41-48	21-24	18-22	-	0,8
Fibres d'écorce / libériennes :					
Fibres de lin :					
Fibres de lin	71	2,2	18,6-20,6	2,3	-
Kénaï	31-57	15-19	21,5-23	-	2-5
Jute	45-71,5	12-26	13,6-21	0,2	2-5
Chanvre	57-77	3,7-13	14-22,4	0,9	0,8
Ramie	68,6-91	0,6-0,7	5-16,7	1,9	-
Fibres de feuillage :					
Abaca	56-63	7-9	15-17	-	3
Sisal	47-78	7-11	10-24	10	0,6-1
Henequen	77,6	13,1	4-8	-	-

Chaque fibre se présente sous la forme d'un composite multicouches dans lequel la lignine joue le rôle d'une matrice enrobant l'élément structurant très rigide qu'est la cellulose (Figure II.15).

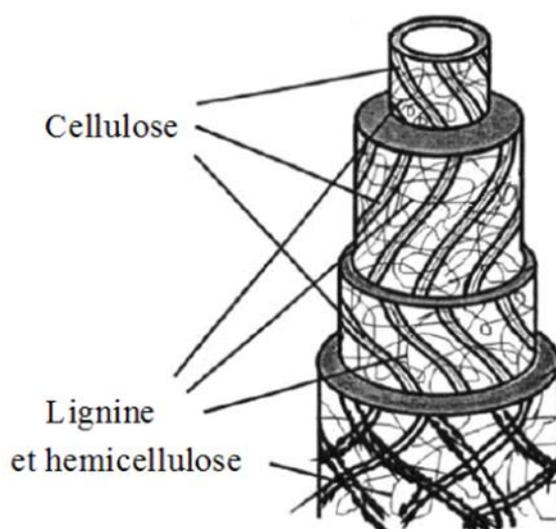


Figure II. 15 : Structure du bois

II.3.2. FIBRE DE BAMBOU

Le bambou est une herbe dont le nom scientifique est Gramineae (Poaceae). Il fait partie de la sous-famille des Bambusoideae et de la branche des Bambuseae [48].

Il existe plus de 1200 espèces de bambou distribuées à travers le monde, mais principalement en Asie et en Amérique du Sud. Les bambous sont très faciles à cultiver, très appropriés pour les régions tropicales et subtropicales, ils poussent en touffes, ont une reproduction unisexuée et une durée de vie de 5 à 20 ans. Le bambou est l'espèce la plus ancienne et il fait partie des plantes les plus répandues et les plus utilisées dans le monde. Sa croissance est parmi les plus rapides : 20 à 60 cm par jour et 1 - 6 m en 1 an. Il est mûr en 4 ans, et utilisable après une année de croissance. La croissance naturellement rapide du bambou est un avantage pour sa culture et son utilisation sans influence négative sur l'écosystème. [49]

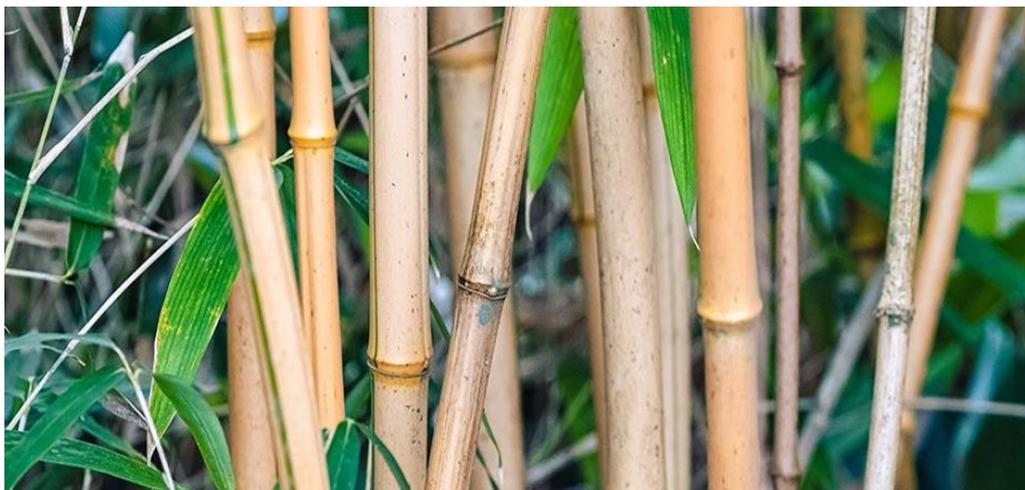


Figure II. 16: Photo des tiges de bambou

II.3.2.1. Composition chimique du bambou

La composition chimique du bambou est similaire à celle du bois. Les principaux constituants des tiges de bambou sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, qui représentent plus de 90% de la masse totale. Une étude de la composition chimique de bambous âgés d'un, deux et trois ans indiquent que la teneur en holocellulose ne varie pas beaucoup avec l'âge du bambou.

Le bambou contient d'autres composants organiques, en plus de la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Il contient environ 2 à 6% d'amidon, 2% de saccharide désoxydé, 2 à 4% de matières grasses, et 0,8 à 6% de protéines. Le bambou contient également des

composants mineurs comme des résines, des cires, des tanins et des sels inorganiques [50]. Le bambou est connu pour être sensible aux attaques de champignons et d'insectes mais la résistance du bambou à la moisissure, aux champignons et aux insectes est fortement associée à sa composition chimique. [49]

II.3.2.2. Propriétés des fibres

La structure, les dimensions des cellules, les défauts, et la composition chimique des fibres sont les principales variables qui conditionnent l'ensemble des propriétés des fibres. En règle générale, la résistance à la traction et le module d'Young des fibres croît avec l'augmentation de la teneur en cellulose. [47]

Tableau II. 5 : les propriétés physiques des fibres naturelles les plus courantes

Fibre	Contrainte à la rupture (MPa)	Module d'élastique (GPa)	Déformation (%)	Densité (g/cm ³)
La soie d'araignée	1300-2000	~30	28-30	1,3
Lin	500-900	50-70	1,5-4,0	1,45
Chanvre	350-800	30-60	1,6-4,0	1,48
Kénaf	400-700	25-50	1,7-2,1	1,3
Jute	300-700	20-50	1,2-3,0	1,3
Bambou	500-740	30-50	~2	1,4
Sisal	300-500	10-30	2-5	1,5
Fibre de coco	150-180	4-6	20-40	1,2
Fibre de verre	1200-1800	72	~2,5	2,5
Carbone	~4000	235	~2	1,4

II.4. TECHNIQUE DE STABILISATION DE SOL SUR LE TERRAIN

II.4.1. PREPARATION DU SOL

- **Décohésion du sol en place** : Si nécessaire, cette opération foisonne le sol, favorisant soit son séchage par évaporation, soit son humidification par arrosage. Elle facilite le travail des malaxeurs, augmentant ainsi leur rendement. Le cas échéant, elle contribue à l'élimination des blocs gênants. Elle s'effectue à la défonceuse à dents, montée sur boteur ou niveleuse.
- **Élimination des éléments trop gros** : Les dimensions maximales admissibles sont d'environ 100 mm pour un malaxage en place, 50 mm pour un malaxage en centrale.

L'élimination de la fraction grossière s'effectue surtout par criblage, parfois par ramassage mécanisé, voire, pour les petits chantiers, manuellement.

- **Homogénéisation des matériaux** : Elle s'effectue au cours de l'extraction et du chargement, avec parfois mise en dépôt provisoire et reprise.
- **Amélioration de l'état hydrique** : Si le sol en place est trop humide et les conditions météorologiques favorables, on le laisse quelque peu sécher après scarification. Si, au contraire, il est trop sec, on l'arrose une fois scarifier. L'arrosage avec enfouissement est efficace (garantie d'homogénéité de la teneur en eau) et respectueux de l'environnement (préservation des ressources en eau). Les volumes d'eau nécessaires peuvent être très importants pour certains sols argileux ou silteux secs. Si nécessaire, la teneur en eau est ajustée en cours de malaxage.



Figure II. 17 : Scarification des sols

II.4.2. ÉPANDAGE DU LIANT

L'épandage manuel (sacs répartis) est proscrit, hormis sur des petits chantiers difficilement accessibles aux engins. Les épandeurs à utiliser doivent disposer d'un système de dosage asservi à la vitesse. Sur les chantiers les plus « pointus », il est souhaitable d'avoir un (ou des) épandeur(s) disposant en plus d'un système de réglage pondéral. L'épandeur choisi doit être capable d'épandre le dosage surfacique de liant prévu en une seule passe. L'exécution de l'épandage doit être très soignée, en opérant par bandes adjacentes jointives. Bien évidemment, les systèmes d'aide à la conduite (GPS, systèmes d'alertes automatisés, enregistrements et affichages des données, etc.) améliorent la qualité de l'épandage.



Figure II. 18 : Epannage du liant

II.4.3. MALAXAGE EN PLACE

Le malaxage doit s'effectuer au pulvimalaxeur par bandes parallèles avec un léger recouvrement. L'obtention de la profondeur de malaxage visée et sa régularité sont des facteurs essentiels de réussite. La configuration des pulvimalaxeurs actuels, avec la chambre de malaxage située au centre de l'engin, entre les essieux, permet de les maîtriser. Un léger compactage entre deux passes de malaxage aide à obtenir et réguler la profondeur de travail. [51]



Figure II. 19 : Malaxage du liant avec le sol avec pulvimalaxeur

II.4.4. COMPACTAGE

Il a pour objet l'obtention de valeurs de compacité, notamment en fond de couche, conformes à celles prises en compte dans l'étude du dimensionnement de la structure. Il doit se faire également en deux séquences (compactage partiel et compactage final) séparées par l'opération de réglage final. [52]



Figure II. 20: Compactage aux compacteurs à pneus et cylindrique

II.4.5. REGLAGES

Le pré réglage s'effectue généralement à la niveleuse, de plus en plus souvent guidée par laser. Le réglage fin est une phase-clé de la mise en œuvre des couches de forme, au cours de laquelle on réalise le nivellement précis et, si nécessaire, on enlève la partie feuilletée. Il s'exécute à la niveleuse pour les petits chantiers, à la raboteuse ou à l'autograde sur les plus grands. Là encore, le guidage sans contact s'est généralisé.

Le réglage doit être exécuté avec soin et précision, avec une tolérance de ± 3 cm par rapport au profil théorique. On est parfois amené à adapter la couche de forme en épaisseur et/ou en formulation pour compenser un léger écart de nivellement de l'arase de terrassements. [51]

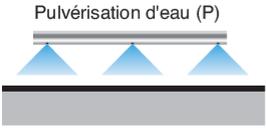
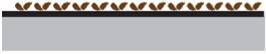


Figure II. 21: Réglage d'une couche compactée avec niveleuse

II.4.6. PROTECTION SUPERFICIELLE

La protection de la surface concerne uniquement la couche de forme traitée. Cette protection est indispensable, pour empêcher, d'une part l'évaporation de l'eau (très préjudiciable à la prise du liant) et d'autre part la pénétration d'eau dans la couche traitée (qui risque d'affecter sa portance). En outre, la surface de la couche doit être protégée contre les agressions du trafic de chantier. La protection a aussi pour rôle d'éviter les émissions de poussières sous ce trafic [51]. Cette protection superficielle doit être réalisée dans les plus brefs délais après le compactage final [53].

Tableau II. 6 : Protection de la surface du sol traité

Appellation - Schéma	Formulation (par m ²)	Commentaires
Pulvérisation d'eau (P) 	1 à 2 litres d'eau éventuellement additionnée d'un produit hydrophile (Cl ₂ Ca)	Nécessité de répandre l'eau sous forme finement pulvérisée. Opération à renouveler dès que la surface s'est asséchée et qu'il y a à nouveau formation de poussières.
Enduit de cure par voile d'émulsion (EC) 	0,5 à 0,8 kg d'émulsion* + sable propre ou petits gravillons à refus**	Le sable peut être utilisé uniquement en l'absence de trafic lourd sur la couche de forme (cf. tableau C2-VII).
Enduit de scellement (ES) 	0,8 à 1,1 kg d'émulsion* + sable propre ou petits gravillons à refus**	Protection similaire à (EC) mais plus efficace contre la dessiccation si la durée d'exposition est importante (cf. tableau C2-VI).
Enduit monocouche (EM) 	1,3 à 1,6 kg d'émulsion* + 7 à 8 litres de gravillons 4/6** ou 9 à 10 litres de gravillons 6/10**	Le choix du gravillon dépend de l'agressivité du trafic. Le taux d'émulsion peut être augmenté de 5 à 10 % suivant la rugosité du support.
Enduit bicouche (EB) 	1^{ère} couche : 1,1 à 1,3 kg d'émulsion* 10 à 11 litres de gravillons 10/14** 2^e couche : 1,5 kg d'émulsion* 6 à 7 litres de gravillons 4/6**	L'ajustement de la quantité d'émulsion de la première couche doit être réalisé en fonction de la rugosité du support.
Enduit prégravillonné (EP) 	8 à 9 litres de gravillons 10/14** + 2 kg d'émulsion* + 6 à 7 litres de gravillons 4/6 **	Cette protection est comparable à celle obtenue par l'application d'un enduit monocouche sur une plate-forme préalablement cloutée.
* Masse surfacique donnée pour une émulsion cationique à 65 % de bitume ** Les gravillons doivent avoir un coefficient Los-Angeles ≤ 35 et une propreté (% ≤ 0,08 mm) ≤ 2 %		

II.5. CONCLUSION

Au cours de ce chapitre, nous avons exposé une synthèse bibliographique sur le traitement chimique et les différents types de polymères. Le but consistait à exposer les produits de traitement, leur production, leur utilisation, le principe d'action de ces produits et les techniques de réalisation des traitements.

**CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE DE
TRAITEMENT DE MARNE**

CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE DE TRAITEMENT DE MARNE

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats du travail que nous avons effectué au laboratoire. Tout d'abord, nous rappelons les objectifs de notre travail ainsi que la démarche expérimentale mise en place pour répondre aux objectifs fixés. Notre travail consiste d'abord à effectuer des essais d'identification de la marne argileuse, ces essais ont permis de classer notre sol. Ensuite, nous étudions le comportement mécanique et géotechnique de la marne traitée avec le mélange de la coquille d'œuf et la zéolite ainsi que la fibre de bambou. Les résultats des essais de caractérisation géotechniques ainsi que des essais de compression non confinée, les essais de cisaillement rectiligne et les essais oedométriques sont présentés et discutés.

III.2. OBJECTIFS ET DEMARCHE EXPERIMENTALE

Le but du travail exposé dans ce chapitre consiste à analyser le comportement d'une marne argileuse lorsqu'il est réutilisé, après traitement, dans un remblai routier. Nous nous appuyons sur des expériences de laboratoire effectuées sur des échantillons d'un sol provenant de la ville de MILA exactement Sidi-Marouane. L'emploi de ce genre de matériau naturel dans les remblais comporte des dangers tels qu'une résistance mécanique faible, le tassement, le glissement...etc. Dans cette optique, nous avons décidé de traiter ce sol avec un nouveau produit contenant de la chaux de coquille d'œuf et la zéolite en ajoutant des fibres de bambou. Pour cela nous avons :

- Réaliser des essais CBR pour déterminer l'évolution de la masse volumique sèche et l'Indice Portant Immédiat (IPI) du sol traité avec et sans bambou. Ce paramètre permet de déterminer la portance du sol après sa mise en œuvre en remblai.
- Réaliser des essais de compression non confinée pour déterminer la résistance du sol traité et renforcé par des fibres de bambou afin de mettre en évidence l'effet des fibres sur le comportement du sol.

- Réaliser des essais de résistance au cisaillement à la boîte sur la marne naturelle et traitée avec bambou à différents dosages pour déterminer la résistance au glissement des talus du remblai.
- Enfin, effectuer l'essai eodométrique sur sol traité afin de déterminer le potentiel de tassement (consolidation) et de compressibilité pour différents dosages ce qui permet d'évaluer le comportement de tassement du corps d'un remblai construit avec ce matériau traité.

III.3. CARACTERISATION DE LA MARNE

III.3.1. INDENTIFICATION DU SOL

III.3.1.1. Teneur en eau naturelle du sol (NF-P94-050)

La détermination la teneur en eau pondérale des matériaux consiste à calculer le rapport du poids d'eau que le sol contient au poids de ses éléments secs, après dessiccation à l'étuve à 105° C.

Nous avons besoin de l'appareillage suivant :

- Une tare.
- Etuve (50° C, 105°C).
- Balance.

L'échantillon de matériau humide est pesé puis placé dans l'étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (correspondant alors à la masse du matériau sec).

Résultats

Les résultats de l'essai réalisés sur notre marne sont synthétisés dans le tableau suivant :

Tableau III. 1: Résultats de la teneur en eau

N° d'essai	Essai 1	Essai 2
Masse humide (g)	304	300
Masse sèche (g)	258	254
W (%)	17,8	18,1
W (%) moyenne	17,95	

III.3.1.2. Limites d'Atterberg (NF P 94 – 051)

L'essai est réalisé sur la fraction inférieure à 0.4 mm. Les limites de liquidité et de plasticité sont les teneurs en eau pondérales correspondant à des états particuliers d'un sol.

- Limite de liquidité (w_L) : est teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique.

- Limite de plasticité (w_P) : est teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide.

- Indice de plasticité (I_P) : est la différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique ($I_P = w_L - w_P$).

III.3.1.2.1. Limite de liquidité

Mode opératoire

- Imbiber l'échantillon dans un récipient, tamiser l'échantillon au tamis de 0.40 mm (passant 0.40 mm) par siphonage, et récupérer le tamisât.
- Sécher le matériau dans une étuve réglée à 105 °C.
- Humidifier le matériau de nouveau à la teneur en eau visée.
- Placer l'échantillon de marne dans la coupelle et tracer un sillon avec l'outil à rainurer.
- Calculer le nombre de coup nécessaire pour la fermeture de 1 cm des lèvres de la rainure.
- Prélever à l'aide d'une spatule deux échantillons des levers de la rainure dans des godets qu'on pèse puis le porter à l'étuve.
- Calculer la limite de liquidité après répétition de la manipulation pour différentes teneurs en eau visées.

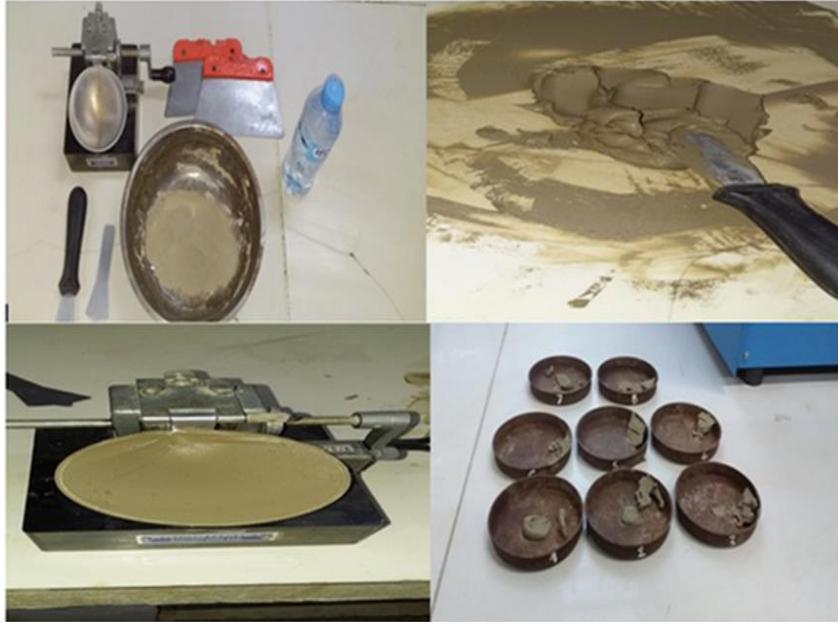


Figure III. 1: Essai de détermination de la limite de liquidité

Résultats

Par convention, la limite de liquidité est la teneur en eau du matériau qui correspond à fermeture de 1 cm des lèvres de la rainure après 25 chocs. Les résultats de l'essai sont synthétisés dans le tableau suivant :

Tableau III. 2 : Résultats de la limite de liquidité.

N° essai	1		2		3		4	
Nombre de coups	17		22		28		34	
Poids total humide	18,20	18,40	18,80	18,20	18,20	18,30	18,30	18,20
Poids total sec	16,70	16,90	17,30	16,80	16,80	16,90	17,00	16,90
Poids de la tare	13,50	13,60	14,00	13,50	13,50	13,50	13,60	13,70
W (%)	46,90	45,50	45,50	42,40	42,40	41,20	38,20	40,60
W moyennes	46,20		43,90		41,80		39,40	
Limite de liquidité	42,97 %							

La Limite de liquidité est la teneur qui correspond à un nombre de 25 coups, donc : **WL=42,97%**. Les résultats du tableau sont présentés sous forme de graphe dans la figure suivante :

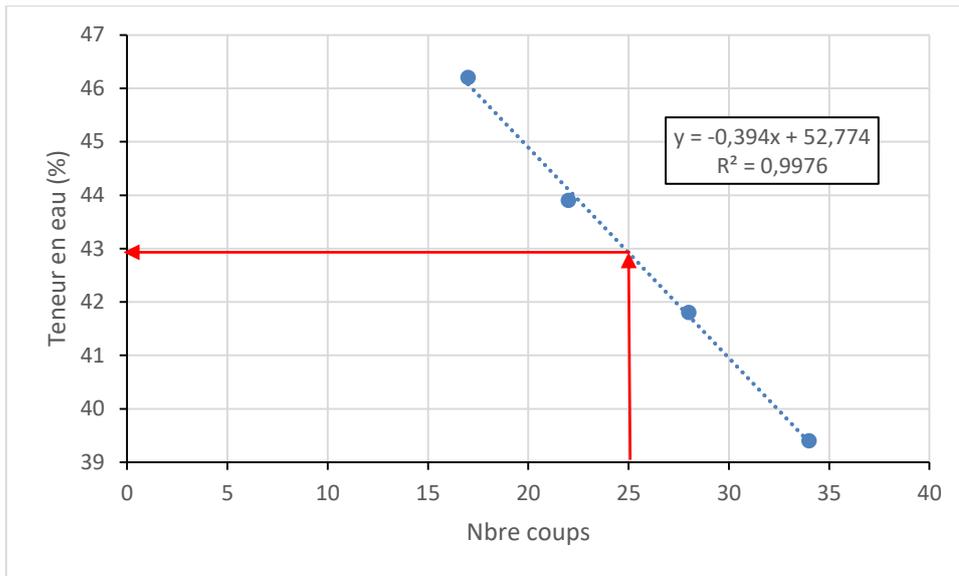


Figure III. 2 : Détermination de la limite de liquidité

III.3.1.2.2. Limite de plasticité

A partir d'une boulette, on roule à la main sur un plan, un rouleau aminci jusqu' à 3 mm de diamètre sur une longueur de 10 à 15 cm. La limite de plasticité est atteinte lorsque le rouleau soulevé par le milieu de 1 à 2 cm se fissure.

- Prélever les échantillons qu'on pèse puis on les porte à l'étuve.
- Humidifier l'échantillon à la teneur en eau visée.
- Déterminer la limite de plasticité.
- Calculer l'indice de plasticité.



Figure III. 3 : Détermination de la limite de plasticité

Résultats

Les résultats de l'essai de la limite de plasticité sont synthétisés dans le tableau suivant :

Tableau III. 3: Résultats de la détermination de la limite de plasticité

N° essai	2	3	4
Poids total humide (g)	13,30	14,70	14,40
Poids total sec (g)	12,80	14,10	13,90
Poids de la tare (g)	9,00	10,10	11,20
W (%)	13,16	15,00	18,52
W _p moyennes (%)	15,56		

Enfin, le calcul de l'indice de plasticité nous donne : $I_p = 42,97 - 15,56 = 27 \%$.

III.3.1.3. Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068)

Le but de ce l'essai au bleu de méthylène est pour de révéler la présence des fines de nature argileuse et d'en détermine la concentration. L'appareillage utilisé est composé de :

- Un dispositif de dosage avec une baguette de verre.
- Un agitateur mécanique avec récipient cylindrique.
- Papier filtre blanc.
- Tamis de maille 5mm.
- Solution de bleu de méthylène de 10g/l et eau distillée.
- Balance et chronomètre.

Mode opératoire :

- Additions successives de bleu à grands pas (5cm³) suivies immédiatement du test de la tâche.
- Additions successives de bleu à pas fins (2cm³) suivies toujours immédiatement du test de la tâche.
- Fin de dosage : répétition de minute en minute du test de la tâche qui doit rester positif pendant 5 min consécutives.



Figure III. 4: Essai au bleu de méthylène

Résultats

Les résultats de l'essai de bleu de méthylène sont résumés dans le tableau III.4.

Tableau III. 4 : Résultat de l'essai VBS

Poids sol (g)	60
Fraction 0/5mm	100
Volume bleu (ml)	185
Masse bleu (g)	1,85
VBS	3,08

III.3.1.4. Granulométrie par tamisage et sédimentation

La granulométrie par tamisage à voie humide consiste à séparer par lavage les grains d'un matériau fin puis à les fractionner au moyen d'une série de tamis et à peser après séchage le refus de chaque tamis.

En complément de l'analyse par tamisage, l'analyse granulométrique par sédimentation est réalisée après Récupérer le tamisât de la marne (passant au tamis 0.08 mm).

La courbe granulométrique totale par tamisage et par sédimentation est représentée dans la figure ci-dessous.

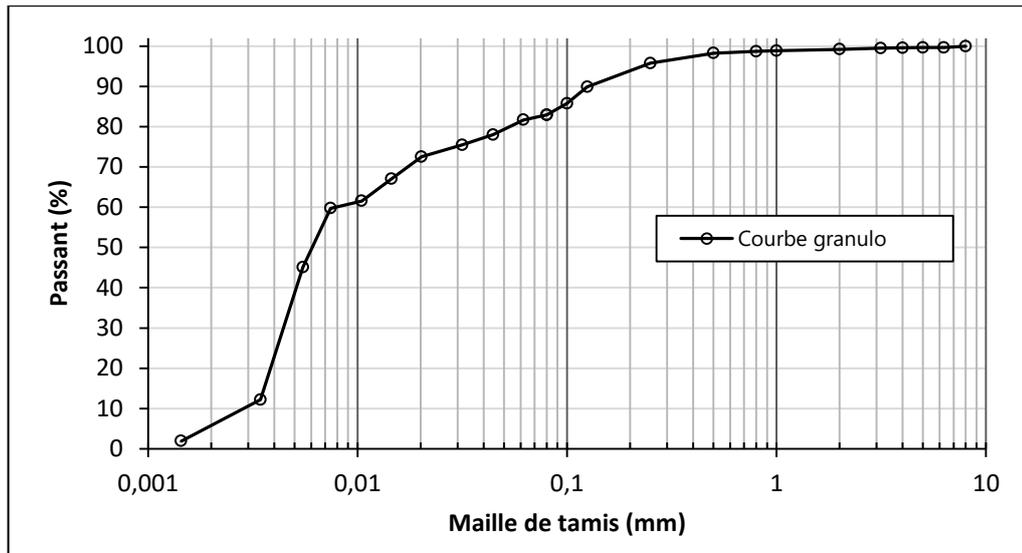


Figure III. 5 : Courbe granulométrique par tamisage et sédimentation de la marne

III.3.2. CLASSIFICATION DU SOL

En se basant sur les caractéristiques déjà identifiées, le tableau ci-dessous présente la classification de notre marne en fonction des deux systèmes : GTR et USCS.

Tableau III. 5 : Classifications de la marne de Mila

Classifications	Classes
GTR	A2 Marne peu plastique
USCS	Ap Argile peu plastique

III.4. CHOIX DES MELANGES DU SOL

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des dosages en liant, proportion entre la coquille et zéolite, pourcentage volumique du bambou et le temps de cure appliqués pour les essais effectués. Ces derniers ont été réalisés à la teneur en eau 21% (état humide).

Il faut préciser que les essais CBR réalisés à 7 jours de cure sans l'ajout de fibre de bambou ont servi de base pour le choix du dosage à appliquer pour les autres essais avec ajout de bambou (compression, cisaillement et oedomètre). Les trois dosages en liant coquille - zéolithe à savoir 4%, 6% et 8% ont permis de répondre aux performances recherchées en termes de valeur IPI > 20 toute en restant dans la limite des dosages économiquement rentable pour un traitement de sol.

Tableau III. 6 Classifications de la marne de Mila

Essais	Temps de cure	Dosage total (Coquille + Zéolite)	Proportion (Coq – Zéo)	Pourcentage volumique du bambou
CBR (IPI) Avec mesure de ρ_d	7 j	0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%	100c-0z 90c-10z 70c-30z	0%
		4%, 6%, 8%	70c-30z	1%
Compression	28 j	4%, 6%, 8%	70c-30z	1%
Cisaillement	28 j	0%, 4%, 6%, 8%	70c-30z	1%
Odomètre	0 j	%0, 4%, 6%, 8%	70c-30z	1%

III.5. TRAITEMENT DU SOL

III.5.1. EFFET DU TRAITEMENT AU LIANT SEUL SUR ρ_d ET IPI

III.5.1.1. Mode opératoire

Dans un premier temps, le sol + liant (chaux de coquille + Zéolite) est compacté selon les modalités de l'essai Proctor Normal dans le moule CBR c-à-dire en 3 couches et 56 coups pour chaque couche. Une fois terminer la surface du moule est arrasée puis l'ensemble moule + sol est pesé pour déterminer ρ_d .



Figure III. 6 : Compactage du sol

Par la suite, l'indice Portant Immédiat IPI est déterminé par détermination de la résistance au poinçonnement. Le sol compacté dans le moule est placé sur la presse en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et procédé au poinçonnement de manière suivant :

- Approcher, la surface supérieure de l'éprouvette vers le piston, jusqu'à ce que le piston vienne affleurer le matériau.
- Exécuter le poinçonnement à la vitesse de pénétration à 1.27 mm/min.
- Enregistrer les lectures obtenus du poinçonnement.
- Répéter l'essai pour des différents dosages.



Figure III. 7 : Poinçonnement du sol

III.5.1.2. Résultats et discussions

Les résultats de ρ_d et IPI pour différents dosages et différentes proportions (coq – Zéo) sont présentés dans les figures ci-après.

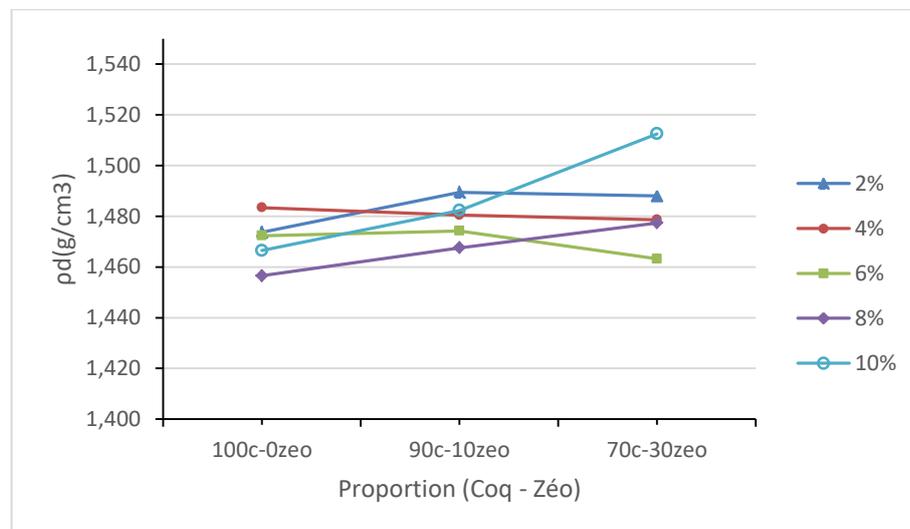


Figure III. 8: Valeurs ρ_d en fonction des proportions Coq -Zéo pour différents dosages

A partir des valeurs de ρ_d , on observe qu'il y a très peu de variation de la masse volumique sèche pour l'ensemble des dosages et proportions de coquille – Zéolite. Le sol au dosage de 4% semble se compacté mieux par rapport aux autres dosages à la proportion 100 – 0 de coquille – zéolite. En revanche, le dosage 2% semble le mieux à 90 – 10 de proportion et le dosage 10% à 70 – 30. L'étendu entre les différentes valeurs de ρ_d est très limité (entre 1,45 et 1,51 g/cm³).

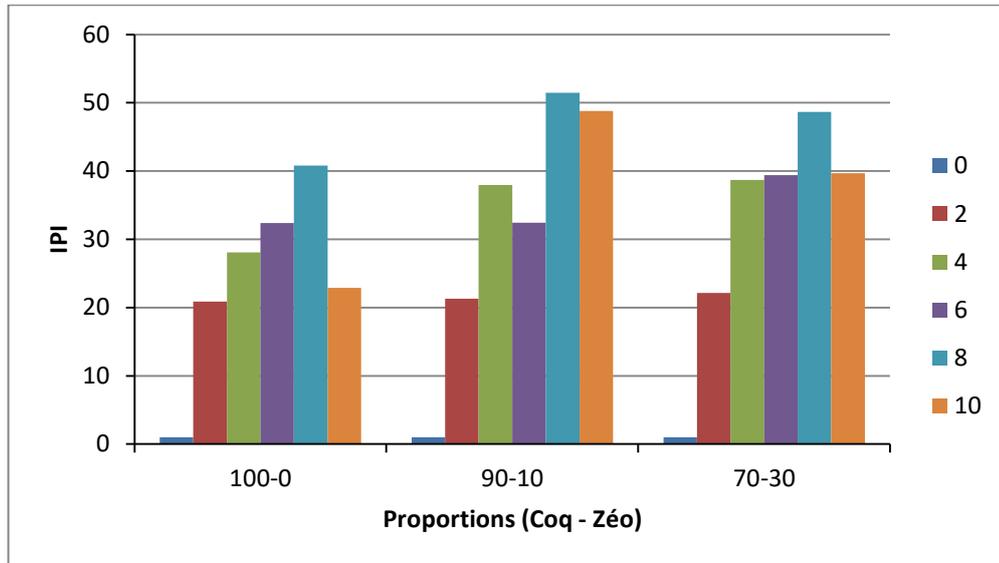


Figure III. 9 : Valeurs IPI en fonction des proportions coq – Zéo pour différents dosages

Pour les valeurs de la portance, on constate qu'il y a une augmentation de l'indice de portant immédiat (IPI) en fonction de l'augmentation des dosages entre 2% et 8% puis une diminution à 10% pour l'ensemble des proportions coquille - Zéolite. Ce constat montre l'effet positif du traitement pour les dosages inférieurs à 8% et à l'inverse à 10% sous l'effet du surdosage en liant.

Pour un même dosage en liant, on remarque qu'il y a peu d'influence d'ajout de la zéolite à la coquille pour le dosage 2%. En revanche et pour les autres dosages (4%, 6%, 8% et 10%) on remarque l'effet positif de l'ajout de la zéolite et les meilleurs résultats sont obtenus pour les proportions 90 – 10 et 70-30.

III.5.2. EFFET COMBINE DU TRAITEMENT AU LIANT ET DES FIBRES SUR ρ_d ET IPI

L'effet combiné du traitement au liant et aux fibres de bambou a été également examiné afin de mettre en évidence l'effet du renforcement du sol par cette fibre sur la masse

volumique sèche et la portance du sol. Les résultats de ρ_d et IPI pour trois dosages et les différentes proportions (coq – Zéo) sont présentés dans les figures ci-après.

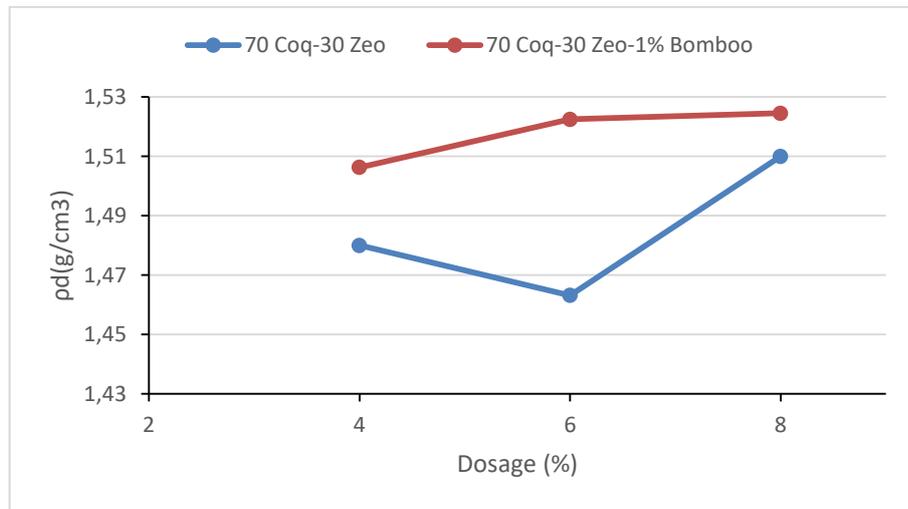


Figure III. 10 : Comparaison des ρ_d avec et sans fibre de bambou

A partir des résultats, on constate que les masses volumiques sèches du sol traité et renforcé par bambou sont légèrement supérieures à celles du sol traité seul. Ce résultat montre l'effet positif des fibres sur le compactage du sol. La fibre de bambou permet un réarrangement meilleur des particules du sol et donc un meilleur compactage.

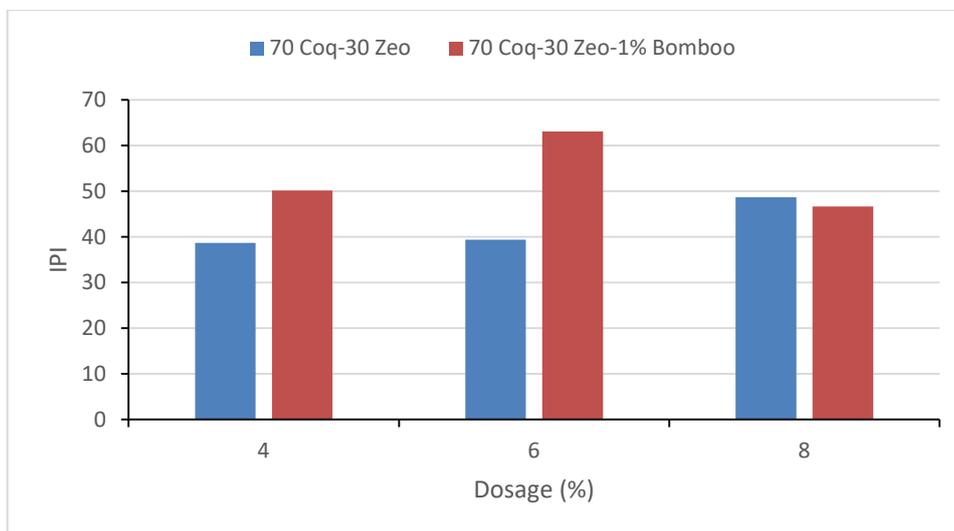


Figure III. 11: Comparaison des IPI avec et sans fibre de bambou

Si notre sol est traité avec un mélange coquille + zéolithe + fibres, on remarque que IPI est supérieur à celui du sol traité à la coquille + zéolithe seule pour les dosages 4% et 6%. Ce résultat indique que les fibres apportent un renforcement supplémentaire et la coquille+zéolithe créent une meilleure liaison entre les particules du sol pour ces deux dosages. Pour le

dosage de 8% en liant, on constate une diminution de la valeur d'IPI ce qui peut être expliquer par l'effet inverse du surdosage du mélange et sa réaction avec la fibre de bambou.

III.5.3. ESSAI DE COMPRESSION NON CONFINÉE

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 en compression, notée R_c s'effectue à 28 jours de cure.

III.5.3.1. Mode d'opérateur

Les éprouvettes soumises aux essais de compression sont de forme cylindrique. Elles ont été confectionnées dans un moule en PVC spécialement conçu pour nos essais. Le moule a les dimensions suivantes : $H=15\text{cm}$ et $\varnothing= 7,5\text{cm}$. Au total, 8 éprouvettes ont été confectionnées pour les trois dosages 4%, 6% et 8%. La technique de fabrication se déroule selon les étapes suivantes :

- Le sol a été mis en premier lieu à l'étuve pour séchage pendant une période de 24 heures.
- La marne a été mélangée à sec avec les produits de traitement (liant seul, liant+ bambou).
- Ajouter une quantité d'eau et malaxer jusqu'à l'obtention d'un mélange parfaitement homogène.
- Compacter le mélange selon le mode de compactage statique à l'aide de la presse UNIFRAME.
- Le compactage a été fait en deux couches, la première couche 2/3 de la masse totale (de chaque mélange), et la 2ème couche 1/3 de la masse totale.
- Après le démoulage, les éprouvettes ont été immédiatement scellées à l'aide d'un papier film afin de prévenir l'évaporation de l'eau contenu dans les mélanges.
- A l'échéance des temps de cure (28 jours), les essais de compression simple ont été réalisés selon la norme NF P94-077.
- Prendre les dimensions de l'éprouvette à l'aide d'un pied à coulisse (la hauteur et le diamètre sont pris quatre fois selon deux directions).
- L'éprouvette du sol est placée sur le plateau d'une presse à chargement axial. Après la mise en contact des deux plateaux de la presse avec l'éprouvette, le chargement axial est appliqué avec une vitesse de déplacement constante de 1,00 mm/min

- La force maximale (F_{max}) de 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.



Figure III. 12 : Photos des éprouvettes durant la cure et au cours d'essai

III.5.3.2. Résultats et discussions

Les résultats des écrasements des éprouvettes à 28 jours pour les deux mélanges (sol+liant ; sol+liant+bambou) sont présentés dans la figure suivante.

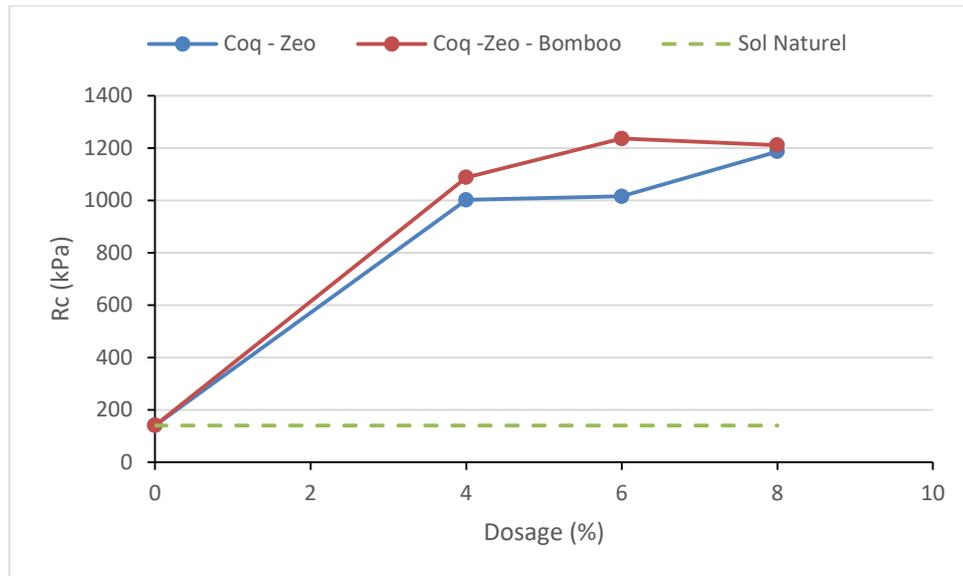


Figure III. 13: Evolution de Rc en fonction du dosage avec et sans bambou

Globalement, on constate qu'il y a une amélioration de la résistance à la compression en fonction de l'augmentation des dosages pour les deux mélanges coquille-Zéolite et coquille-Zéolite-Bambou. Pour le sol sans renforcement au bambou, la résistance se stabilise entre les dosages 4% et 6% puis elle augmente de nouveau à 8%. Par contre pour le sol avec fibre de bambou, la résistance se stabilise entre 6% et 8%. Le sol traité et renforcé avec fibre présente une meilleure résistance à 4% et 6% (20% de plus) par rapport au sol traité sans fibre. Les deux mélanges avec et sans fibre de bambou convergent à la même résistance au dosage 8%. Les résistances dépassent 1 MPa de résistance à la compression à partir de 4% de dosage.

Les rapports d'amélioration de la résistance de la marne traitée par rapport à la résistance de la marne naturelle pour les deux mélanges sont environ entre 7 à 9 fois par rapport la résistance à la compression initiale. Ce résultat montre l'effet bénéfique de l'ajout de l'agent de traitement sur la portance de la marne.

Les résultats obtenus peuvent être expliqués par le fait que lorsqu'on traite le sol par la coquille-zéolithe seul, ce mélange agit comme un agent liant, ce qui renforce la matrice du sol et augmente sa résistance à la compression. En revanche et lorsqu'on rajoute les fibres de bambou, les fibres renforcent le sol en agissant comme des armatures internes. Elles empêchent la fissuration et la fragmentation du sol, ce qui améliore sa résistance à la compression, surtout pour les charges dynamiques. L'ajout de fibres peut rendre le sol plus ductile, c'est-à-dire augmenter sa capacité à se déformer avant rupture. Cela permet au sol de

mieux absorber l'énergie des charges appliquées, ce qui contribue à améliorer sa résistance à la compression.

III.5.4. ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE

III.5.4.1. But de l'essai

L'essai de cisaillement rectiligne réalisé à la boîte fournit les paramètres de cisaillement du sol qui sont la cohésion (C) et l'angle de frottement interne (ϕ). La cohésion est la résistance au cisaillement sous contrainte normale nulle appelée aussi résistance propre du sol (due aux liaisons physico-chimiques). L'angle de frottement est l'angle de glissement grain sur grain qui dépend de l'état de compacité du sol pour les sols grenus et de la nature minéralogique des grains pour les sols fins.

III.5.4.2. Appareillage de l'essai

L'appareillage spécifique de l'essai comprend (figure ci-dessous) : le bâti, la boîte de cisaillement, le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette, le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boîtes, le système de mesure des efforts, des déplacements et du temps.



Figure III. 14 : Appareille de cisaillement

III.5.4.3. Préparation des éprouvettes

Le travail a permis de confectionner 24 éprouvettes préparées pour les trois dosages 4%, 6% et 8%. Les essais de cisaillement rectiligne ont été réalisés pour le mélange Marne + Coquille 70% + zéolite 30% + Bambou 1%.

Les échantillons de marne naturelle et traitée sont préparés comme précédemment c-à-dire avec une teneur en eau $w=21\%$. Le mélange sol-liant-fibre bambou a été directement

mélangé avec la quantité d'eau et bien mélangés manuellement jusqu'à ce que le mélange devienne homogène.



Figure III. 15 : Préparation des éprouvettes

Pour que les échantillons soient compactés à la masse volumique maximale désirée, les mélanges ont été confectionnés par compression statique et reconstitués sous forme d'éprouvettes de 2 cm de hauteur et de section (6×6) cm en utilisant la machine de compression CBR. Le compactage consiste à appliquer par l'intermédiaire d'un piston, un effort vertical exercé sur le mélange. Les parois intérieures de la boîte doivent être couvertes d'une couche de graisse afin de réduire les frottements mélange-moule et d'éviter la fracture de l'éprouvette lors de son extraction de la boîte de cisaillement. Cette dernière peut se faire manuellement après compactage. On utilise un piston ayant le même diamètre que le diamètre intérieur du moule pour faire glisser l'éprouvette vers l'extérieur. On détermine ensuite son poids et ses dimensions.

Après démoulage, les échantillons ont été immédiatement sellés avec un film plastique pour prévenir d'éventuelles pertes d'humidité et de les éloigner de tout contact avec l'air ambiant. La maturation est assurée au laboratoire à température ambiante. Il faut noter que les éprouvettes sont confectionnées pour une période de cure de 28 jours. Nous avons préparé deux éprouvettes pour chaque dosage afin de prendre en considération l'incertitude de mesure.



Figure III. 16 : Préparation des éprouvettes

III.5.4.4. Cisaillement des éprouvettes

A la fin de la période de cure (28 jours), des essais de résistance au cisaillement sont effectués. L'éprouvette est introduite dans la boîte de cisaillement rectiligne qui comprend deux parties : la partie inférieure fixe (immobile) et la partie supérieure mobile. Un effort normal vertical est appliqué tout le long de l'essai sur l'éprouvette en utilisant des masses et un bras de levier. Les masses de 3,6 kg, 7,2 kg et 10,8 kg permettent respectivement d'appliquer un effort normal vertical de 1, 2 et 3 Bar.



Figure III. 17 : Cisaillement des éprouvettes dans la boîte de Casagrande

III.5.4.5. Résultats

A partir des mesures d'effort de cisaillement effectuées sur des échantillons de de sol, nous avons calculé les contraintes de cisaillement. Les courbes contraintes de cisaillement - déplacement et contraintes de cisaillement – contraintes normales sont présentées sur les figures ci-dessous.

a) *Marne naturelle*

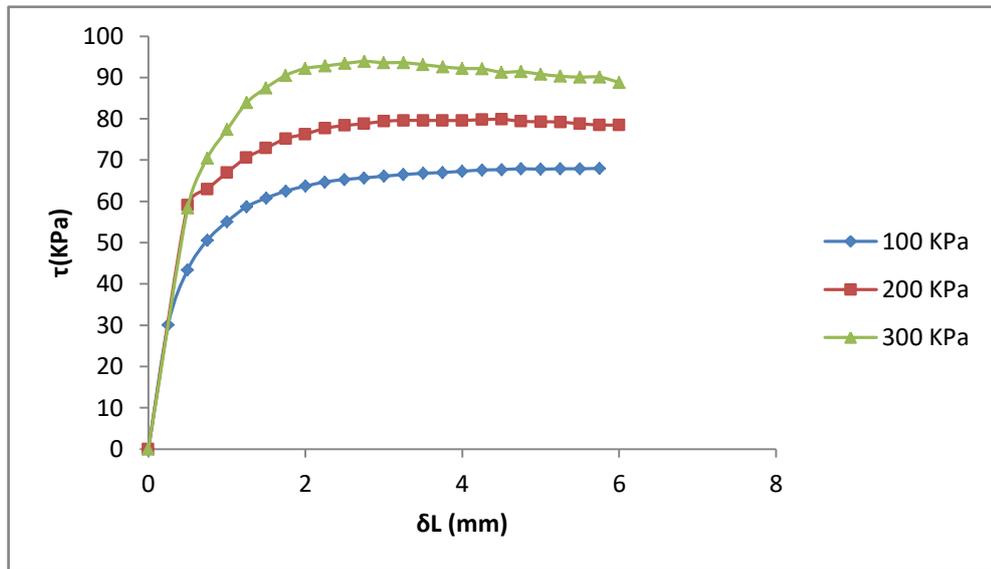


Figure III. 18 : Courbe contrainte de cisaillement-déplacement de la marne naturelle

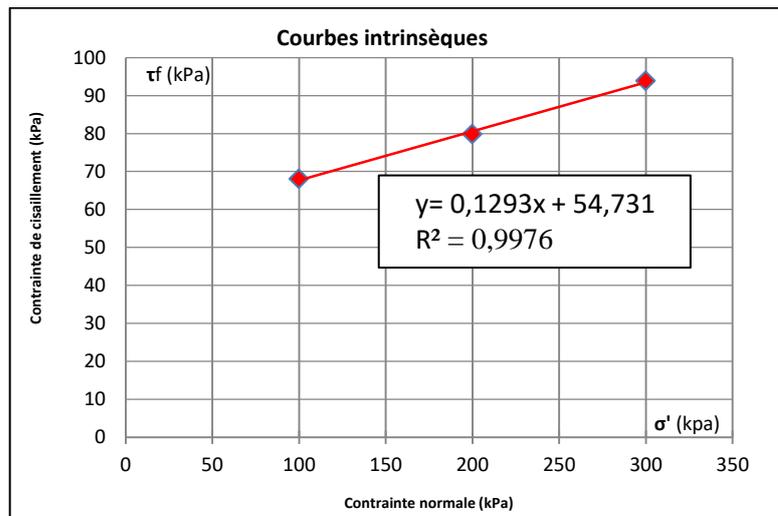


Figure III. 19 : Courbe contrainte cisaillement - contrainte normal de la marne naturelle

b) *Marne traité à 4%*

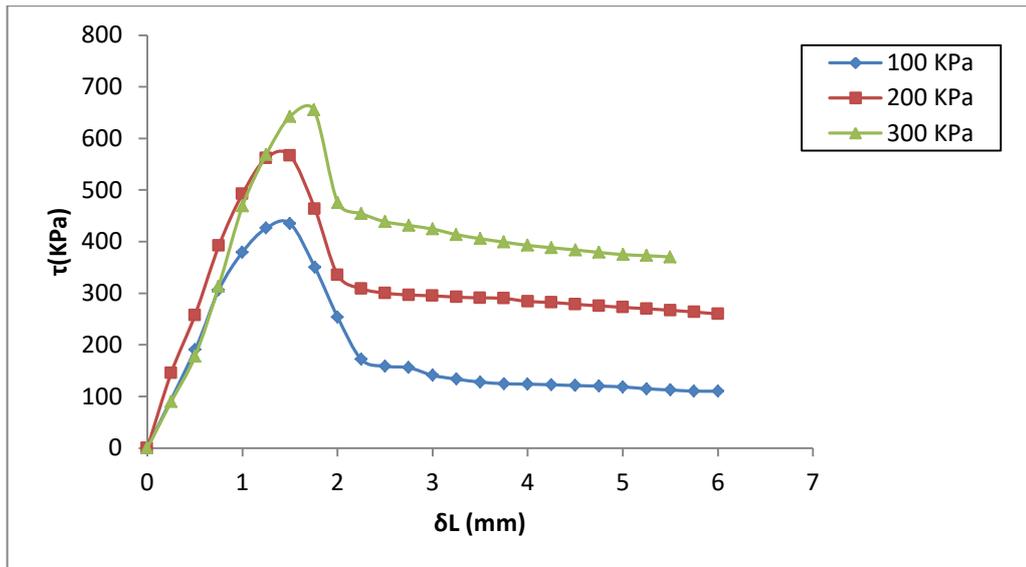


Figure III. 20: Courbe contrainte cisaillement-déplacement de la marne traitée à 4%

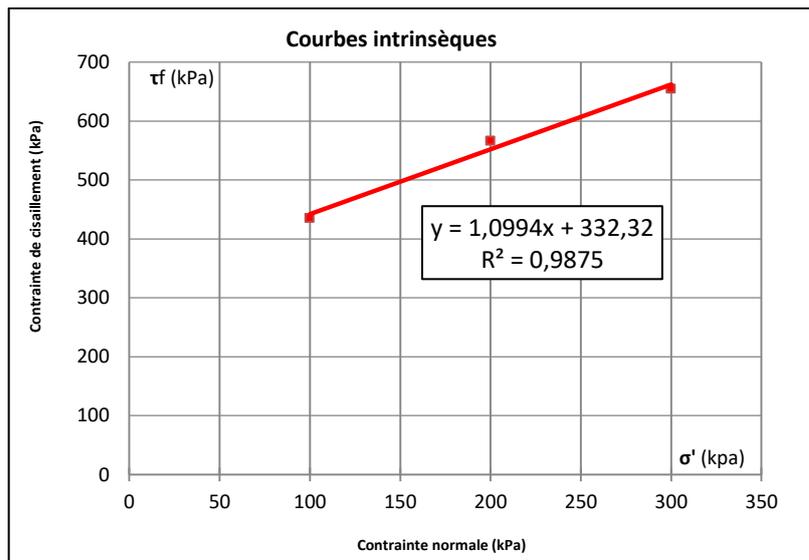


Figure III. 21: Courbe contrainte cisaillement - contrainte normal de la marne traitée à 4%

c) Marne traité à 6%

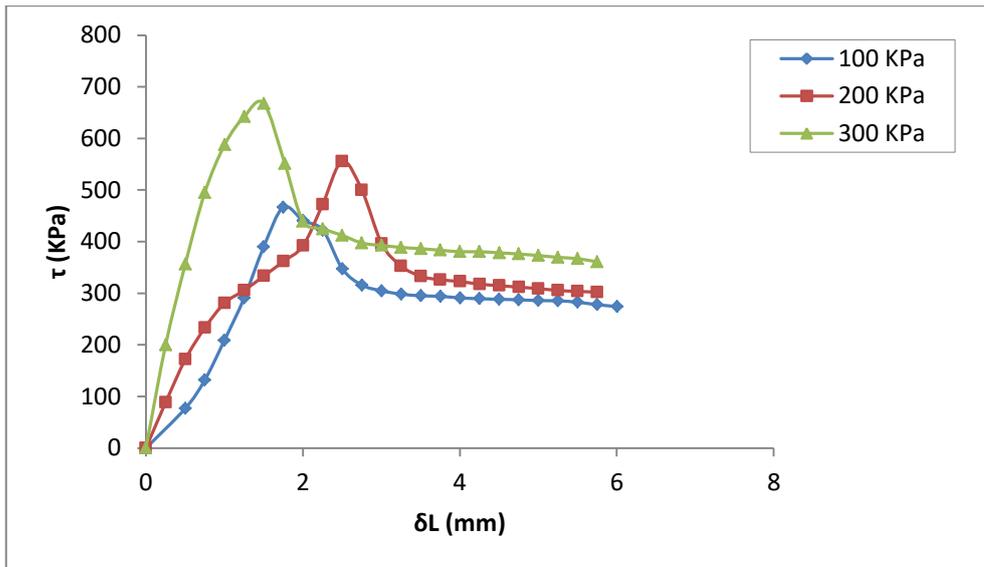


Figure III. 22 : Courbe contrainte cisaillement-déplacement de la marne traitée à 6%

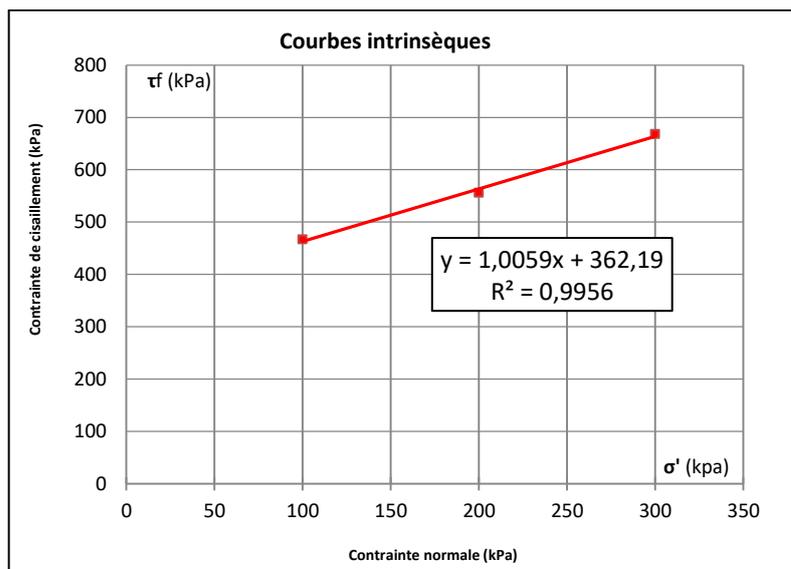


Figure III. 23 : Courbe contrainte cisaillement - contrainte normal de la marne traitée à 6%

d) Marne traité à 8%

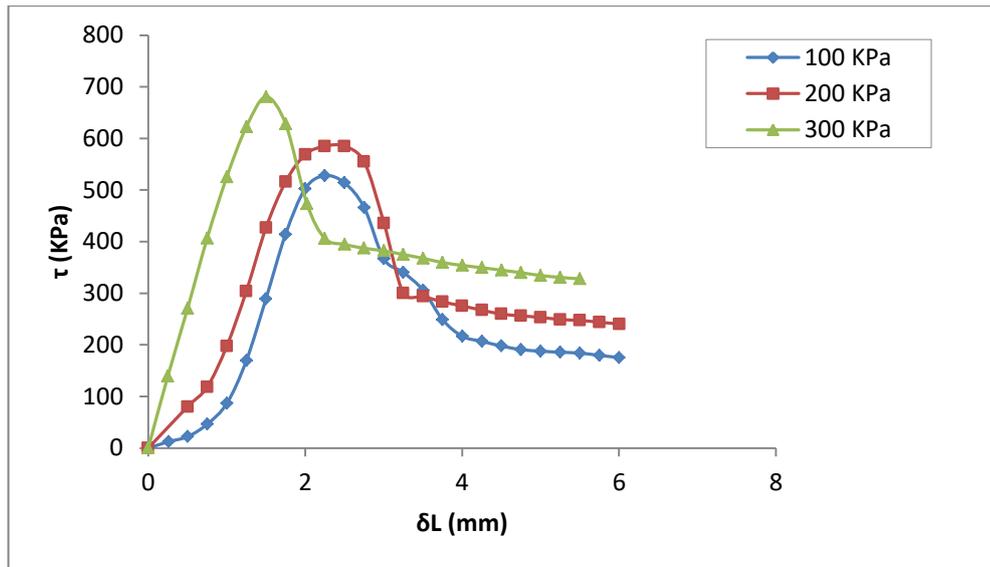


Figure III. 24 : Courbe contrainte cisaillement-déplacement de la marne traitée à 8%

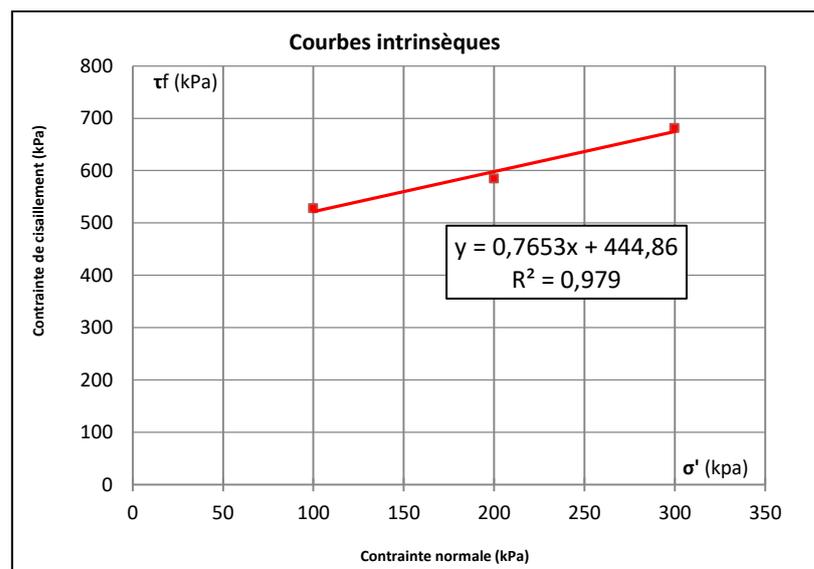


Figure III. 25 : Courbe contrainte cisaillement - contrainte normal de la marne traitée à 8%

III.5.4.6. Analyse des résultats

Nous avons synthétisé dans le tableau suivant les résultats obtenus des angles de frottement et les cohésions afin de mettre en évidence l'effet de traitement et le dosage en liant sur les paramètres de cisaillement. De plus et pour mieux illustrer les résultats un graphe est présenté dans la figure suivante.

Tableau III. 7 : Angle de frottement et la cohésion à différents dosages

Paramètre	Marne naturelle	4%	6%	8%

C (kPa)	52	332,32	362,19	444,86
Φ (°)	8,19	47,71	45,16	37,42

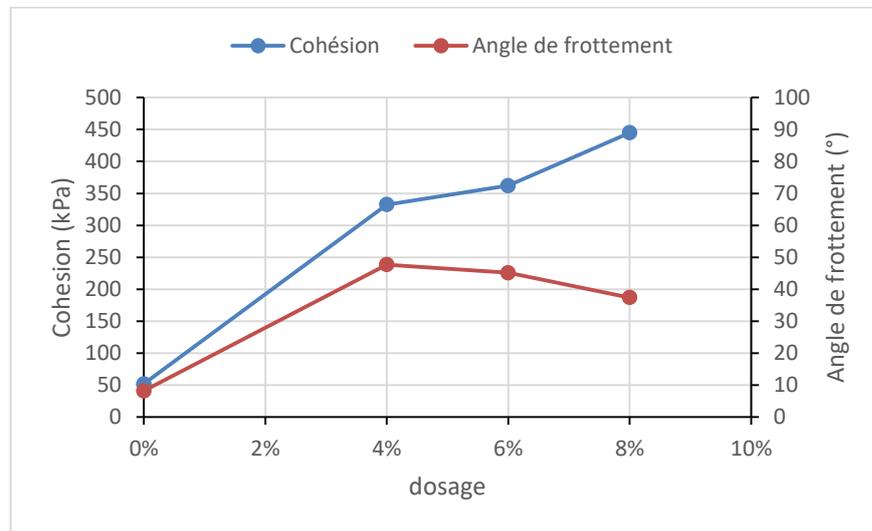


Figure III. 26 : Evolution de l'angle de frottement et la cohésion en fonction du dosage

A partir de la figure, on remarque une augmentation de la cohésion en fonction de l'augmentation du dosage. Cette augmentation cohésion peut s'expliquer par plusieurs mécanismes, notamment :

- **Liaison des particules du sol** : le liant utilisé à créer des liaisons chimiques et physiques entre les particules du sol, ce qui renforce la structure du sol et augmente sa cohésion.
- **Remplissage des pores** : Le liant joue le rôle de remplissage les pores du sol, ce qui réduit la porosité et augmente la densité du sol. Un sol plus dense est généralement plus résistant au cisaillement.
- **Modification des propriétés physico-chimiques du sol** : Le liant modifie les propriétés physico-chimiques du sol, ce qui peut influencer sa cohésion.

En revanche, l'angle de frottement augmente à 4% puis diminue légèrement à 6% et 8%. Cette augmentation de l'angle de frottement est généralement attribuée aux liaisons créées entre les particules du sol sous l'effet de liant qui augmentent la rugosité surfacique de contact et améliorent l'accrochage entre elles. Ceci se traduit par une résistance accrue au cisaillement, menant à un angle de frottement plus élevé. L'effet de remplissage des vides peut également contribuer à l'augmentation de l'angle de frottement. La fibre de bomboou peut

jouer le rôle de renfort pour la matrice sol-liant et contribue à l'amélioration de l'angle de frottement.

La diminution légère de l'angle de fortement à 6% et 8% peut être attribuer aux raisons suivantes :

- **Changements dans la structure du sol :** L'ajout excessif de produit stabilisant peut modifier la structure du sol de manière défavorable, en créant des agglomérats ou des fissures fragiles. Ces modifications structurelles peuvent réduire la résistance au cisaillement et l'angle de frottement.
- **Effets physico-chimiques :** Des interactions physico-chimiques complexes peuvent se produire entre le produit stabilisant et le sol à des dosages élevés, pouvant entraîner des effets négatifs sur la résistance au cisaillement et l'angle de frottement.

Par la suite, nous avons présenté les contraintes de cisaillement maximales pour l'ensemble des essais dans la figure suivante. D'après l'histogramme, on constate une augmentation significative de la contrainte de cisaillement maximale en fonction de la contrainte normale. Cela nous indique qu'il y a une amélioration des propriétés mécaniques du sol et donc une meilleure aptitude à résister aux déformations de cisaillement.

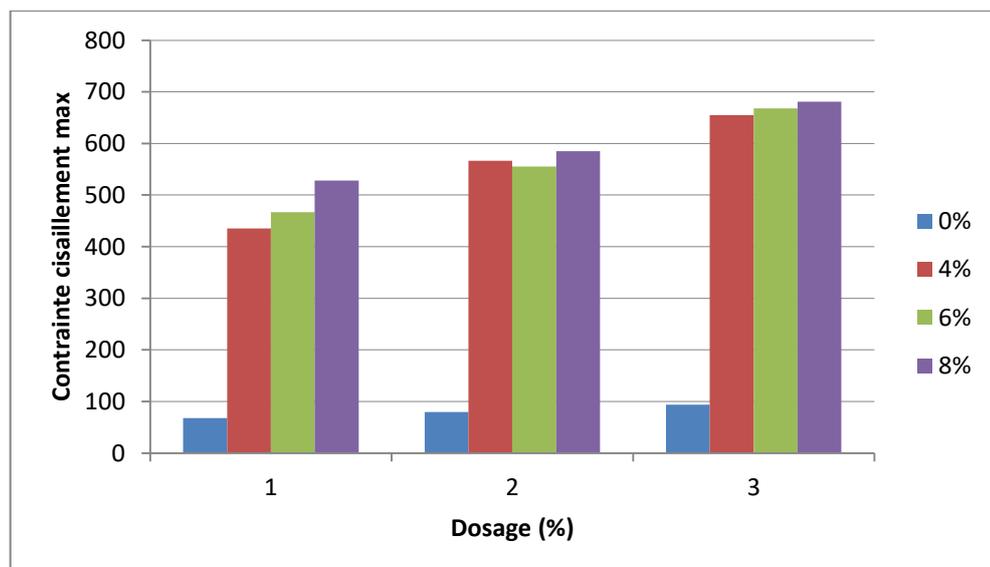


Figure III. 27 : Résistances au cisaillement maximales (τ_{max}) avant et après traitement

III.5.5. ESSAI OEDOMETRIQUE (XP P94-090-1)

III.5.5.1. But de l'essai

Le but est de mesurer le tassement au cours du temps d'une éprouvette cylindrique (intacte) type galette placée dans une cellule sans déformation latérale possible au fur et à mesure de l'application de différentes charges verticales constantes.

III.5.5.2. Mode opératoire

L'essai s'effectue en utilisant l'appareil oedométrique. Un dispositif applique sur l'éprouvette de sol un effort axial vertical, l'éprouvette étant drainée en haut et en bas et maintenue saturée pendant l'essai (voir figure).

La charge est appliquée par palier maintenus constants successivement croissants et décroissants suivant un programme défini. Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge.

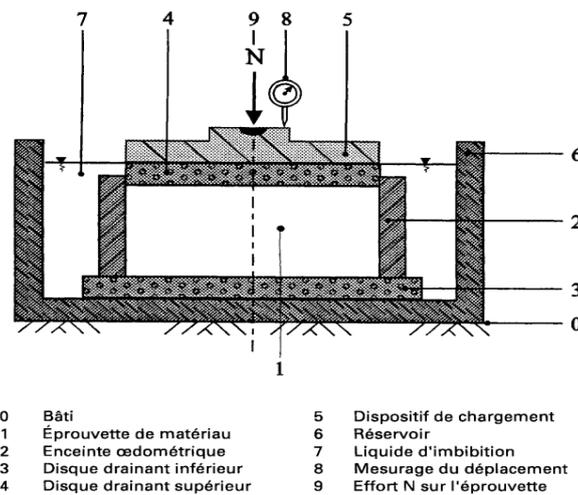


Figure III. 28 : Principe de l'essai



Figure III. 29 : Photos de l'oedomètre

III.5.5.3. Résultats et discussions

Les résultats des essais sont présentés sous forme des graphes dans les figures suivantes. A partir de ces courbes de compressibilité, nous avons déterminé l'indice de compression C_c , indice de gonflement C_s et coefficient de gonflement C_g . Les valeurs de ces trois paramètres sont données dans le tableau suivant.

Tableau III. 8 : Valeurs des indices C_c et C_s et coefficient de gonflement C_g

Dosage	C_c (%)	C_g (%)	C_s
0%	53,82	3,61	1,06
4%	26,58	4,07	0,76
6%	17,27	0,33	1,47
8%	13,95	0,26	0,74

A partir des valeurs de C_c nous pouvons conclure que le sol naturel se trouve dans un état de compressibilité moyenne ($30 < C_c < 70\%$). Après traitement au liant et fibre, le C_c diminue inférieure à 30% ce qui montre une compressibilité faible.

Par rapport au gonflement, les valeurs de C_g montrent que le sol naturel est dans état non gonflant ($C_g < 5\%$). Après traitement au liant et fibre de bambou, le C_g reste quasi-constant au dosage de 4% puis il diminue inférieure à $C_g=1\%$ pour les dosages 6% et 8% ce qui montre un potentiel de gonflement très faible après traitement.

a) Marne naturelle

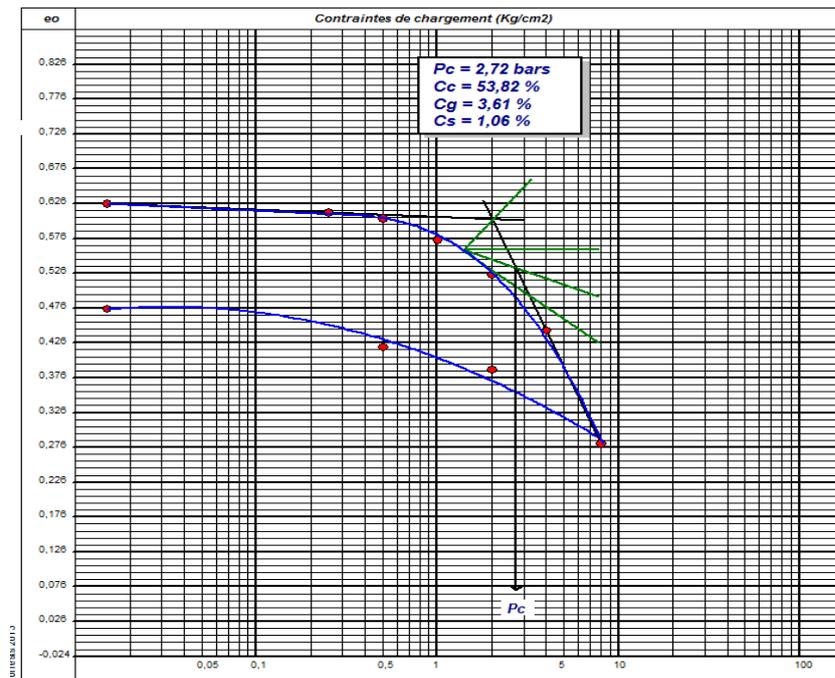


Figure III. 30 : Courbe de compressibilité oedométrique du sol naturel

b) *Marne traité à 4%*

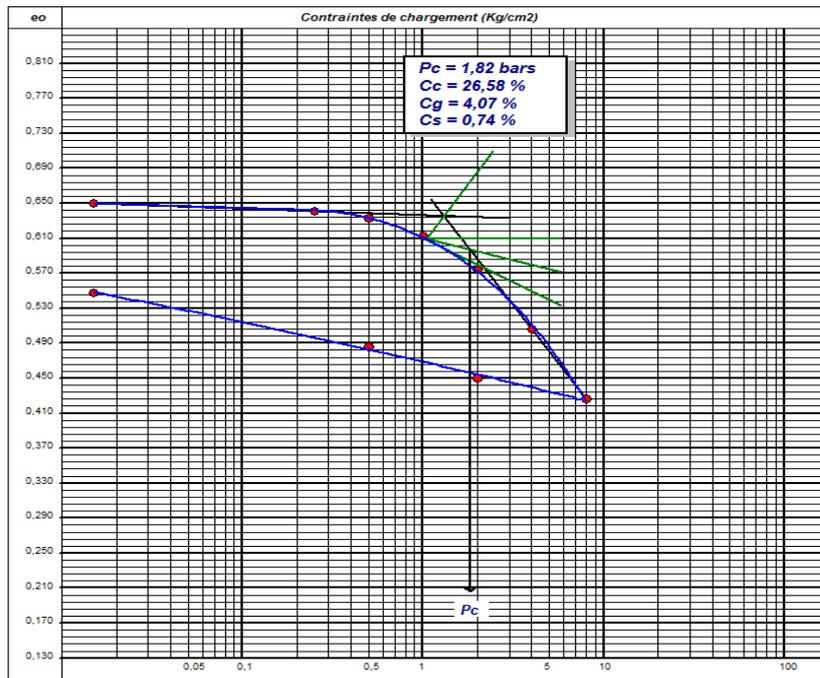


Figure III. 31 : Courbe de compressibilité oedométrique du sol traité à 4% en liant + 1% de bambou

c) *Marne traité à 6 %*

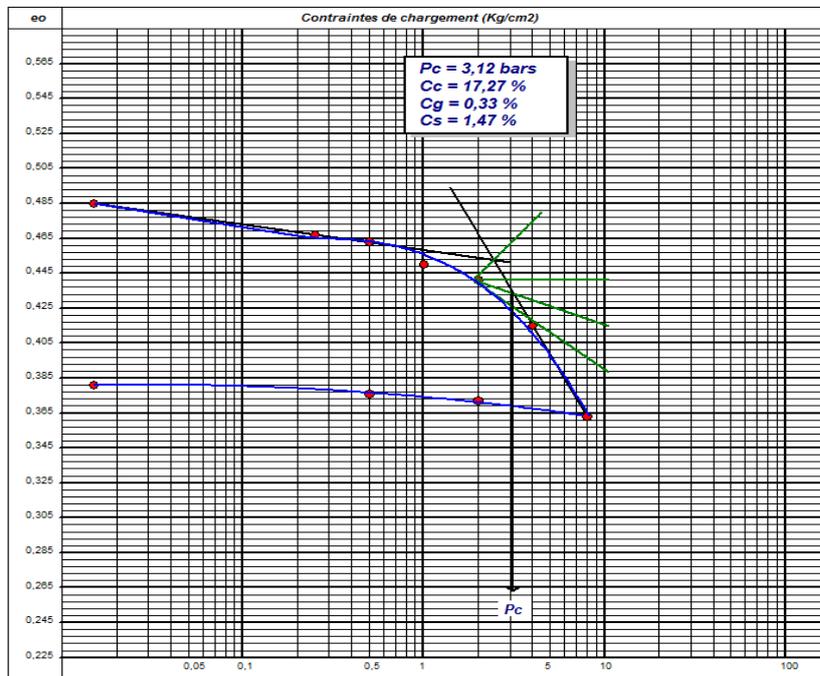


Figure III. 32 : Courbe de compressibilité oedométrique du sol traité à 6% en liant + 1% de bambou

d) Marne traité à 8 %

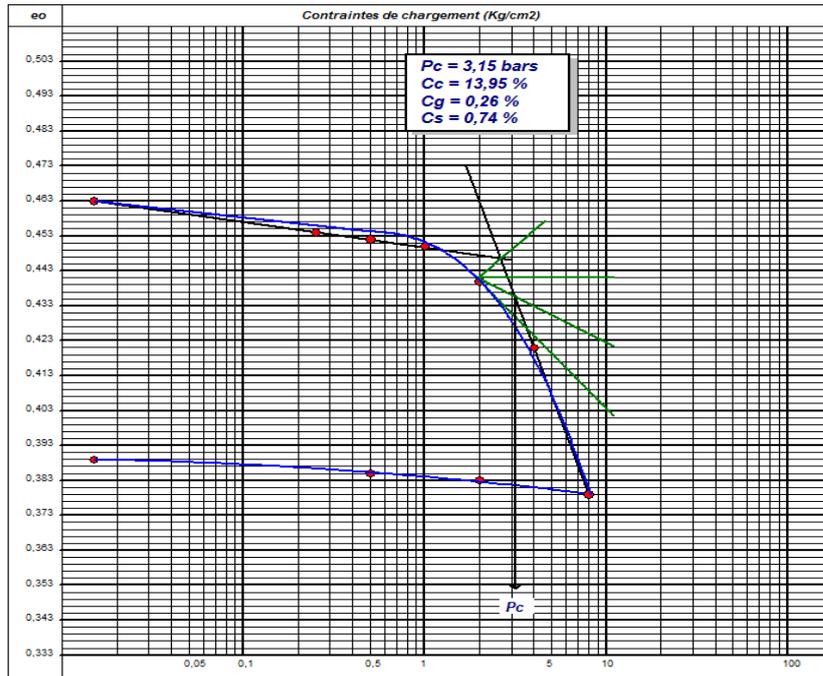


Figure III. 33 : Courbe de compressibilité oedométrique du sol traité à 8% en liant + 1% de bambou

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Nous avons présenté dans ce mémoire de fin cycle Master, un travail expérimental qui a duré près de 5 mois au sein des laboratoires pédagogiques et de recherche de notre université. Des travaux expérimentaux complémentaires ont été également réalisés dans le cadre du stage pratique réalisé au sein du Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction (LNHC) de la Wilaya d'Annaba. Ce travail est une contribution dans les travaux déjà réalisés pour mieux comprendre le comportement d'une marne traitée en vue de son utilisation dans les remblais routiers. Ce sol (marne argileuse) a été traité par des nouveaux produits (chaux coquille d'œuf calcinée - zéolite - fibre de bambou) similaire à un liant hydraulique routier renforcé par des fibres.

On a effectué et évalué au cours de ce travail :

1. Des essais d'identifications de la marne.
2. L'effet du traitement au liant seul sur la masse volumique sèche (ρ_d) et IPI pour trois proportions de coquille – zéolite en fonction de cinq dosages et de temps de cure (7 jours).
3. L'effet combiné du traitement au liant et des fibres sur ρ_d et IPI pour trois proportions de coquille – zéolite en fonction de trois dosages et de temps de cure (7 jours) ;
4. L'évolution de la résistance à la compression de ces deux mélanges pour trois dosages à 28 jours.
5. L'évolution des paramètres de cisaillement (cohésion, l'angle de frottement) pour la marne à l'état naturel et traité.
6. L'évolution l'indice de compression et du coefficient gonflement du sol à l'état naturel et après traitement pour différents dosages.

Les résultats obtenus ont montré que :

- Le sol est une marne peu plastique de type A2 selon le GTR ;
- Il y a très peu d'effet de traitement par le liant seul sur la variation de la masse volumique sèche pour l'ensemble des dosages et proportions de coquille – Zéolite.
- Il y a une augmentation de l'indice de portant immédiat (IPI) en fonction de l'augmentation des dosages en liant seul entre 2% et 8% puis une diminution à 10% pour l'ensemble des proportions coquille – zéolite.

- Les masses volumiques sèches du sol traité et renforcé par bambou sont légèrement supérieures à celles du sol traité seul.
- Les portances de du sol traité et renforcé par bambou pour les dosages 4% et 6% sont nettement supérieures à celles du sol traité seul. Ce comportement s'inverse à 8% de dosage sous l'effet du surdosage en liant et sa réaction avec la fibre de bambou.
 - Il y a une amélioration de la résistance à la compression en fonction de l'augmentation des dosages pour les deux mélanges coquille-zéolite et coquille-zéolite-Bambou. Le sol traité et renforcé avec fibre présente une meilleure résistance à 4% et 6% par rapport au sol traité sans fibre.
- Il y a une augmentation de la cohésion en fonction de l'augmentation du dosage sous l'effet des nouvelles liaisons créées entre les particules de sol par la coquille – zéolite.
- L'angle de frottement augmente à 4% puis diminue légèrement à 6% et 8%. L'augmentation est à priori attribuée à l'augmentent de la rugosité surfacique des particules sous l'effet du liant et l'effet de renfort apporté à la matrice sol-liant par la fibre de bambou.
- Le sol passe de l'état de compressibilité moyenne ($30 < C_c < 70\%$) à l'état de compressibilité faible ($C_c < 30\%$) après traitement au liant et fibre. Le potentiel de gonflement est également réduit après traitement au liant et au fibre ($C_g < 1$)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Société suisse de pédologie (1997) extrait.
- [2] Lakhdari Kahina. Amélioration de la résistance mécanique à l'action de l'eau d'un sable par incorporation des stabilisants. Mémoire de Master. Université mouloud Mammeri de Tizi-ouzou(2016).
- [3] Baba Hassane Ahmed Hisseini. « Traitement par alcali-activation et géo-polymérisation de sols argileux : caractérisations physicochimiques, géotechnique et environnementale ». Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université Paris-Est Ecole Doctorale Science, Ingénierie et Environnement (2021).
- [4] Mécanique des sols. Daniel Cordary. Paris : Éd. Tec & Doc-Lavoisier (1994).
- [5] Bouakba H, Rezzak A. Etude de stabilisation de sol par l'ajout de ciment et des fibres naturelles. Mémoire de Master. Université de Jijel (2016).
- [6] Bekhouche H. Traitement par le ciment des sols gonflants non saturés. Thèse de doctorat. Université Batna 2 MOUSTAFA BEN BOULAID (2018).
- [7] <https://fr.slideshare.net/section-scientifique/sol-limoneux>
- [8] Guefaifia L & Benrdjem H. 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).
- [9] Andrédou P. Etude expérimentale sur le comportement de la tourbe de sphaignes du compost utilisé comme milieu de culture et matériel d'enrobage de semences. Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées. Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées. Université de Sherbrooke (1989)
- [10] Boudlal O. Etude expérimentale du comportement mécanique des fines dans la stabilité des talus et des fondations. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri de tizi-ouzou(2013).

[11] Sahnoune R. Analyse et Caractérisation physico-chimique des Sols d'Entreposage de la station de Pétrole (Bejaia). Mémoire de Master. Université Abderrahmane mira de Bejaia (2014).

[12] Cours de pédologie générale. Ali Masmoudi. Faculté des sciences exactes et des sciences de la nature et de la vie Département d'agronomie.

[13] Zitouni R, Meguedmi D. Relation entre la fraction granulométrique et la conductivité électrique cas de Sebkhet Melloul Willaya de Sétif. Mémoire de master. Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi (2021).

[14] GUEFAIFIA Lamia ; BENRDJEM Hiba. Traitement et renforcement d'un sol fin par différentes Techniques d'amélioration : Etude expérimentale et numérique. Mémoire de master. Université 8Mai 1945-Guelma (2020).

[15] <https://ontariocountyny.gov/DocumentCenter/View/3979/AASHTO-Group-Classification-Surface-Interpretation>

[16] Bouhlassa C, Achi Z. Sols fins et stabilité des ouvrages en terre : érosion, dispersion, typologie et pathologie (recherche bibliographique). Mémoire de master. Université Echahid cheikh Larbi Tebessi de Tébessa (2023).

[17] Halima D. Etude comparative analytiques en stabilité des pentes. Mémoire de master. Université Mohamed Boudiaf de M'silla (2016).

[18] Algerian Journal of Research and Technology. Méthode de Réfection d'un Glissement de Terrain sur un Tronçon de Route (2016)

[19] Emad J. Phénomènes d'interaction sol-structure vis-à-vis de l'aléa retrait-gonflement pour l'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages. Thèse Pour l'obtention du grade de Docteur de l'INPL. Institut national polytechnique lorraine doctorale (2011).

[20] Bouhlassa chaith, Achi ziad. Sols fins et stabilité des ouvrages en terre : érosion, dispersion, typologie et pathologie (recherche bibliographique). Mémoire de master. Université ECHAHID CHEIKH LARBI TEBESSI - Tébessa -(2023).

[21] Oukil Seif Eddine. Effet de la poudre de verre et du métakaolin sur les propriétés des mortiers de chaux aériennes. Mémoire de Master. Université Badji moukhtar d'Annaba (2020).

- [22] Imelhaine Assia. Comportement des marnes au traitement à la chaux et au ciment. mémoire de magister. Université de saad dahleb de blida (2009).
- [23] Boudjadja R, Benkedidah A. Etude de stabilisation chimique des sols. Mémoire de master. Université de Jijel (2018).
- [24] <https://www.lafarge.fr/fabrication-du-ciment#:~:text=Le%20ciment%20est%20un%20liant,au%20ciment%20des%20caract%C3%A9ristiques%20sp%C3%A9cifiques>.
- [25] Bourbia I, Bounahat H. Etude de stabilisation et renforcement des sols. Mémoire de master. Université de Jijel (2017).
- [26] Clément H. Etude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silicomanganèse. Thèse de doctorat. Université Paris-Est (2013).
- [27] Guide for the Use of Silica Fume in Concrete.
- [28] Yingjie L. Co-valorisation de sédiments et de sols fins par apport de liants et de fibres. Thèse de doctorat. Université de CAEN (2012).
- [29] Kerrouzi I, Boualla. « L'influence de l'ajout de la pouzzolane sur les caractéristiques physico-chimique des ciments » mémoire de master, université Mohamed Boudiaf d'Oran(2011).
- [30] Autres : cours Chelouah, matériaux innovant, université A. Mira Bejaïa 2017/2018.
- [31] David Lozach « Les constituants de béton et de mortier » collection cimbéton G10, 2005.
- [32] Touati S, Barbouchi A. l'étude d'un mélange tuf –sable concassé pour assise de chaussée. Mémoire de master. Université Ahmed Draia Adrar (2018).
- [33] Guide de prescription de ciments pour la construction durable (cas des bétons coulés en place) collection cimbeton T47 (2009).
- [34] Guide pratique de béton « Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables » Editeur : Holcim (Suisse) SA 6ème édition (2015).
- [35] Emmanuel M. Cinétiques et mécanismes de relargage des métaux lourds présents en traces dans les matrices cimentaires. Thèse de doctorat, université d'orleans (2003).

- [36] Food and Agriculture Organisation, 2019 (FAO).
- [37] Medicinal Use of Eggs (2016).
- [38] Bensaifi El amin. Etude du comportement des marnes et des matériaux argileux gonflants : traitement et réutilisation dans les projets routiers. Thèse de doctorat. Université 8 Mai 1945 Guelma (2020).
- [39] N.C Consoli, M.S. Carretta, H.B Leon, H.C Scheuermann Filho, L.F Tomasi, 2019. Strength and stiffness of ground waste glass–carbide lime blends. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10), 6019010.
- [40] Breck et Donald W. (1974). *Zeolite molecular sieves: structure, chemistry and use*. John Wiley & Sons, New-York.
- [41] Scott, M.A., Kathleen, A.C., Dutta, P.K. : *Handbook of zeolite science and technology*. CRC Press, New York (2003). ISBN 0-8247-4020-3.
- [42] Sébastien ROUS TEL. *Zéodratation. Techniques de l'Ingénieur*. Vol.f3010. Paris–France. 2011.
- [43] Siti Aida, Binti Ibrahim. *Synthesis and Characterization of Zeolites from Sodium Aluminosilicate Solution*. Mémoire de master (2007).
- [44] Nicolas Brodu ; Thèse de doctorat. *Etude d'un procédé d'ozonation avancée surzéolithe pour le traitement d'effluents organiques gazeux*. Université de Toulouse. France (2012).
- [45] T. Hamieh, « Quatrième colloque franco-libanais sur la science des matériaux (CSM4) conférence internationale », Beyrouth, Liban, 2004.
- [46] Xianchun Wu acidity and catalytic activity of zeolite catalysts bound with silica and alumina - theses of doctorat of philosophy - texas A.M University (2003)
- [47] DO THI Vi Vi. *Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non*. Thèse de doctorat. 2011,
- [48] Maya Jacob John, Sabu Thomas, 2008 ; *Biofibres and biocomposites; Carbohydrate Polymers* 71, 343-364.

[49] Xiaobo Li ; Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing, Master, The School of Renewable Natural Resources, 2007.

[50] Haiping Yang, Rong Yan, Hanping Chen, Dong Ho Lee, Chuguang Zheng, 2007 ; Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis; Fuel 86, 1781-1788.

[51] Guide : TERRASSEMENTS ET ASSISES DE CHAUSSÉES : Traitement des sols aux liants hydrauliques.

[52] Pierre ROSSI, Ludovic GAVOIS et Guy RAOUL. Techniques de l'ingénieur GTS « traitement des matériaux ». Février 2017.

[53] OULED KOUIDER R, LAOUAR M. Influences de traitement à la chaux sur certaines caractéristiques d'une Marne de la région de Ghardaïa. Mémoire de master. Université de Ghardaïa (2020).