

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل  
Université Mohammed Seddik Benyahia - Jijel

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département des Sciences de la Terre et de  
l'Univers



كلية علوم الطبيعة و الحياة  
قسم علوم الارض و الكون

## Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme : Master Académique en Géologie

Option : Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique

### Thème

**Amélioration des Caractéristiques Géotechniques  
Des Sols avec des Fibres Naturels.**

#### Membres de Jury

Président : HAMADOU Noureddine

Examineur: REMOUM Karim

Encadrant : Pr. BENZAID Riad

#### Présenté par :

REZAI Selma

SELOUBI Sara

Année Universitaire 2021-2022.

Numéro d'ordre (bibliothèque) : .....

# Remerciements

## Remerciements

*Tout d'abord nous remercions en premier ALLAH le tout puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour accomplir ce travail.*

*Nous remercions nos très **CHERE PARENTS** pour leurs soutiens et leurspatiences.*

*J'adresse mes vifs remerciements à mon directeur de mémoire **Pr. BENZAID RIAD** pour m'avoir suivi le long de ce travail et tous les efforts qu'il a fait pour son accomplissement.*

*Nous remercions profondément les membres de jury, qui nous ont fait l'honneur de d'expertiser et évaluer notre travail de fin d'étude.*

*Sans oublier **Melle. IMANE IDOUI** pour son aide précieuse et ces encouragements.*

*J'exprime mes sincères remerciements à **Mr. WEDJHANI FOUAD** directeur de l'entreprise **SOALKA SPA** ainsi que tout le personnel de l'entreprise pour la procuration du kaolin.*

*Un grand merci aux enseignants du département de Géologie (STU) de l'université de Jijel.*

*Nous remercions tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin afin de réaliser ce travail.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce projet :*

*A ma chère Mère **Hayat***

*Celle qui m'a inséré le goût de la vie et le sens de la responsabilité*

*A mon cher Père **Abd Elwahab***

*Celui qui est la source de mon inspiration et de mon courage*

*Ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté, de sagesse et de patience.*

*A ma chère grand-mère **Khadidja** et mon cher grand-père **Mostafa***

*Pour leurs prières*

*A mes sœurs **Rania et Hadjer.***

*A mes frères **Zakaria, Yacine et Yahia.***

*Pour leur soutien moral tout le long de mes études*

*A mes frères et sœurs de maman : **Abd Elhek, Ibrahim, Idris, Hichem, Houda, Nouara, Hanifa et Fatima***

*A tout ma famille*

*A ma chère binôme **SARA***

*Pour son entente et son sympathie*

*A **Mr.kamel Rekima** directeur de l'Entreprise d'EGR et les travailleurs, en particulier les ingénieurs **Mr. Frites Imad et Mr. Kerroud Bilal***

*Pour de m'avoir aidé à compléter mon stage avec eux dans l'Algerian Qatari Steel Company (AQS)*

*A mes meilleurs amis **Amel, Zina, Soumia, Hadjer, Aida, Roumaissa, Rym et Aya***

*Pour leur soutiens et aides durant les moments difficiles*

*A toute les amis d'étude promo de Géotechnique A toutes mes autres ami(e)s*

*A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment*

**SELMA.**



# Dédicace

*Je dédie ce projet*

*A ma chère Mère **Khoudjia***

*Celle qui m'a inséré le goût de la vie et le sens de la responsabilité*

*A mon cher Père **Kamel***

*Celui qui est la source de mon inspiration et de mon courage*

*Ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté, de sagesse et de patience.*

*A ma sœur **Mouna***

*A mes frères **Hamza et Issam***

*A mon marie **Yehia***

*Pour leur soutien moral tout le long de mes études A toute ma famille*

*A mon cher binôme **SELMA***

*Pour son entente et son sympathie*

*A mes meilleurs amies **Chaima, Khawla, Sousan,***

***Abla, Samira, Maha et Amira.***

*Pour leur soutiens et aides durant les moments difficiles*

*A toute les amis d'étude promo de Géotechnique A toutes mes autres ami(e)s*

*A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment*



**INTRODUCTION GENERALE**.....1-2

**CHAPITRE I : VALORISATION DES FIBRES NATURELS POUR LA STABILISATION  
DES SOLS**

I.1. Introduction .....4  
I.2. Techniques de stabilisation du sol.....4  
I.2.1. Définition de stabilisation du sol.....4  
I.2.2. But de la stabilisation.....6  
I.3. Revue de littérature sur la stabilisation des sols avec des fibres.....6  
I.3.1. Stabilisation des sols avec des fibres naturels.....6-8  
I.3.2. Stabilisation des sols avec des fibres synthétiques.....8-10  
I.3.3. Stabilisation des sols avec des fibres humains.....10  
I.4. Conclusion.....11

**CHAPITRE II : MINÉRALOGIE DES SOLS FINS**

II.1. Introduction .....12  
II.2. Diverses phases du sol.....12  
II.2.1. Phase solide.....12-13  
II.2.2. Phase liquide.....13  
II.2.3. Phase gazeuse.....13  
II.3. Définition des sols fins.....14  
II.4. Les argiles.....14  
II.4.1. Structure physique des argiles.....14-15  
II.4.2. Les structures et textures des argiles.....16-18  
II.4.3. Les différents types des argiles.....18-20  
Kaolinite.....18  
Montmorillonite.....19  
Illite.....19  
Smectites.....20  
Chlorites.....20  
II.5. Le phénomène de gonflement.....21  
II.6. Transformation des minéraux argileux par dégradation et aggradation.....21  
II.7. Contexte de formation des sols argileux.....21-22  
II.8. Principales caractéristiques des minéraux argileux.....22  
II.8.1. Densité de charge spécifique.....22  
II.8.2. Capacité d'échange cationique.....23  
II.8.3. La surface spécifique.....23  
II.9. Nature des liaisons chimiques.....23  
II.9.1. Cations échangeables.....23-24  
II.9.1.1. Gonflement interfoliaire et interparticulaire.....24  
II.9.2. Interaction entre argiles et cations alcalins.....24  
II.9.2.1. Influence de la nature des cations alcalins.....24-25  
II.10. Principales causes de gonflement.....25  
II.10.1. Hydratation par adsorption.....26-27  
II.10.2. Hydratation par osmose.....27-28  
II.10.3. Hydratation par capillarité.....28  
II.10.4. Transformations chimiques.....29  
II.11. Facteurs qui affectent le gonflement.....29

II.11.1. Facteurs intrinsèques.....	29
II.11.2. Facteurs externes.....	29
II.12. Mécanisme du retrait.....	30
II.13. Conclusion.....	31

### **CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE**

III.1. Introduction.....	33
III.2. Matériaux utilisées.....	33
III.2.1. Kaolin KT <sub>2</sub> .....	33-34
III.2.1.1. Les caractéristiques de Kaolin KT <sub>2</sub> .....	34
Analyse granulométrique.....	34
Analyse chimique.....	34-35
Analyse minéralogique.....	35
III.2.2. Bentonite.....	35
III.2.2.1. Les caractéristiques de la Bentonite.....	36-37
III.2.3. Le sol reconstitué.....	37
III.2.4. Les cheveux humains.....	38
III.3. Programme expérimentale.....	38
III.4. Détermination des limites d'Atterberg (NF P 94-051).....	39
III.4.1. Les résultats.....	40-42
III.5. Détermination les caractéristiques de Compactage (NF P 94-093).....	42-43
III.5.1. Les résultats.....	43-47
III.6. Détermination les caractéristiques de Cisaillement du sol (NF P94-071-1).....	47
III.6.1. Les résultats.....	48-49
III.7. Analyse et discussion des résultats obtenus.....	50
III.7.1. Effet des cheveux humains sur les limites d'Atterberg.....	50
III.7.2. Effet des cheveux humains sur les caractéristiques du compactage.....	51-52
III.7.3.Effet des cheveux humains sur la résistance au Cisaillement.....	52-53

<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>55</b>
---------------------------------	-----------

<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>56-59</b>
---	--------------

## **Liste des figures**

### **CHAPITRE II**

<b>Figure II.1.</b> Diagramme des phases d'un sol.....	12
<b>Figure II.2.</b> Trois structures types des sédiments argileux.....	15
<b>Figure II.3.</b> a. sol à structure lâche b. Sol à structure dense (kezdi, 1974) Structure des sols constitué de particules grossières et de particules fines.....	16
<b>Figure II.4.</b> Présentation des tétraèdres et octaèdre.....	16
<b>Figure II.5.</b> Ouverture des fissures en proximité des matériaux rigides, (Montes et al, 2003), cité par (Azouz, 2006).....	17
<b>Figure II.6.</b> Photographies au microscope électronique à balayage des argiles.....	18
<b>Figure II.7.</b> Structure de la kaolinite.....	18
<b>Figure II.8.</b> Structure de la Montmorillonite (Lambel 1953).....	19
<b>Figure II.9.</b> Structure de l'illite (Lambel 1953).....	20
<b>Figure II.10.</b> Feuillet de la Smectites.....	20
<b>Figure II.11.</b> Feuillet de la Chlorite.....	21
<b>Figure II.12.</b> Forces électrostatiques dans la double couche, Répartition des ions autour d'une particule chargée.....	26
<b>Figure II.13.</b> Phénomène osmotique idéal.....	27
<b>Figure II.14.</b> Différentes phases du retrait, selon SCHUBERT, 1982, cité par ALLAM, 2011.....	30

### **CHAPITRE III**

<b>Figure III.1.</b> Kaolin de Tamazert .....	34
<b>Figure III.2.</b> Bentonite.....	36
<b>Figure III.3.</b> Le sol reconstitué .....	37
<b>Figure III.4.</b> Les cheveux humains.....	38
<b>Figure III.5.</b> Détermination des limites d'Atterberg (NF P 94-051).....	39
<b>Figure III.6.</b> Représentation schématique des limites d'Atterberg.....	39

<b>Figure III.7.</b> Limites d'Atterberg et classification de Casagrande du sol reconstitué de référence.....	41
<b>Figure III.8.</b> Limites d'Atterberg et classification de Casagrande ( <b>0.5%</b> de cheveux).....	41
<b>Figure III.9.</b> Limites d'Atterberg et classification de Casagrande ( <b>1%</b> de cheveux).....	41
<b>Figure III.10.</b> Limites d'Atterberg et classification de Casagrande ( <b>1.5%</b> de cheveux).....	42
<b>Figure III.11.</b> Limites d'Atterberg et classification de Casagrande ( <b>2%</b> de cheveux).....	42
<b>Figure III.12.</b> Déterminations les caractéristiques d'essai Compactage.....	43
<b>Figure III.13.</b> Le matériel utilisé essai Proctor normal .....	43
<b>Figure III.14.</b> Courbe Proctor normal du sol reconstitué de référence.....	45
<b>Figure III.15.</b> Courbe Proctor normal du sol reconstitué avec 0.5% de cheveux.....	45
<b>Figure III.16.</b> Courbe Proctor normal du sol reconstitué avec 1% de cheveux.....	46
<b>Figure III.17.</b> Courbe Proctor normal du sol reconstitué avec 1.5% de cheveux.....	46
<b>Figure III.18.</b> Courbe Proctor normal du sol reconstitué avec 2% de cheveux.....	47
<b>Figure III.19.</b> Détermination les caractéristiques de Cisaillement.....	47
<b>Figure III.20.</b> Les constituants de la boîte de cisaillement.....	47
<b>Figure III.21.</b> La machine de cisaillement.....	47
<b>Figure III.22.</b> L'essai de cisaillement direct sur le sol traité avec <b>0.5%</b> de cheveux.....	48
<b>Figure III.23.</b> L'essai de cisaillement direct sur le sol traité avec <b>1%</b> de cheveux.....	49
<b>Figure III.24.</b> L'essai de cisaillement direct sur le sol traité avec <b>1.5%</b> de cheveux.....	49
<b>Figure III.25.</b> L'essai de cisaillement direct sur le sol traité avec <b>2%</b> de cheveux.....	49
<b>Figure III.26.</b> Effet de cheveux sur les limites d'Atterberg.....	50
<b>Figure III.27.</b> Effet de cheveux sur la teneur en eau optimale .....	51
<b>Figure III.28.</b> Effet de cheveux sur la densité sèche maximale .....	52
<b>Figure III.29.</b> Effet de cheveux sur les caractéristiques de cisaillement.....	52



## **Liste des tableaux**

### **CHAPITRE I**

<b>Tableau I.1.</b> Avantages et inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées (Babouri 2008).....	5-6
---	-----

### **CHAPITRE II**

<b>Tableau II.1.</b> Occurrence des minéraux argileux dans les sols en fonction du climat (ARMINES, 2006).....	21
<b>Tableau II.2.</b> Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux, d'après (Lepluart, 2002), cité par Cabane ,2004.....	23
<b>Tableau II.3.</b> Dimensions des cations hydratés et non hydratés, (ILTIS, 1979).....	27

### **CHAPITRE III**

<b>Tableau III.1.</b> Les Caractéristique de kaolin KT <sub>2</sub> .....	34
<b>Tableau III.2.</b> Analyse chimique.....	35
<b>Tableau III.3.</b> Analyse minéralogique.....	35
<b>Tableau III.4.</b> Caractéristique pétrographique-minéralogiques.....	36
<b>Tableau III.5.</b> Composition chimique de la bentonite, Résultats de fluorescence X. Idoui et al 2021.....	36
<b>Tableau III.6.</b> Caractéristique physicomécanique de la bentonite.....	36
<b>Tableau III.7.</b> Résultats d'analyses des caractéristiques hydriques.....	37
<b>Tableau III.8.</b> Résultats d'analyse granulométrique et physico-chimique.....	37
<b>Tableau III.9.</b> Programme expérimental réalisé.....	38
<b>Tableau III.10.</b> Propriétés géotechniques référence de sol. Idoui et al 2021.....	39
<b>Tableau III.11.</b> Résultats des limites d'Atterberg du sol reconstitué de référence.....	40
<b>Tableau III.12.</b> Résultats des limites d'Atterberg du sol traité avec 0.5% de Cheveux ....	40
<b>Tableau III.13.</b> Résultats des limites d'Atterberg du sol traité avec 1% de Cheveux.....	40
<b>Tableau III.14.</b> Résultats des limites d'Atterberg du sol traité avec 1.5% de Cheveux....	40
<b>Tableau III .15.</b> Résultats des limites d'Atterberg du sol traité avec 2% de Cheveux.....	40
<b>Tableau III.16.</b> Résultats de l'essai Proctor normal sur le sol reconstitué de référence.....	44
<b>Tableau III. 17.</b> Résultats de l'essai Proctor normal sur le sol traité avec 0.5% de Cheveux.....	44
<b>Tableau III.18.</b> Résultats de l'essai Proctor normal sur le sol traité avec 1% de Cheveux.....	44
<b>Tableau III.19.</b> Résultats de l'essai Proctor normal sur le sol traité avec 1.5% de Cheveux.....	44
<b>Tableau III.20.</b> Résultats de l'essai Proctor normal sur le sol traité avec 2% de Cheveux.....	44
<b>Tableau III.21.</b> Les résultats de Cisaillement.....	48

## ملخص

تتعلق الدراسة التجريبية الحالية بتقوية التربة الطينية المعاد تكوينها من الكاولا والبنتونيت بألياف طبيعية من شعر الإنسان. تمت إضافة هذه الألياف إلى التربة بنسب 0.5% ، 1% ، 1.5% و 2% على أساس الكتلة الجافة للتربة. بعدها تم اختبار عينات التربة في المختبر من خلال تنفيذ حدود أتربارغ واختبار بروكتور العادي واختبار القص المباشر. النتائج التي تم الحصول عليها تؤكد فعالية الإضافة المختارة؛ حيث ارتفع مؤشر اللدونة IP من 36.62 للتربة المرجعية إلى 28.83 لنفس التربة المعالجة بنسبة 2% من شعر الإنسان؛ أصبحت التربة المعالجة أقل حساسية للماء أثناء الضغط لأن المنحنيات التي تم الحصول عليها تصبح أكثر تسطحاً عند الحد الأمثل من بروكتور؛ وأخيراً زيادة في التماسك من 0.02 بار إلى 0.675 بار وتحسن ملحوظ في زاوية الاحتكاك الداخلية للتربة المعالجة بنسبة 175% حتى 259%.

**الكلمات المفتاحية:** الألياف الطبيعية، الشعر البشري، الطين، اللدونة، بروكتور العادي، القص.

## RÉSUMÉ

La présente étude expérimentale concerne le renforcement d'un sol argileux reconstitué de kaolin et de la bentonite avec des fibres naturelles qui sont les cheveux humains. Ces fibres ont été ajoutées au sol avec des proportions de 0,5 %, 1 %, 1,5 % et 2 % par rapport à la masse sèche du sol. Les échantillons de sols ont été testé en laboratoire en réalisant les limites d'Aterberg, l'essai Proctor normal et l'essai de cisaillement direct. Les résultats obtenus confirment l'efficacité de l'ajout choisi ; l'indice de plasticité IP est passé de 36,62 pour le sol de référence à 28,83 pour le même sol traité avec 2% de cheveux humains ; le sol traité est devenu moins sensible à l'eau durant le compactage car les courbes obtenues sont de plus en plus aplaties à l'optimum Proctor ; et enfin une augmentation de la cohésion de 0,02 bar à 0,675 bar et une amélioration spectaculaire de l'angle interne de frottement du sol traité qui été de l'ordre de 175% jusqu'à 259%.

**Mots clés :** fibres naturelles, cheveux humains, argile, plasticité, proctor normal , cisaillement.

## **ABSTRACT**

The present experimental study concerns the reinforcement of a clay soil reconstituted with kaolin and bentonite with natural fibers which are human hair. These fibers were added to the soil in proportions of 0.5%, 1%, 1.5% and 2% based on the dry mass of the soil. The soil samples were tested in the laboratory by carrying out the Aterberg limits, the normal Proctor test and the direct shear test. The obtained results confirm the effectiveness of the chosen addition; the IP plasticity index went from 36.62 for the reference soil to 28.83 for the same soil treated with 2% of human hair; the treated soil has become less sensitive to water during compaction because the curves obtained are more and more flattened at the Proctor optimum; and finally an increase in cohesion from 0,02 bar to 0,675 bar and a spectacular improvement in the internal angle of friction of the treated soil, which was of the order of 175% up to 259%.

**Keywords:** natural fibers, human hair, clay, plasticity, normal proctor, shear test.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# INTRODUCTION GENERALE



## **Introduction générale**

L'accumulation de déchets solides est un problème sérieux auquel le monde est confronté et pour lequel une immense superficie de terrain est nécessaire pour son gestion et/ou son élimination. Alternativement, ces dernières décennies, les ingénieurs essaient d'utiliser ces déchets dans le domaine du génie civil et plus récemment en géotechnique en fonction de leur faisabilité, adéquation et performances.

Le sol stabilisé (traité) est, en général, un matériau composite qui résulte de la combinaison et de l'optimisation des propriétés des matériaux constitutifs individuels (Basha et al. 2004). Les principales méthodes sont la stabilisation mécanique, la stabilisation hydraulique, la stabilisation physique et chimique et la stabilisation par inclusion et confinement. Parmi ces méthodes, les deux dernières permettent d'utiliser efficacement les déchets solides.

La substitution des sols naturels, des granulats et du ciment par des déchets solides industriels ou naturels est très répandue ces dernières années. Le coût réduit (parfois gratuit) de ces matériaux en fait une alternative intéressante si des performances géotechniques adéquates peuvent être obtenues. Bien que le concept de sol renforcé de manière aléatoire soit relativement nouveau en géotechnique, le renforcement des sols argileux avec des fibres naturelles est pratiqué depuis l'époque des pharaons (Estabragh et al. 2011).

Ces dernières années, le renforcement des sols avec des fibres courtes, discrètes et orientées de manière aléatoire attire de plus en plus l'attention de nombreux chercheurs du monde entier. Des études approfondies ont été menées sur la stabilisation des argiles molles et des argiles expansives à l'aide de divers additifs tels que la chaux, le ciment, les fibres synthétiques et naturelles. Ranjan et al. (1994) ont mené une série d'essais triaxiaux pour étudier le comportement de sable renforcé de fibres plastiques. Maher et Ho (1994) ont étudié les propriétés mécaniques d'un composite kaolinite/fibre avec des essais de compression axiale. Kaniraj et al. (2003) ont mené une étude expérimentale pour étudier l'influence des inclusions de fibres orientées au hasard sur le comportement géotechnique de deux types de cendres volantes indiennes. Akbulut et al. (2007) ont évalué l'utilisation de déchets tels que le caoutchouc de pneus usagés, le polyéthylène et la fibre de polypropylène pour l'amélioration de la résistance et du comportement dynamique des sols argileux. L'effet de l'inclusion de fibres de polypropylène dans le sol dans l'amélioration du comportement de ce dernier à travers une série d'études expérimentales a été établi par de nombreux chercheurs (Dall'Aqua et al. 2010 ; Jiang et al. 2010 ; Senol, 2011 et autres.). Estabragh (2011) a étudié les effets des fibres sur le comportement de consolidation et de résistance au cisaillement d'un sol argileux renforcé avec des fibres de nylon.

D'autre part, l'utilisation efficace des fibres naturelles comme renfort a été confirmé par plusieurs recherches. Basha et al. (2004) ont mené une étude sur la stabilisation des sols résiduels par l'utilisation de ciment et de cendre de balle de riz. Aktar et al. (2008) ont étudié l'influence des cendres volantes mélangées à la chaux avec l'introduction de quantités variable de fibres de cheveux humains sur les valeurs CBR (California Bearing Ratio). Akhtar et Ahamad (2009) ont étudié l'effet de la fibre capillaire sur les propriétés mécaniques d'un bloc creux à base de cendres volantes destiné à des structures de maçonnerie. Ramesh et al. (2010) ont décrit le comportement de compactage et de résistance du sol de coton noir renforcé avec des fibres de coco. Cité par (Renju.R.Pi et al.2012).

Cependant, nous avons constaté que des études sur l'utilisation des fibres de cheveux humains dans la stabilisation des sols en tant que renforcement n'ont pas été rapportées suffisamment jusqu'à présent, ce qui nous a orientés vers cette thématique intéressante et originale pour qu'elle soit l'objet de notre projet de fin d'étude.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier la possibilité d'utiliser des déchets naturels (fibres naturelles) qui sont les cheveux humains en tant que renforcement pour les sols argileux afin de pouvoir remplacer les matériaux fibreux commerciaux conventionnels. L'influence de la teneur en fibres (cheveux humains) sur un sol argileux, a été observée à travers une série d'essais en laboratoire tels que les limites de d'Atterberg, le compactage et la résistance au cisaillement. Les résultats des tests révèlent que l'inclusion de fibres capillaires humaines réparties de manière aléatoire dans le sol argileux améliore considérablement les propriétés géotechniques de ce dernier ce qui est très intéressant sur le plan économique et technique.

Pour atteindre les objectifs fixés pour cette étude, nous avons structuré le présent manuscrit comme suite :

- Introduction générale.
- Chapitre I : valorisation des fibres naturel pour la stabilisation des sols.
- Chapitre II : minéralogie des sols fins.
- Chapitre III : matériaux et procédure expérimentale.
- Conclusion générale.

**CHAPITRE I**  
**VALORISATION DES FIBRES NATURELLES**  
**POUR LA STABILISATION DES SOLS**





## **I.1. Introduction**

L'utilisation d'une fibre comme renfort au sein d'une matrice, dépend essentiellement de la compatibilité des propriétés physiques, mécaniques et chimiques, que possède la fibre avec les constituants de la matrice (sol, béton, béton de sable ou mortier). Les matériaux composites à fibres se développent en raison de leurs propriétés mécaniques associées souvent à une faible densité. Leur bon rapport coût/performance leur a ouvert une très large gamme d'application dans des domaines variés. Les ingénieurs ont cherchés depuis longtemps à renforcer les matériaux de construction fragiles ou de faible portance à l'aide des fibres de différentes natures. Les fibres naturelles sont issues de ressources renouvelables elles sont biodégradables et parfois de bonnes caractéristiques physico-mécaniques. Dans ce qui suit nous allons exposer une revue bibliographique sur les fibres usuellement utilisées dans le domaine de la géotechnique et du génie civil.

## **I.2. Techniques de stabilisation du sol**

### **I.2.1. Définition de la stabilisation du sol**

Un terme général pour toute méthode physique, chimique, mécanique, biologique ou combinée de modification des caractéristiques d'un sol naturel afin de répondre à un objectif technique donné. Les améliorations comprennent l'augmentation des capacités de charge, la résistance au cisaillement et de la performance globale des sous-sols in situ, des sols afin de renforcer les ouvrages en terre. [1]

Les techniques d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains avec une efficacité acceptable et parfois parfaite. Babouri (2008)

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue:

- La stabilisation mécanique.
- La stabilisation thermique.
- La stabilisation chimique (par ajout de matériaux).
- La stabilisation par substitution (ajout de matériaux nobles ou déchets).

**Tableau I.1.** Avantages et inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées  
(Babouri 2008)

TECHNIQUE	PROCEDES	AVANTAGES	INCOVENIENT
Stabilisation Mécanique	Compactage	Le compactage est plus économique Réduire le potentiel expansif	- Il faut une grande quantité d'eau. (Compacter au-dessus de l'optimum avec une $W_n$ élevée).
	Substitution		- L'épaisseur de la couche. Disponibilité du matériau.
	Pré-humidification		- Le temps de l'opération. La distribution uniforme de $W_n$ .
Amélioration par congélation	Circulation d'un fluide froid (azote liquide) dans des tubes	- Lorsque aucune solution n'est possible	La réalisation doit être le plus rapidement possible. Il faut tenir compte de la déstabilisation du massif de sol au dégel.

Stabilisation chimique (Par ajout de matériaux)	Sels Chaux Ciment	- Augmenter la résistance. Diminuer la plasticité. - Réduire le potentiel de variation de volume. - Diminuer la plasticité, la densité sèche et la pression du gonflement. Augmenter $W_{opt}$ . Utilisation d'un faible dosage.	Le choix de la méthode d'addition d'un produit.
--	-------------------------	---	---

### I.2.2. But de la stabilisation

1. Réduire le volume des vides entre les particules solides (ce qui augmente la compacité).
2. Colmater les vides que l'on peut supprimer.
3. Créer des liens (cohésion) et améliorer les liaisons existantes entre particule (ce qui améliore la résistance mécanique).

Ces trois objectifs permettent d'améliorer la résistance mécanique, et de diminuer la sensibilité à l'eau (Saadi 2017).

### I.3. Revue de littérature sur la stabilisation des sols avec des fibres

Avec le développement qui s'opère dans le monde et le constat d'une augmentation de la production économique, cela se traduit par la création de plusieurs déchets comme les déchets des fibres naturels, qui affectent négativement l'environnement et la nature d'une manière générale. Afin de le réduire cet impact environnemental négatif, de nombreux chercheurs ont mené plusieurs essais pour le revaloriser et l'utiliser comme matériau de stabilisation et de traitement des sols de mauvaise qualité géotechnique.

#### I.3.1. Stabilisation des sols avec des fibres naturelles

##### ➤ Fibre de coco

Singh et al. (2014) ont étudié l'effet de stabilisation d'un sol argileux par différente teneur en fibre naturelle (fibre de coco). Les résultats ont montré que la valeur CBR immédiat et imbibé du sol traité augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres de coco.

➤ **Fibre de sisal**

Prabakar et Siridihar (2002) ont utilisé 0,25%, 0,5%, 0,75% et 1% de fibres de sisal en poids de sol brut avec quatre longueurs différentes à savoir 10, 15, 20 et 25 mm pour renforcer un sol problématique local. Ils ont conclu que l'augmentation de la longueur et de la teneur en fibres réduit la densité sèche du sol et améliore sa résistance au cisaillement. De plus, la contrainte de cisaillement augmente de façon non linéaire avec l'augmentation de la longueur des fibres jusqu'à 20 mm (au-delà de cette longueur la contrainte de cisaillement diminue). D'autre part, au-delà de 0,75% de fibre, la contrainte de cisaillement diminue (Hejazi et al. 2012).

➤ **Fibre de bambou**

Brahmachary et Rokonuzzaman (2018) ont utilisé des fibres de bambou naturel ayant respectivement un diamètre de 3 et 6 mm et une longueur de 10 et 20 mm pour stabiliser un sol argileux. La proportion de fibre de bambou été de 0,20 à 1,40 % avec un incrément de 0,2%. L'ajout de fibres de bambou a amélioré le comportement ductile du sol traité et a augmenté les valeurs CBR. Cette augmentation été significative avec un ajout de fibre de bambou de l'ordre de 1,2 % (Rebiai et al. 2020)

➤ **Fibre de bagasse**

Dan et al. (2017) ont réussi à renforcer le sol gonflant de Queensland (Australie) avec 0,5% de fibres de bagasse associé à 2% de chaux. L'ajout a rendu le sol plus résistant à la compression et a réduit efficacement le potentiel de gonflement qui tend vers zéro en fonction de l'augmentation du pourcentage de l'addition (Berdi et al. 2022)

➤ **Fibre de paille de blé**

Idoui et al. (2021) ont étudié l'effet de la paille de blé sur quelques caractéristiques géotechniques d'un sol argileux gonflant. Afin d'améliorer les caractéristiques physico-mécaniques un ensemble d'essais en laboratoire (limite d'Atterberg, essai Proctor, essai de cisaillement direct, essai œdométrique et essai de résistance à la compression) ont été réalisés sur un sol reconstitué traité avec différentes teneurs en fibres de paille de blé. Les résultats obtenus indiquent qu'il y a une amélioration des caractéristiques de compressibilité du sol traité, une diminution remarquable de l'indice de gonflement et de l'indice de compressibilité respectivement en fonction de l'augmentation de la quantité de la paille de blé.

➤ **Fibre de palmier**

Marandi et al. (2008) ont effectué des tests de résistance à la compression non confinée et des tests de compactage sur des échantillons de sol renforcés par des fibres de palm avec différent

teneur et longueur .Ils ont conclu que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de 0 à 1% de l'ajout de fibre.

➤ **Fibre de jute**

Aggarwal et Sharma (2010) ont utilisé différents pourcentages (0,2 à 1,0 %) de fibre de jute pour renforcer un sol argileux. Les auteurs ont utilisé le bitume pour enduire les fibres afin de les protéger des attaques microbiennes et éviter leur dégradation. Ils ont conclu que la fibre de jute réduit la densité sèche maximale et augmente la teneur en eau optimale. La valeur CBR maximale été observée avec des fibres de jute 10 mm de long et 0,8 % d'ajout, avec une augmentation de plus de 2,5 fois la valeur CBR du sol de référence.

➤ **Fibre de lin**

Segetin et al. (2007) ont amélioré la composition sol-ciment avec l'ajout de fibres de lin. Une peinture émail revêtement a été appliquée à la surface de la fibre pour augmenter sa force de liaison à l'interface avec le sol. Les auteurs ont recommandés d'utiliser la longueur de fibre de 85 mm avec une quantité de l'ordre de 0,6%.

### **I.3.2. Stabilisation des sols par des fibres synthétiques**

➤ **Fibre de verre**

Ayininuola et Balogun (2018) ont stabilisé un sol argileux par des fibres de verre en utilisant des pourcentages allant entre 0,4% et 3% avec un incrément d'ajout de 0,4%. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité de cet ajout dans la stabilisation à travers l'augmentation de la valeur CBR et la diminution de la densité sèche du sol traité. Par contre ils ont observé une augmentation de la teneur en eau optimale. Selon les auteurs, la valeur de 1,6 % représente le seuil de saturation pour ce type d'ajout (Rebiai et al. 2020).

➤ **Fibre de polypropylène**

Yetimoglu et al. (2005) ont effectué une série d'essais CBR sur des échantillons de sable et d'argile renforcés avec des géotextiles recouverts d'une couche de polypropylène. Ils ont constaté que la valeur de pénétration de la charge de piston la plus élevée avait tendance à augmenter avec l'augmentation de la teneur en fibres de renforcement. Les résultats des tests ont montré que l'augmentation de la teneur en fibres renforcées peut augmenter la fragilité du système de remblai de sable et de boue renforcée de fibres, entraînant une plus grande perte de résistance après le pic (tendance d'un comportement fragile).

Mahdi (2019) a étudié l'effet de fibres de polypropylènes sur une argile. Il a conclu qu'y a une amélioration du comportement du sol vis à vis le poinçonnement immédiat du sol et aussi vis-à-vis sa résistance à la compression.

Meddah et Merzoug (2017) ont évalué l'influence des fibres en polypropylène sur le comportement des sols sableux. Leur démarche expérimentale été d'incorporer des fibres avec différents dosages 0,3, 0,6, 0,9 et 1,2% ; ils ont conclu que la résistance au cisaillement et le déplacement maximal augmente avec l'augmentation du dosage en fibres.

➤ **Fibre de polyester**

Kumar et al. (2006) ont testé la compressibilité d'une argile avec un essai de compression simple en ajoutant au sol différents pourcentages (0%, 0,5%, 1,0%, 1,5% et 2,0%) de fibres polyester plates et frisées. Trois des longueurs (à savoir 3 mm, 6 mm et 12 mm) ont été choisies pour les fibres plates, tandis que les fibres frisées ont été coupées à 3 mm de long. Les résultats ont indiqué qu'au fur et à mesure que la longueur des fibres et/ou la teneur en fibres augmentent la résistance à la compression augmente.

➤ **Fibre de polyéthylène**

Kim et al.(2008) ont utilisé des fibres de polyéthylène avec des teneurs de 0%, 0,25%, 0,5%, 0,75% et 1% pour renforcer un sol léger dérivé du processus de dragage. Ils ont constaté que l'augmentation maximale de la résistance à la compression a été obtenue pour une teneur en déchets de fibre d'environ 0,25%. Choudhary et al. (2010) ont montré que l'ajout des fibres polyéthylène au sable local augmente la valeur CBR du sol traité.

➤ **Fibre de nylon**

Gosavi et al. (2004) ont mélangé des fibres de nylon et de jute à sol de mauvaise qualité géotechnique. Ils ont trouvé que la valeur CBR du sol augmente d'environ 50% par rapport au sol de référence. Comparé ce résultat avec la même quantité en fibre de coco l'amélioration de la valeur CBR été de l'ordre de 96%. La quantité optimale de fibres pouvant être mélangées au sol a été déterminée à 0,75 % et tout ajout de fibres au-delà de cette quantité n'a pas donné de résultats significatifs de la valeur CBR.

Murray et al. (2000) ont mis en place un programme d'essais en laboratoire pour évaluer les propriétés des sols argilo-sableux renforcés avec des fibres provenant de déchets de moquette en nylon. Les auteurs ont constaté, une augmentation de la résistance à la compression triaxiale de l'ordre de 204% avec un ajout des fibres de tapis d'environ 3%.

➤ **Fibre d'acier**

Ghazavi et Roustaie (2010) ont recommandé, pour les sols affectés par les cycles de gel-dégel, les fibres de polypropylène comparées (selon les auteurs) avec les fibres d'acier. Sachant que, les fibres de polypropylène possèdent un poids volumique inférieur à celui des fibres d'acier, elles diminuent le volume de l'échantillon plus que les fibres d'acier.

➤ **Fibre d'alcool polyvinylique**

Park et al. (2009) ont montré que l'ajout de 1% de fibres d'alcool polyvinylique (PVA) à 4 % de sable de ciment donne une augmentation double de la résistance à la compression axiale de l'échantillon traité.

➤ **Fibre de caoutchouc**

Yadav et al. (2017) ont étudié l'effet des déchets de pneus en caoutchouc sur certaines propriétés géotechniques d'une argile mélangée avec du ciment. Trois pourcentages de ciment ont été utilisées (0 %, 3 %, 6 %) avec cinq pourcentages de fibres de caoutchouc (0 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 %, 10 %). Les auteurs ont effectué des tests de compression, de résistance à la traction, de pression de gonflement avec cycles sec/humide. Ils ont utilisé la microscopie à balayage électronique sur des mélanges d'argile, de ciment et de fibres de caoutchouc pour s'assurer de l'adéquation des fibres de caoutchouc à la stabilité des coulis de ciment.

### **I.3.3. Stabilisation des sols avec des cheveux humains**

➤ **Fibres des cheveux humains**

Les fibres des cheveux humains présentent une résistance à la traction relativement acceptable. Pour les applications géotechniques, les cheveux humains peuvent être un ajout de renforcement. Elias et al. (2016) ont étudié les effets des fibres des cheveux humains combinés avec la chaux pour stabiliser un sol argileux. Ils ont conclu que lorsque l'argile pure est mélangée à 1,5 % de cheveux humains, une augmentation de la résistance à la compression de 45,9 % est observée. Pour un ajout 9 % de chaux la résistance à la compression augmente de 87 %. Par contre, une combinaison de 9 % de chaux et 1,5% de cheveux humains, améliore la résistance à la compression d'environ 90,4%.

#### **I.4. Conclusion**

L'utilisation des déchets sous forme de fibres naturels ou synthétiques dans le domaine de la géotechnique a connu un développement remarquable ces dernières décennies. Dans de nombreuses applications l'utilisation des fibres peut améliorer les propriétés techniques des matériaux y compris le sol et réduire les coûts par rapport à l'utilisation des matériaux traditionnels.

Dans la bibliographie, nous avons constaté que l'utilisation des cheveux humains est très limitée, alors qu'elle est prometteuse, ce qui nous a encouragé à choisir ce thème afin de contribuer d'avantage à promouvoir l'utilisation des déchets sous forme de fibres naturels (à savoir les cheveux humains) dans la stabilisation et/ou le renforcement des sols argileux.



## **CHAPITRE II**

# **MINÉRALOGIE DES SOLS FINS**



## II.1. Introduction

Les sols fins contiennent de grandes proportions de limon et d'argile, ce qui affecte ses propriétés géotechniques sous l'influence des charges qui lui sont appliquées ; ce type de sol gonfle et devient plastique en présence d'eau.

Les minéraux argileux proprement dits sont soit simplement repris par érosion à partir des roches argileuses préexistantes ; soit formé par altération de minéraux ou roches antérieurs (micas, feldspath, verres volcaniques) ; soit enfin le produit de la transformation d'autres minéraux argileux (Gopal et Rao 2005, Budhu 2007, Bouafia 2013).

## II.2. Diverses phases du sol

Le sol est un complexe multiphasique, il est composé principalement de trois phases (Figure II.1) ; **solide** (grains solides de différentes tailles), **liquide** (eau), **gazeuse** (air).

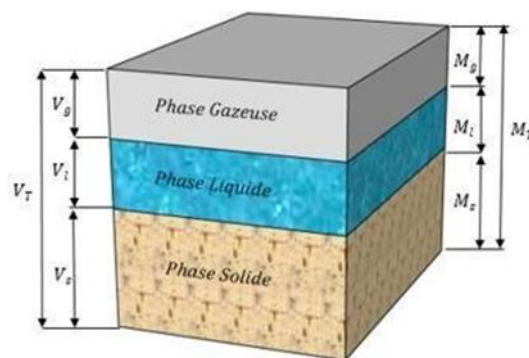


Figure II.1. Diagramme des phases d'un sol

### II.2.1. Phase solide

La phase solide du sol est en général majoritairement minérale elle comprend :

❖ **Eléments grossiers :**

Ce sont les éléments  $> 2$  mm et on les classe par dimensions :

- ✓ 0,2 cm à 2 cm : graviers.
- ✓ 2 à 5 cm : cailloux.
- ✓ 5 à 20 cm : pierres.
- ✓ 20 cm : blocs.

Leur expression se fait en pourcentage, qu'on donne sur le terrain en fonction du volume et en laboratoire en fonction de la masse (au laboratoire, sur un échantillon de sol, on estime le pourcentage après passage au tamis de 2 mm).

❖ Terre fine :

La terre fine est la fraction de terre qui reste lorsqu'on retire les éléments grossiers (donc < 2 mm, au tamis). On peut classer les éléments de la terre fine par dimensions :

- 2 mm à 0,2 mm : sable grossiers.
- 0,2 mm à 50  $\mu\text{m}$  : sable fins.
- 50  $\mu\text{m}$  à 20  $\mu\text{m}$  : limons grossiers.
- 20  $\mu$  à 2  $\mu$  : limons fins.
- < 2  $\mu$  : argiles.

Elle comprend aussi une fraction organique dont le taux varie selon le type de sol et les conditions pédologiques. Les sols cultivés présentent des taux de matière organique compris dans une gamme allant de moins de 1% à 20% de la masse du sol.

### II.2.2. Phase liquide

La phase liquide du sol est souvent désignée par le terme « solution du sol », elle occupe une partie plus ou moins importante de la porosité du sol, est constituée d'eau où se trouvent diverses substances organiques et minérales dissoutes et des particules en suspension. La composition de la solution du sol varie selon :

- ✓ Le climat,
- ✓ Les apports anthropiques (fertilisants, produits de traitement phytosanitaire, etc.)
- ✓ L'activité biologique du sol (produits de synthèse et de dégradation microbienne, etc.)

### II.2.3. Phase gazeuse

Dans un sol bien aéré, les gaz qui règnent dans l'atmosphère du sol sont :

- ✓ L'azote (78 à 80%) ;
- ✓ L'oxygène (18 à 20%) ;
- ✓ Le dioxyde de carbone (0,2 à 3%).

D'autres molécules gazeuses d'origine anthropique telles que les pesticides peuvent également être détectées dans l'atmosphère du sol. Ces gaz peuvent exister dans le sol soit à l'état libre, soit dissous dans la solution du sol. Cependant, dans certaines conditions tout l'espace poral du sol est alors occupé par l'eau et le sol est dit saturé. Dans ce cas, la phase gazeuse sera totalement absente (Moussaceb, 2014)

### **II.3. Définition des sols fins**

Ce sont des sols où les éléments fins dont le diamètre est inférieur à 20 $\mu$ m sont prédominant. Ils sont appelés également « sols cohérents ». Ils peuvent être formés sur place par l'altération des roches préexistantes ou bien, transportés par les agents naturels tels que l'air, l'eau ou la glace, ils sont ensuite sédimentés et déposés.

Les sols fins ont un comportement facilement déformable. De plus, l'eau a une influence très importante sur leur comportement mécanique.

Il existe différents types de sols fins tels que les argiles et les limons. Lors de la construction, il faut prendre en compte plusieurs propriétés afin d'éviter tout dommage aux ouvrages durant leur exploitation car ce type de matériau est souvent exposé au risque de mouvement de terrain (glissement, effondrement, éboulements et tassements). Pour pallier ces aléas géotechniques, il faut respecter certaines règles de construction et de mise en œuvre en faisant appel à des techniques de stabilisation et/ou de traitement des sols adaptées et bien étudiées.

### **II.4. Les argiles**

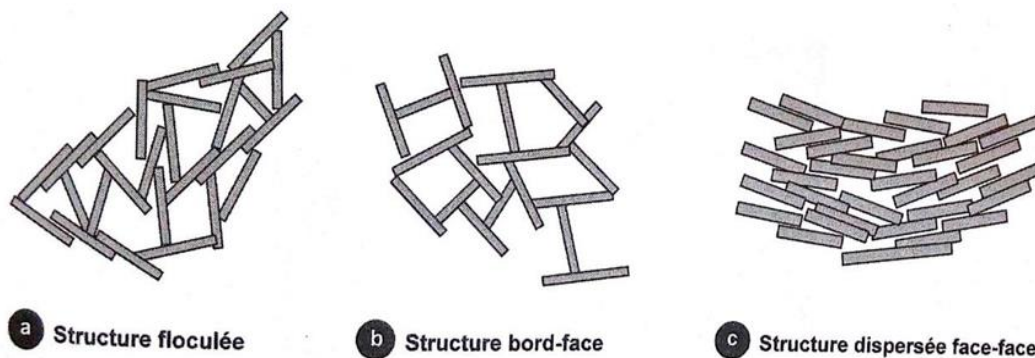
En général le terme argile s'applique à tous les matériaux dont la fraction granulométrique prédominante (taille des particules) est inférieure à 2 $\mu$ . C'est une roche sédimentaire composée pour une large part de minéraux argileux, en général des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant une structure feuilletée (phyllo-silicates) expliquant leur plasticité, ou fibreuse (sépiolite et palygorskite) expliquant leurs qualités d'absorption (Benmassoud, 2017).

#### **II.4.1. Structure physique des argiles**

Les particules d'argile qui constituent la base des sols argileux ont des propriétés très différentes de celles des particules des sols grenus. Chaque particule d'argile est normalement entourée de molécules d'eau plus ou moins liée, aux propriétés différentes de celles de l'eau libre. On admet généralement que le contact de deux particules d'argile peut être de type « solide-solide », de type « air-solide », de type « eau-solide » ou « eau-eau », ou être contrôlé par des forces de répulsion ou d'attraction électrique. Mais toutes ces représentations des contacts de particules de dimensions inférieures au micromètre sont encore un peu hypothétiques et les recherches se poursuivent pour mieux les caractériser.

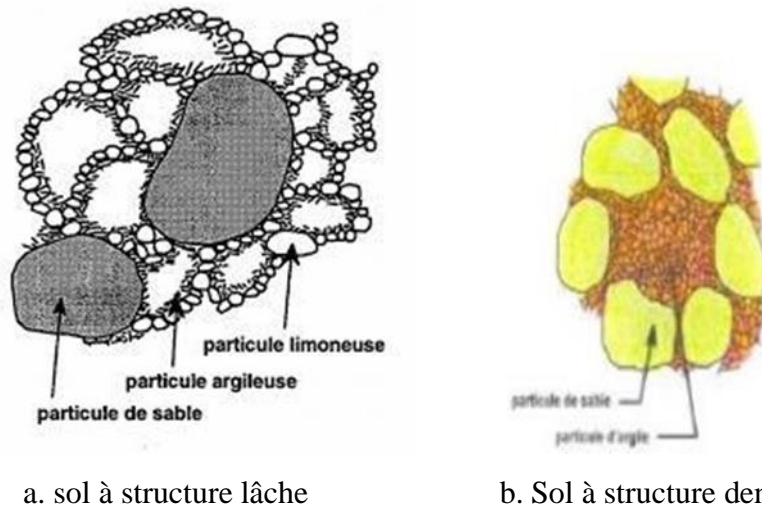
Nous retiendrons que la pesanteur joue un rôle secondaire dans l'arrangement des particules d'argile et que les forces dominantes sont les forces d'attraction et de répulsion électrique, qui conditionnent le volume occupé par une masse donnée de particules d'argile. Des expériences en laboratoire ont montré que la floculation des particules d'argile (qui leurs fait occuper un plus grand volume) est favorisée par l'augmentation de la concentration en électrolyte (par exemple le chlorure de calcium), de la valence des ions et le PH. Ces comportements élémentaires expliquent par exemple pourquoi les argiles déposées dans l'eau de mer sont différentes des argiles déposées en eau douce ou dans des lagunes.

Les résultats finals des interactions physico-chimiques des particules lors de la sédimentation des argiles est qu'il existe des structures plus ou moins lâches, dont la représentation traditionnelle est donnée sur la figure II.2 : une structure floculée « en nid d'abeilles » ou les particules forment des sortes de chaines fermées, une structure floculée « en château de cartes » ou les particules s'appuient les unes sur les autres et une structure dispersée ou les particules sont empilées « structure en paquet de cartes » (Jean, P. 1999-2000).



**Figure II.2.** Trois structures types des sédiments argileux

Dans le cas fréquent des sols comportant à la fois des particules grossières et des particules argileuses, les structures observées sont des combinaisons des précédentes, suivant les conditions physico-chimiques de la sédimentation. On pourra par exemple trouver des structures lâches (figure II.3. a) ou des structures plus denses (figure II.3. b).



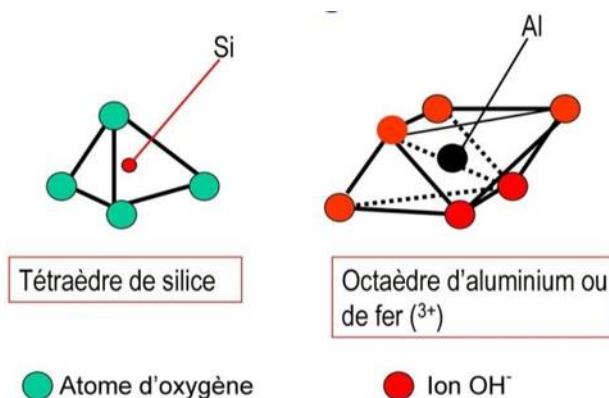
**Figure II.3.** Structure des sols constituent de particules grossières et de particules fines (Kezdi, 1974).

### II.4.2. Les structures et les textures des argiles

#### a. Structures

Les particules d'argile sont formées d'un empilement de feuillets qui sont constitués par l'association de deux unités structurales de base, ces feuillets sont formés par la juxtaposition des couches structurales tétraédriques (silice) et octaédriques (aluminium).

- La structure d'un tétraèdre : est formée par quatre atomes (têtes) d'oxygène ( $O_2^-$ ) ou d'hydroxyle ( $OH^-$ ) et un atome de silicium ( $Si_2^+$ ) qui se positionne au centre de cette structure.
- La structure d'un octaèdre : est formée par six atomes (têtes) d'oxygène ( $O_2^-$ ) ou d'hydroxyle ( $OH^-$ ) et un atome d'aluminium ( $Al_3^+$ ) ou de magnésium ( $Mg_2^+$ ) se positionne au centre de cette structure (Aggoun, 2018).



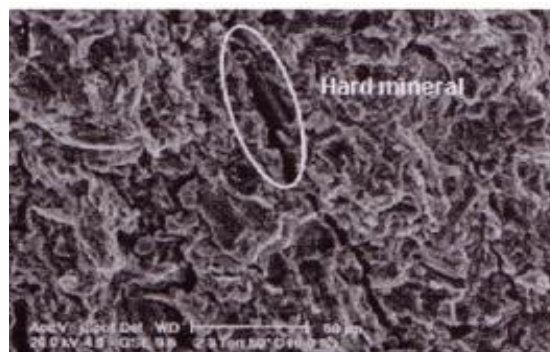
**Figure II.4.** Présentation des tétraèdres et octaèdre

## b. Textures

La texture des minéraux argileux dépend du mode de sédimentation et de l'état de consolidation. Une roche argileuse qui présente une organisation serrée et orientée des particules d'argiles n'a pas le même gonflement qu'un sol argileux dont la sédimentation a été rapide et récente et pour lequel la distance entre les plaquettes est maximale. Cette organisation des minéraux argileux est la principale cause du gonflement anisotrope.

Les matériaux argileux ne sont pas uniquement composés des argiles. Au sein de la fraction argileuse, plusieurs types de minéraux peuvent coexister. La texture des matériaux argileux se superpose donc aux organisations des autres minéraux non argileux. Cette hétérogénéité rend la structure et la texture extrêmement complexes, surtout lorsque les minéraux argileux sont cimentés par d'autres minéraux carbonatés (Belabbaci. 2014).

Les observations microscopiques effectuées par Montes et al. 2003 (Azzouz, 2006) sur les argilites, subissant des cycles d'humidification dessiccation, confirment des fracturations le long des surfaces localisées à proximité des matériaux rigides non gonflants (figure II.5).



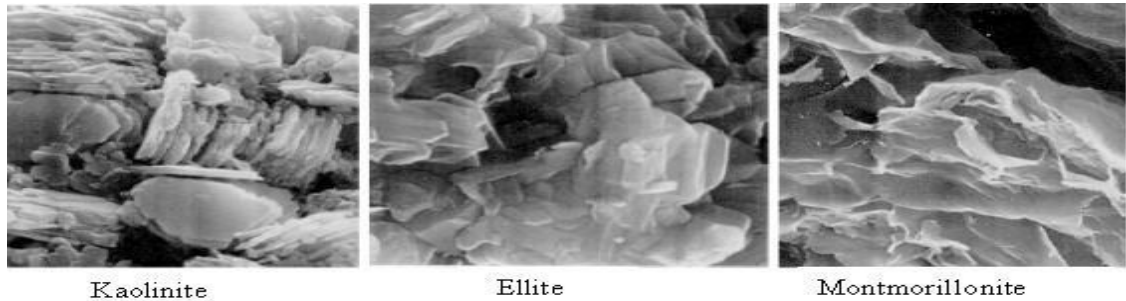
**Figure II.5.** Ouverture des fissures en proximité des matériaux rigides, Montes et al. 2003 (cité par Azouz, 2006)

L'évolution de la micro-texture en fonction de l'hydratation peut être observée à l'aide du Microscope électronique à balayage (M.E.B.) ou avec la tomographie à rayons X.

La figure II.6 présente des images de ces argiles prises au microscope électronique à balayage. Les observations au M.E.B. permettant d'analyser l'évolution de la texture au cours du gonflement montrent que, pour la Kaolinite, le gonflement est uniquement de type inter-agrégats, au niveau des pores interstitiels alors que pour les Smectite, le gonflement est de type intra-agrégats, c'est-à-dire entre les feuillets. Ces observations microscopiques confirment une nouvelle organisation des feuillets argileux qui se manifeste par un écartement parallèle observable dans le cas des roches argileuses ou par un effet combiné d'un écartement et d'une

rotation comme c'est le cas pour les sols argileux non indurés.

Globalement, le pourcentage en minéraux gonflants, les carbonates, les minéraux non gonflants d'une part, et la nature de la consolidation d'autre part, présentent une influence notable sur le gonflement, le retrait et le changement des propriétés mécaniques.



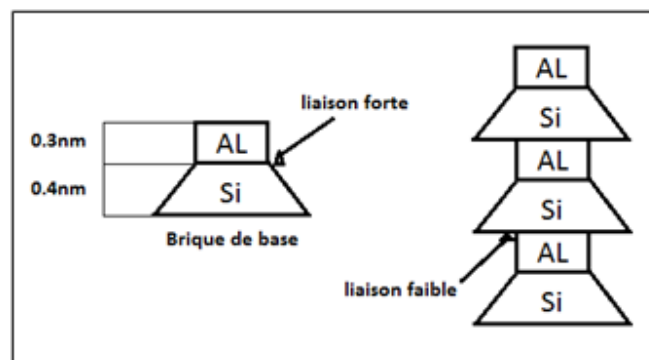
**Figure II.6.** Photographies au microscope électronique à balayage des argiles (Mitchell, 1993)

### II.4.3. Les différents types des argiles

Ces deux structures donnent naissance aux différents types d'argiles qui sont présentées dans ce qui suit (Aggoun, 2018).

#### a. Kaolinite

La kaolinite est constituée d'une succession alternée de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite). Les deux feuillets sont liés de telle manière que les sommets du feuillet de silice et ceux d'une des couches du feuillet en octaèdre ne forment qu'une seule et même couche (figure II.7). L'épaisseur du feuillet élémentaire de la kaolinite est d'environ 7 Å mais les dimensions dans les deux autres directions sont infinies. Ces particules sont stables et leur structure élémentaire n'est pas affectée par la présence d'eau (McCarthy 2007 ; Holtz et Kovacs 1991).



**Figure II.7.** Structure de la kaolinite



### b. Montmorillonite

La montmorillonite, parfois appelée Smaltite, est un minéral argileux important composé de deux feuillets de Silice et d'un feuillet d'Alumine (Gibbsite). Les feuillets en octaèdres se trouvent entre deux feuillets de Silice et les sommets des tétraèdres se confondent avec les hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former qu'une seule couche (Lambe, 1953 ; Grim 1959).

Les sols qui contiennent de la montmorillonite peuvent être gonflants lorsque leur teneur en eau augmente, les pressions de gonflements qui en résultent peuvent provoquer la dissociation complète des feuillets ce qui va causer des dommages aux structures légères et pavages (figure II.8).

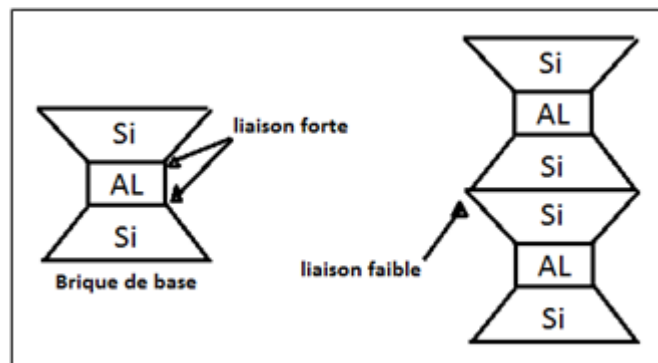


Figure II.8. Structure de la Montmorillonite

### c. Illite

L'Illite est une autre composante importante des sols argileux, elle a une structure analogue à la montmorillonite mais il y a des ions de potassium intercalés entre les feuillets tétraédriques. Grâce à ces ions, la liaison est relativement forte et les molécules d'eau ne peuvent pratiquement plus s'intercaler. Aux extrémités de la particule d'argile, il y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations. Ces cations dits échangeables jouent un rôle important dans le comportement des argiles (figure II.9). Les Illites sont des particules de dimensions plus petites que la kaolinite de diamètre équivalent moyen de  $0,3 \mu\text{m}$ , et d'une épaisseur de  $100 \text{ \AA}$  (Lambe 1953)

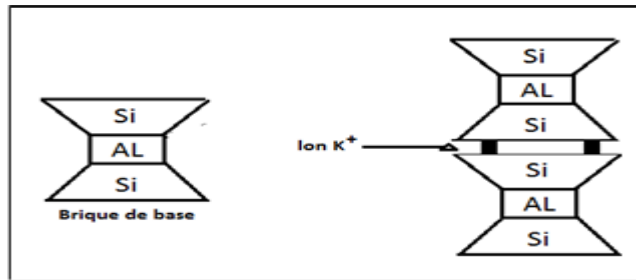


Figure II.9. Structure de l'illite

#### d. Smectites

Sa structure est similaire à celle des Illites, sauf que l'empilement des feuillets élémentaires est composé de feuillets renversés. L'empilement met en contact deux couches d'oxygène appartenant au tétraèdre de silice, rendant ainsi la liaison inter-foliaire faible. La distance inter-foliaire est, à l'origine, de  $14\text{\AA}$ . Elle peut s'élargir pour atteindre  $18\text{\AA}$ . Les liaisons entre les feuillets sont moins fortes que celles des kaolinites et des illites (Holtz et Kovacs 1991).

La structure minéralogique des Smectites offre de grands espaces inter-foliaires. De ce fait, l'inclusion de molécules d'eau ou de matières organiques et cations est favorisée (figure II.10). Le potentiel de gonflement de ce type d'argile est, par conséquent, élevé.

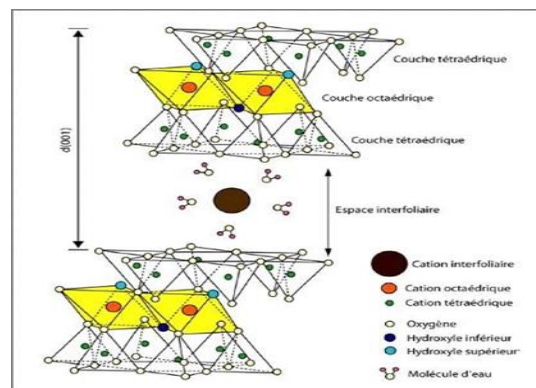


Figure II.10. Feuillet de la Smectites

#### e. Chlorites

Les Chlorites sont des argiles de composition semblable à celle des Smectites. L'espace inter-foliaire contient une couche composée de magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) et d'ions hydrogène ( $\text{OH}^-$ ). L'Aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ) est remplacé localement par le fer ( $\text{Fe}^{2+}$ ), la liaison inter-foliaire est, de ce fait, affaiblie, ce qui permet une infiltration d'eau (figure II.11). Les Chlorites existent parfois dans les roches magmatiques. Elles sont également rencontrées dans les roches sédimentaires. Les argiles contenant un pourcentage de chlorite supérieur à 15% peuvent être sujettes de gonflement (Mitchell, 1976).

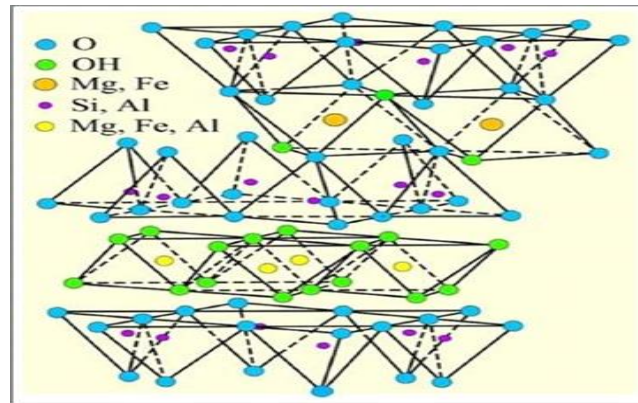


Figure II.11. Feuillet de la Chlorite

### II.5. Phénomène de gonflement

C'est un phénomène qui se développe, en présence d'eau, à l'échelle microscopique au niveau des particules argileuses, et se traduit souvent, malheureusement, à l'échelle macroscopique par des dommages importants sur les ouvrages.

### II.6. Transformation des minéraux argileux par dégradation et aggradation

La transformation des minéraux argileux consiste en une modification du minéral argileux tout en conservant son type de structure (Milot, 1964 ; Bell, 1988). On distingue les transformations par dégradation (sous traction d'ions) et par aggradation (fixation d'ions supplémentaires). Ces transformations peuvent avoir lieu au cours de l'altération ou pendant la sédimentation et la diagenèse.

### II.7. Contexte de formation des sols argileux

La sédimentation océanique argileuse est directement liée au type d'altération régnant sur les continents voisins et dépend donc de la latitude et de la nature de la roche mère, mais aussi de l'éloignement des sources ainsi que des conditions physico-chimiques régnant dans la zone de sédimentation.

Tableau II.1. Occurrence des minéraux argileux dans les sols en fonction du climat (Armines, 2006).

Climat	Origine des argiles	Minéraux fréquents
Glaciaire	Héritage	Illite, chlorite.
Boréal tempéré	Héritage, transformation	Vermiculite, interstratifiés, illite, Chlorite, smectites.
Méditerranéen Subtropical	Héritage, transformation, Néof ormation	Smectites.
Desertique	Héritage	Illite, chlorite.
Equatorial	Néof ormation	Gibbsite, kaolinite.

La nature minéralogique des argiles dépend aussi de la roche mère :

- La Kaolinite provient de l'altération des roches magmatiques grenues et acides (feldspaths principalement) ;
- L'Illite de l'altération des roches magmatiques et métamorphiques ;
- Les Smectites de l'altération des roches volcaniques ;
- Les Attapulgites et Sépiolites (argiles fibreuses) sont associés à des dépôts lagunaires.

Ces différentes familles d'argile, associées à d'autres minéraux d'origine détritique (quartz essentiellement) et/ou chimique (calcite, dolomite essentiellement) et à des minéraux accessoires sont les constituants principaux des sols argileux. Leurs caractéristiques mécaniques et géotechniques sont directement liées à la nature des minéraux argileux et aux transformations dia-génétiques subies par la suite.

Les marnes sont des matériaux d'origine chimique, biochimique ou détritiques dont la quantité en carbonates est comprise entre 35 et 65%. Le terme d'argile calcaire est utilisé pour un pourcentage en carbonates compris entre 5-35% (Belabbaci, 2014)

## **II.8. Principales caractéristiques des minéraux argileux**

Les principales caractéristiques des minéraux argileux qui influencent le gonflement sont les suivantes :

### **II.8.1. Densité de charge spécifique**

La densité de charge spécifique est égale au rapport entre la capacité d'échange cationique (CEC) et la surface spécifique (S) de la particule argileuse. Deux types de charge existent dans les milieux argileux :

- Une charge permanente ou structurelle liée aux substitutions ioniques ( $Al^{3+}$  pour  $Si^{4+}$  dans la couche tétraédrique;  $Mg^{2+}$  ou  $Fe^{2+}$  pour  $Al^{3+}$  dans la couche octaédrique),
- Une charge de surface variable selon le PH du milieu liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux.

La densité de charge spécifique renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux. L'augmentation de la densité de charge spécifique réduit le gonflement ou la pression de gonflement des matériaux argileux. Cette augmentation entraîne l'attraction des ions, ce qui provoque une condensation de la double couche, donc une diminution de son épaisseur. Lefevbre et Lajudie (1999) ont effectués des essais de gonflement libre pour différentes argiles de densité de charges différentes et ont montré une baisse du potentiel de gonflement avec l'augmentation de la densité de charge (Allam, 2011).

### II.8.2. Capacité d'échange cationique (CEC)

La mesure de la capacité d'une argile échangée des cations est exprimée en milli équivalent par 100 grammes d'argiles et varie dans le même sens que la densité de charge surfacique. Donc, pour les argiles ayant une valeur élevée de CEC, elles ont tendance à peu gonfler.

### II.8.3. La surface spécifique (S)

Les argiles sont composées de la surface externe comprise entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace inter-foliaire. L'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir de gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevée.

Les principales caractéristiques de quelques types d'argiles sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau II.2.** Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux, d'après (Lepluart, 2002), cité par (Cabane ,2004).

Minéraux	Surface interne (m <sup>2</sup> /g)	Surface externe (m <sup>2</sup> /g)	Surface totale (m <sup>2</sup> /g)	CEC (milliéquivalent/100g)
Kaolinite	0	10-30	10-30	5-15
Illite	20-55	80-120	100-175	10-40
Montmorillonite	600-700	80	700-800	80-150
Vermiculite	700	40-70	760	100-150
Chlorite	---	100-175	100-175	10-40

## II.9. Nature des liaisons chimiques

### II.9.1. Cations échangeables

Les substitutions isomorphes d'Al<sup>3+</sup> par Mg<sup>2+</sup> a la surface des feuillets entraînent un excès de charge négative. Pour assurer l'électron-neutralité, ce déficit de charge est compensé par des cations Ca<sup>2+</sup> ou Na<sup>+</sup>. Les montmorillonites compensées par des cations Ca<sup>2+</sup> sont appelées des montmorillonites calciques. Lorsqu'elles sont compensées par des cations Na<sup>+</sup>, elles sont appelées des montmorillonites sodiques.

Ces cations échangeables se fixent à la surface des feuillets et assurent la liaison entre eux.

L'intensité de ces liaisons dépend de la valence de ces cations. A titre d'exemple, la valence des cations de sodium Na<sup>+</sup> est plus faible que celle des cations de calcium Ca<sup>2+</sup>, c'est pour cette raison que la montmorillonite sodique aura la plus grande surface spécifiques, ce qui est propice à la fixation des molécules d'eau et des cations entre ces feuillets.

En effet, deux types de gonflement peuvent se produire au sein des matériaux argileux :

- Le gonflement intra-particulaire ou inter-foliaire ;
- Le gonflement inter-particulaire.

### **II.9.1.1. Gonflement inter-foliaire et inter-particulaire**

L'analyse minéralogique montre que certaines argiles, pour lesquelles les liaisons inter-feuillets sont très faibles, ont la propriété de fixer les molécules d'eau entre deux feuillets voisins (c'est le cas de Smectite, la montmorillonite, et certaines chlorites). L'eau pénètre à l'intérieur des particules et s'organise en couches mono-moléculaires, il s'agit alors d'un gonflement intra-particulaire ou inter-foliaire (Didier, 1972), cité par (Wakim, 2005). Il intervient à l'échelle la plus petite de la structure argileuse mais peut présenter une ampleur très importante.

En dehors de ce cas particulier, qui définit les argiles dites "gonflantes", le gonflement est inter-particulaire, c'est-à-dire que l'eau ne pénètre pas à l'intérieur des particules d'argiles. Ce gonflement inter-particulaire, contrairement au gonflement inter-foliaire, a une ampleur assez limitée, mais affecte toutes les argiles.

### **II.9.2. Interaction entre argiles et cations alcalins**

D'après la structure des argiles décrite précédemment, il existe trois types d'endroit d'adsorption pour les cations. La surface externe des particules d'argile se compose de la surface basale, négativement chargée, et des bordures des particules, constituées d'endroit acido-basiques. Un troisième endroit est accessible aux cations il s'agit de l'espace inter-foliaire, sous réserve que la distance entre feuillets soit suffisante.

#### **II.9.2.1. Influence de la nature des cations alcalins**

- **Sur la force de l'interaction avec la surface**

Les particules argileuses, chargées négativement, possèdent une grande aire de surface qui leur permet d'interagir fortement entre elles, par des phénomènes essentiellement électrostatiques. Le mode d'interaction entre ces particules dépend notablement des cations compensateurs en présence. La force de liaison des cations avec la surface argileuse dépend de l'énergie d'hydratation du cation, de sa taille ionique, de sa charge et de sa polarité.

Pour une montmorillonite, la force d'interaction des principaux ions inorganiques avec la surface augmente selon l'ordre suivant :  $Li^+ < Na^+ < K^+ < Rb^+ < Ca^{2+} < Cs^+$ . La capacité d'un cation à s'échanger à la surface négative des argiles augmente lorsque son rayon hydraté diminue et que sa polarité augmente, lorsque sa charge augmente, et lorsque sa capacité à s'hydrater diminue (Belabbaci, 2014).

- **Sur la sélectivité de l'échange**

La rétention irréversible des cations, c'est-à-dire leur fixation, peut parfois résulter en un comportement anormal de l'échange ionique. Pour la montmorillonite, de telles fixations ont par exemple pu être observées dans le cas du potassium et du césium.

La fixation de ces ions entraîne en général un écrasement des feuillets, qui sont solidement liés entre eux, l'inter feuillet devenant inaccessible à tout échange ionique et également à l'adsorption d'eau. Dans ce cas, l'ordre établi pour les échanges ioniques se trouve inversés, et les cations dont les rayons non hydratés sont les plus faibles qui parviennent à pénétrer l'espace inter feuillet et à s'échanger avec les cations fixés. Une fois dans l'inter-feuillet, ces nouveaux cations peuvent s'hydrater et séparer les feuillets, permettant ainsi l'échange d'autres cations fixés. Ainsi, les Smectites présentent une forte sélectivité pour le césium et le potassium comparativement aux autres cations. Cette sélectivité est contrôlée par la densité de charge des surfaces basales et l'aire des bordures des particules. Ainsi l'Illite présente, du fait de sa plus forte densité de charge, une meilleure sélectivité pour  $\text{Cs}^+$  et  $\text{K}^+$  que les Smectites (Belabbc, 2014).

- **Sur le mode d'interaction des ions avec la surface de l'argile :**

D'après Sudhakar et al. (2000) cités par Azzouz (2006) les interactions entre cations inorganiques et surfaces argileuses dépendent de quatre facteurs :

- Le rayon des cations non hydratés ;
- La charge des cations ;
- Leur énergie d'hydratation ;
- Les interactions spécifiques.

Plus les deux premiers paramètres sont élevés et plus le troisième est faible, plus les interactions sont fortes. Ces trois premiers facteurs sont généralement à l'origine de liaisons fortes entre un cation et une surface négativement chargée. Le quatrième est plus caractéristique d'interactions spécifiques entre un cation et une argile donnée.

## **II.10. Principales causes de gonflement**

La recherche bibliographique a permis de mettre en évidence quatre principaux phénomènes expliquant les causes du gonflement :

- Hydratation par adsorption ;
- Hydratation par osmose ;
- Hydratation par capillarité ;
- Transformations chimiques.

### II.10.1. Hydratation par adsorption

Les argiles sont principalement caractérisées par un déséquilibre électrique dû à une substitution isomorphe de cations dans la structure octaédrique des feuillets. Il en résulte alors la formation de la double couche diffusée due à la fixation des cations échangeables qui s'installent à la surface des feuillets du fait des forces électrostatiques qui sont les suivantes :

- **Forces d'attractions**

Généralement causées par les forces de Van Der Waals entre les feuillets voisins.

- **Forces de répulsion**

Ayant plusieurs composantes (interaction des doubles couches associées aux feuillets, énergie d'hydratation des cations compensateurs).

Ces deux forces décroissent rapidement avec la distance inter-particulaire. Quant à la force de répulsion, elle diminue également avec l'augmentation de la concentration en électrolytes (figure II.12)

Les variations de concentrations en cations, et en anions dans la double couche, sont déterminées à partir de l'équation de Poisson-Boltzmann et sont présentées sur la figure II.12. A proximité de la surface chargée, la concentration en cations est plus élevée que celle en anions.



**Figure II.12.** Forces électrostatiques dans la double couche, répartition des ions autour d'une particule chargée.

La nature des cations compensateurs joue un rôle important. En effet, le rayon ionique hydraté varie avec le type du cation échangeable. Le tableau II.3 présente, lors de l'hydratation du cation compensateur, l'écartement des feuillets d'argiles qui sera d'autant plus faible que le rayon ionique hydraté sera petit (Wakim, 2005).



**Tableau II.3.** Dimensions des cations hydratés et non hydratés, (Iltis, 1979)

Cation compensateur	Rayon ionique (Å°)	
	Non hydraté	Hydraté
Li <sup>+</sup>	0,6	7,3
Na <sup>+</sup>	0,95	5,6
K <sup>+</sup>	1,33	3,8
Rb <sup>+</sup>	1,58	3,6
Cs <sup>+</sup>	1,67	3,6
Ca <sup>2+</sup>	0,99	9,6
Mg <sup>2+</sup>	1,08	10,8

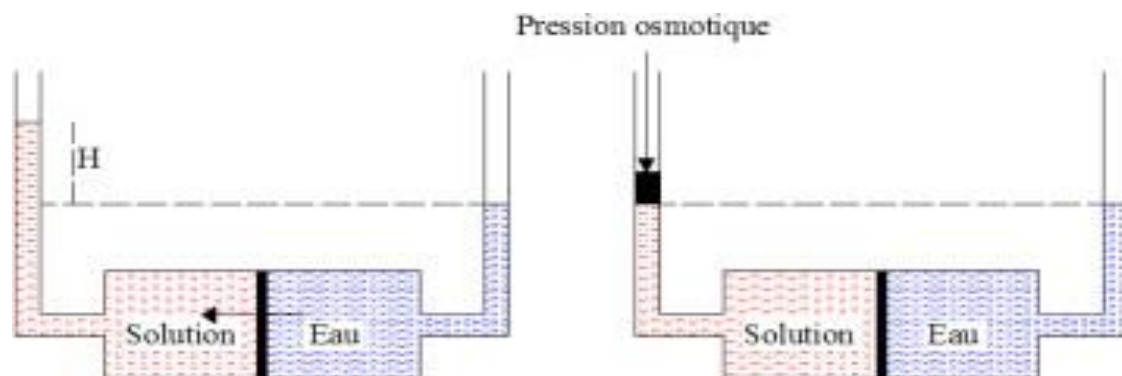
Aboubeker et Mamoune (2004) ont montré l'influence du rayon hydraté de la solution chimique (KCl, NaCl, et CaCl<sub>2</sub>) sur le gonflement des argiles. Leurs essais du gonflement libre témoignent du fait que le cation (Ca<sup>2+</sup>) cause le plus grand gonflement, (K<sup>+</sup>) le plus faible et (Na<sup>+</sup>) est intermédiaire. La stabilité des cations compensateurs est aussi très importante. En effet, les cations sont liés aux feuillets par des forces de nature électrostatique et possèdent les propriétés d'être échangeables. Cette facilité d'échange sera aussi un facteur influant sur le gonflement.

Le classement général admis est le suivant : Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sup>4+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>.

D'après cette série, le lithium est le plus facile à remplacer alors que l'aluminium est le plus difficile.

### II.10.2. Hydratation par osmose

Lorsqu'une solution saline est séparée de l'eau pure par une membrane semi-perméable idéale (permettant uniquement le passage des molécules d'eau mais non des substances dissoutes), l'eau pure a alors tendance à traverser la membrane pour diminuer la concentration de la solution. Ce phénomène est appelé osmose. La pression qu'il faut appliquer pour empêcher l'arrivée de l'eau dans la solution saline est nommée la pression osmotique (figure II.13)



**Figure II.13.** Phénomène osmotique idéal

Si la concentration de l'eau libre est inférieure à la concentration de l'eau de la double couche, ils ont résultent alors une migration des molécules d'eau des pores larges vers les particules argileuses entraînant l'augmentation de la distance inter-feuillet.

Par contre, il en résulte une pression osmotique d'attraction entraînant la contraction du matériau argileux. Le phénomène d'hydratation par osmose permet d'expliquer le fait que lorsque la salinité de la solution d'hydratation augmente, le matériau argileux gonfle moins (Azzouz, 2006).

### II.10.3. Hydratation par capillarité

La capillarité est une caractéristique des matériaux non saturés de faible porosité. Elle se traduit par une extension dans la phase liquide lors de la saturation ou par une contraction lors de la désaturation.

La saturation des matériaux fins après une phase de drainage peut entraîner le piégeage de l'air par l'eau à l'intérieur du réseau poreux. Ce mécanisme peut engendrer la compression de l'air responsable de la dégradation ou de la fragmentation des matériaux argileux. La capillarité dépend du phénomène d'adsorption, le film d'eau adsorbé diminue l'espace poreux et modifie par la suite la capillarité.

Dans l'hypothèse de pores cylindriques, la pression capillaire ( $P_c$ ) est déterminée par la loi de Jurin :  $P_c = U_a - U_w = 2 \sigma \cos \theta / r_c$

( $u_a$ ) et ( $u_w$ ) sont respectivement les pressions d'air et d'eau, ( $\sigma$ ) est la tension de surface eau-air et ( $\theta$ ) est l'angle de raccordement entre le ménisque et le solide.

Cette relation implique qu'au niveau du ménisque, plus  $r_c$  (rayon du ménisque) est petit, plus la pression d'eau est inférieure à la pression d'air. Comme en mécanique des sols ou des roches, la pression atmosphérique est négative.

Plusieurs facteurs affectent la capillarité des milieux poreux :

- La pression et la distribution des pores ;
- Les fluides et solides impliqués et l'histoire de saturation.

En résumé, l'attraction de l'eau par un matériau argileux non saturé se réduit pas simplement à l'action de la succion totale où interviennent également les actions d'adsorption physico-chimiques.

Santos et al. (1996) ont exposé deux échantillons d'argilite initialement sèches à l'eau et à l'huile. L'échantillon mis en contact avec de l'eau est altéré. Malgré le fait que l'huile soit infiltrée dans le deuxième échantillon, ce dernier n'a pas réagi. Les auteurs ont attribués ce phénomène aux interactions physico-chimiques primordiales dans les milieux argileux et non à

l'effet de la capillarité.

#### **II.10.4. Transformations chimiques**

Trois types de transformations chimiques se distinguent principalement (Bultel, 2001), cité par (Azzouz, 2006) :

- La transformation de l'anhydrite en gypse ;
- L'oxydation de la pyrite ;
- La dissolution des carbonates dans l'eau.

#### **II.11. Facteurs qui affectent le gonflement**

Les résultats de nombreuses études ont montré que l'amplitude du gonflement dépend de deux types de facteurs :

- Les facteurs intrinsèques.
- Les facteurs externes.

##### **II.11.1. Facteurs intrinsèques**

- La composition minéralogique ;
- Le type de cations compensateur ;
- La capacité d'échange en cations (CEC) ;
- La surface spécifique ;
- La structure du sol ;
- La quantité de minéraux non argileux.

##### **II.11.2. Facteurs externes**

D'autres paramètres indépendants de la structure des argiles et de la composition chimique de la solution hydratante peuvent avoir une influence importante sur le gonflement, on cite en particulier :

- Les conditions de compactage (statique ou dynamique) ;
- L'énergie de compactage ;
- La teneur en eau initiale ;
- La densité sèche ;
- L'effet d'échelle ;
- Le régime de contraintes ;
- Les cycles retrait-gonflement ;
- La durée des essais et la température.

## II.12. Mécanisme du retrait

A l'échelle macroscopique, l'hydratation ou la déshydratation d'un matériau argileux se traduit par des variations de son volume total. Lors de la déshydratation des sols argileux, la rétraction des sols commence en surface. La différence de pression qui se développe à travers les interfaces air-eau dans les vides en bordure de l'échantillon, due au départ de l'eau, est responsable du phénomène de retrait. Ce retrait s'accompagne, bien entendu, des modifications importantes de la structure du sol argileux (Nowamooz, 2007).

Pendant le drainage d'un sol on peut observer trois phases successives (Schubert, 1982, Nowamooz, 2007). Dans la première phase, tous les macro-pores sont complètement saturés (figure II.14 a). La deuxième phase, appelée phase transitionnelle, commence au point d'entrée d'air due à l'évaporation de l'eau de surface des macro-pores. La saturation du sol diminue et l'air entre dans les pores. En revanche, l'air sera enfermé dans les pores et quelques pores seront encore saturés (figure II.14 b). Dans la dernière phase, le sol ne peut plus perdre de volume, l'air occupe tout l'espace des macro-pores et l'état de volume constant sera atteint (figure II.14 c).

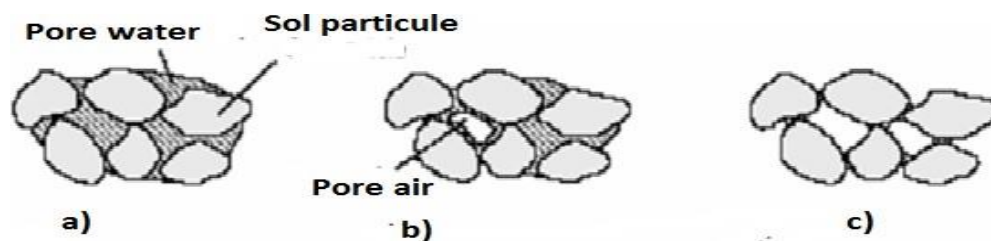


Figure II.14. Différentes phases du retrait (Schubert, 1982 ; Allam, 2011)

Le déroulement du retrait peut être décrit en trois phases :

- Retrait normal : la diminution du volume du sol est égale au volume d'eau perdu; dans cette phase, le sol est toujours saturé et donc, l'air n'entre pas dans les pores.
- Retrait résiduel : une fois la limite de retrait atteinte, l'air entre et occupe les vides du sol, de telle sorte que la diminution du volume du sol est beaucoup plus faible que le volume d'eau perdue.
- L'absence de retrait : le volume du sol ne peut plus varier du fait de l'agencement des particules, mais l'eau continue à s'évaporer.

Différents types d'essais de dessiccation (Philipponnat 1991, Biarez et al. 1988, AFNOR XP P 94-060 parties 1 et 2) sont réalisés pour caractériser la déformation ou le retrait des sols argileux. Toutefois, ces essais ne conduisent pas toujours aux mêmes caractéristiques. En outre, certains essais tendent à disparaître, en raison de problèmes pratiques posés par leur mise en œuvre (par exemple, l'utilisation de produits dangereux comme le mercure).

### **II.13. Conclusion**

Le sol est constitué de trois phases et un mélange de particules, ses propriétés chimiques et physiques dépendent de sa nature minérale, en particulier l'argile principalement, car ses minéraux sont des particules inférieures à 2 $\mu$ m.

Ces minéraux présentent un ensemble différent de composition et d'organisation, car leur rapport et leur nature sont à la base de la différence de comportement des sols argileux, car ils varient en taille et affectent la stabilité du sol en fonction de sa teneur en eau et de la présence des composés minéraux solubles. D'autre part, ils interagissent avec les matériaux utilisés pour la stabilisation et/ou le traitement, ce qui a des conséquences sur les structures de ces minéraux.

Les différents types d'argiles imposent la proposition de solutions (de traitement et/ou de stabilisation) adéquates à chaque type de sol argileux. D'ailleurs, c'est la raison pour laquelle les résultats de chaque chercheur à travers le monde sont en réalité uniques et spécifiques.

# CHAPITRE III

## ETUDE EXPERIMENTALE



### **III.1. Introduction**

L'objectif de ce chapitre est de présenter les matériaux utilisés ainsi que le programme expérimental suivi pour caractériser les argiles avant et après traitement avec les cheveux humains. Nous présentons en premier lieu les matériaux utilisés en fonction des besoins de notre étude, par la suite la manière et le dosage de traitement adopté.

Le sol utilisé est un sol reconstitué composé de 80% de Kaolin KT2 et de 20% de bentonite de charge. Cette option d'utiliser un sol reconstitué nous permet sur le plan expérimental d'avoir un sol de référence gonflant avec les mêmes propriétés géotechniques pour les différentes prises d'essais. Par la suite, le sol argileux reconstitué été traité avec des fibres naturelles qui sont les cheveux humains qui sont en fait des déchets sous forme de fibres naturels.

Il faut noter que nous avons réalisé l'ensemble des essais géotechnique au sein du laboratoire de mécanique des sols du département de Génie Civil et Hydraulique (université de Jijel).

### **III.2. Matériaux utilisées**

#### **III.2.1. Kaolin KT<sub>2</sub>**

Nous avons utilisé comme matière première pour la préparation du sol reconstitué, un kaolin du gisement de Tamazert (figure III.1). Ce gisement est connu depuis 1925 est se trouve à El-Milia (wilaya de Jijel Nord – Est de l'Algérie). [2]

Le kaolin de Tamazert se présentent sous forme de nappe plurimétrique, ce dernier a été caractérisé par la doctorante Idoui Imene (LGG, université de Jijel) dans le cadre de sa thèse de doctorat et dans l'objectif de déterminer ces propriétés pétrographiques ainsi que son contenu minéralogique à fin d'avoir une idée sur sa métallogénie. La granulométrie du kaolin (tableau III.1) des deux corps (central et nord) du gisement est légèrement étalée et ressemble à celle de limons à petite teneur en fraction fine (fractions argileuses). Les minéraux identifiés dans la zone d'étude sont les suivants: quartz, muscovite, feldspath plagioclase sodique (albite), biotite, grenat, kaolinite qui est relativement déchetée et mal cristallisée, halloysite à cigares et à faible concentration (tableaux III.2 et III.3).



Figure III.1. Kaolin de Tamazert

### III.2.1.1. Les caractéristique du kaolin KT<sub>2</sub>

#### a. Analyse granulométrique

Tableau III.1. Les caractéristiques granulométriques du kaolin KT<sub>2</sub>

		Kaolins traités	
Analyse granulométrie	% en poids	> 40 μm	0.03
		< 15μm	98± 1
		< 10μm	88± 3
		< 5μm	65± 3
		< 2μm	43±3

#### b. Analyse chimique (% en poids)

Le Tableau III.2 présente la composition chimique du Kaolin KT<sub>2</sub> que nous avons utilisé dans la présente étude.



**Tableau III.2.** Analyse chimique

		KT2	
<b>Analyse Chimique</b>	<b>% en poids</b>	SiO <sub>2</sub>	49.30
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.0
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.25-2.50
		TiO <sub>2</sub>	0.24
		CaO	0.08
		MgO	0.04
		K <sub>2</sub> O	2.75-3.10
		Na <sub>2</sub> O	0.09

**c. Analyse minéralogique**

**Tableau III.3.** Analyse minéralogique

<b>Composition minéralogique</b>	<b>% en poids</b>	Kaolinite	62-65
		Matières micacées dont argile	16-22
		Quartz	08-11
		Feldspath	3-4

**III.2.2. Bentonite**

La bentonite est une argile caractérisée par sa capacité de rétention d'eau car la montmorillonite est une smectite particulièrement gonflant. Le débouché le plus important de la bentonite se situe dans les techniques du génie civil, particulièrement dans l'étanchéité des édifices, la construction de digues, la pose de canalisations, les puits de forages et la construction de tunnels, Il existe deux types de bentonites, la bentonite à base de sodium, qui augmente de volume lorsqu'elle est humide et qui peut absorber plusieurs fois sa masse en eau (elle est utilisée dans les puits de forage de pétrole et dans la recherche géothermique). La bentonite à base de calcium qui ne possède pas ces propriétés de gonflement, généralement utilisée pour des applications parapharmaceutiques.

Nous avons travaillé avec la « bentonite de charge industrielle » du gisement de M'Zila (Wilaya de Mostaganem). En nous basant sur les caractéristiques déterminées par le laboratoire des analyses de la bentonite de l'unité ENOF de Mostaganem.

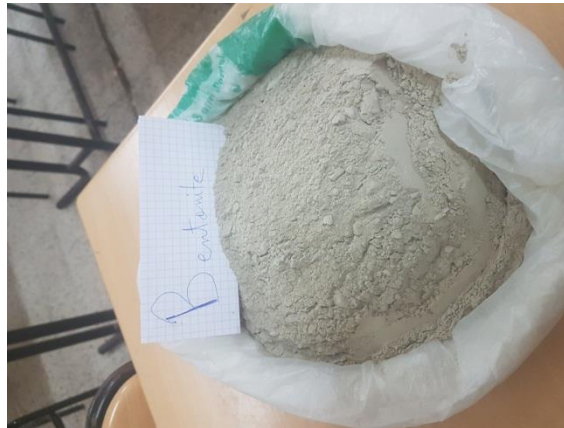


Figure III.2. Bentonite de M'Zila (Wilaya de Mostaganem)

### III.2.2.1. Les caractéristique de la bentonite

Les caractéristiques de la bentonite utilisée dans cette étude sont en partie celles fournit par le fabricant en plus de celles réalisées par la doctorante Idoui Imène (LGG, université de Jijel) réalisées dans le cadre de sa thèse de doctorat. Elles sont présentées dans les tableaux III.4 a III.8 :

Tableau III.4. Caractéristique pétrographiques-minéralogiques

<b>Couleur</b>	Grise
<b>Aspect</b>	Homogène
<b>Texture</b>	Massive
<b>Nature pétrographique</b>	Calcaire Microcristallin

Tableau III.5. Composition chimique de la bentonite, Résultats de fluorescence X. (Idoui et al. 2021)

Type de sol	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	TiO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Bentonite	65.8	6.36	14.5	3.5	2.65	2.87	3.04	0.34	0.47	/

Tableau III.6. Caractéristique physicomécanique de la bentonite (Idoui et al. 2021)

Caractéristiques		Bentonite	Normes
<b>Limite d'atterberg</b>	limite de liquidité	175 %	NFP 94-51
	limite de plasticité	30 %	
	indice de plasticité	145 %	
<b>Granulométrie %</b>	Argile	26.31	NF P 94-056
	limon fin	39,14	
	limon grossier	7,54	
	sable fin	6,78	
	sable grossier	20,23	

**Tableau III.7.** Résultats d'analyses des caractéristiques hydriques

Caractéristiques	Humidité %	Indice de gonflement (ml)
Bentonite	8	20

**Tableau III.8.** Résultats d'analyse granulométrique et physico-chimique

Caractéristiques	Bentonite
PH	9
Matière organique %	1,37
Calcaire total %	1,06
Viscosité	28,62
VBS %	25,21
Surface spécifique (m <sup>2</sup> /g)	529,41

### III.2.3. Le sol reconstitué (mélange de kaolin et de bentonite KB)

On a choisis pour notre étude un sol reconstitué à partir d'un mélange de 80% de Kaolin et de 20% de la bentonite (figure III.3) afin d'avoir un sol argileux gonflant. Ce dernier va être traité avec des déchets en fibres naturels qui sont les cheveux humains.



**Figure III.3.** Le sol reconstitué KB (80% de Kaolin et 20% de Bentonite)

### III.2.4. Les cheveux humains

Les cheveux (figure III.4) sont des appendices protéiques qui poussent sur le corps des mammifères et se composent de certaines cellules non vivantes. Il s'étend un peu au-dessus, sur les côtes et l'arrière de la tête. Comme les autres acrochordons, il est composé de kératine. La croissance annuelle moyenne des cheveux humains est 12cm, le diamètre est 0,1 mm. Les cheveux humains sont composés de créatine, des minéraux, d'eau et de mélanine.



**Figure III.4.** Les cheveux humains utilisés

### III.3. Programme expérimental

Afin d'étudier l'efficacité des cheveux humains pour le traitement des sols argileux, nous avons mis en œuvre un programme expérimental basé sur une série d'essais géotechniques en laboratoire (tableau III.9). Nous avons réalisés tous les essais géotechniques de la présente étude au sein du laboratoire de mécanique des sols du département génie civil et hydraulique (université de Jijel- Algérie).

**Tableau III.9.** Programme expérimental réalisé

Traitement du sol reconstitué avec 0,5%, 1% et 1,5% 2% de cheveux en poids du sol		
Essais géotechniques	Propriétés géotechniques	Notion (unité)
Limites d'Atterberg	Limite de plasticité	WP (%)
	Limite de liquidité	WL (%)
	Indice de plasticité	IP (%)
Essai de compactage (Essai Portor)	Teneur en eau optimale	Wopt (%)
	Densité sèche maximale	$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )
Essai de cisaillement direct	Cohésion	$C_{uu}$ (kPA)
	Angle de frottement interne	$\phi_{uu}$ (°)

**Tableau III.10.** Propriétés géotechniques référence de sol (Idoui et al. 2021)

Propriétés	Valeurs
Ph	9,81
Indices de gonflement libre (%)	61,5
Limite de liquidité (%)	73,98
Limite de plasticité (%)	37,36
Indice de plasticité (%)	36,62
Bleu de methylene	6,66
Surface spécifique (m <sup>2</sup> /g)	138
Teneur en eau optimale (%)	21,16
Densité sèche maximale (t/m <sup>2</sup> )	1,501
Cohesion (bars)	0,02
Angle de frottement interne (°)	3

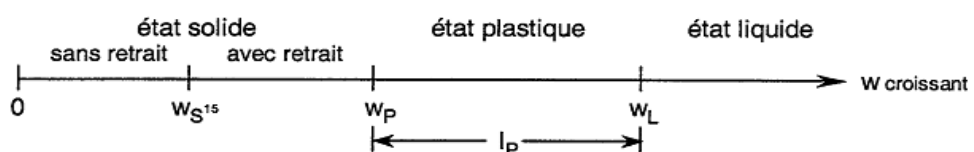
#### III.4. Détermination des limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Selon la norme française NF P 94-051 (figure III.5 et III.6), le comportement d'un sol varie dans des proportions importantes en fonction de sa teneur en eau selon quatre états différents : état liquide, plastique, solide avec retrait et sans retrait.

L'intérêt de mesurer les limites d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité) est de prévoir le comportement des sols fins pendant la phase de terrassement et de connaître aussi la consistance du sol (LCPC, 1987).



**Figure III.5.** Détermination des limites d'Atterberg (NF P 94-051)



**Figure III.6.** Représentation schématique des limites d'atterberg

### III.4.1. Les résultats des limites d'Atterberg

Les résultats des limites d'Atterberg effectuées sur les échantillons de sol reconstitué de référence ainsi que sur les autres échantillons de sol traité avec des 0,5% ; 1% ; 1,5% et 2% de fibres de cheveux humains sont présentés dans les tableaux et figures ci-dessous.

**Tableau III.11.** Résultats des limites d'Atterberg du sol reconstitué de référence

<b>Sol de référence (20% Bentonite + 80% Kaolin)</b>	
limite de liquidité (%)	WL = 73,98
limite de plasticité (%)	WP = 37,36
Indice de plasticité	IP = 36,62

**Tableau III.12.** Résultats des limites d'Atterberg du sol traité avec **0,5%** de cheveux humains

limite de liquidité (%)	WL = 75,81
limite de plasticité (%)	WP = 40,54
Indice de plasticité	IP = 35,27

**Tableau III.13.** Résultats des limites d'Atterberg du sol traité avec **1%** de cheveux humains

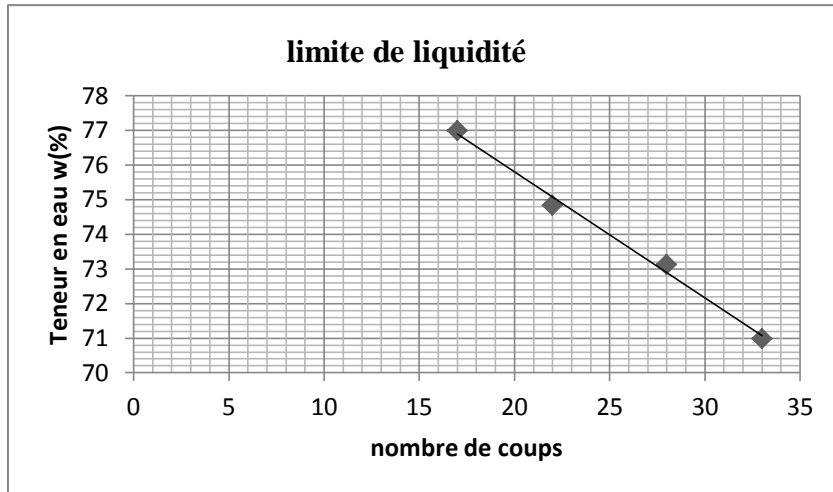
limite de liquidité (%)	WL = 71,40
limite de plasticité (%)	WP = 38,85
Indice de plasticité	IP = 32,55

**Tableau III.14.** Résultats des limites d'Atterberg du sol traité avec **1,5%** de cheveux humains

limite de liquidité (%)	WL = 75,81
limite de plasticité (%)	WP = 44,15
Indice de plasticité	IP = 31,66

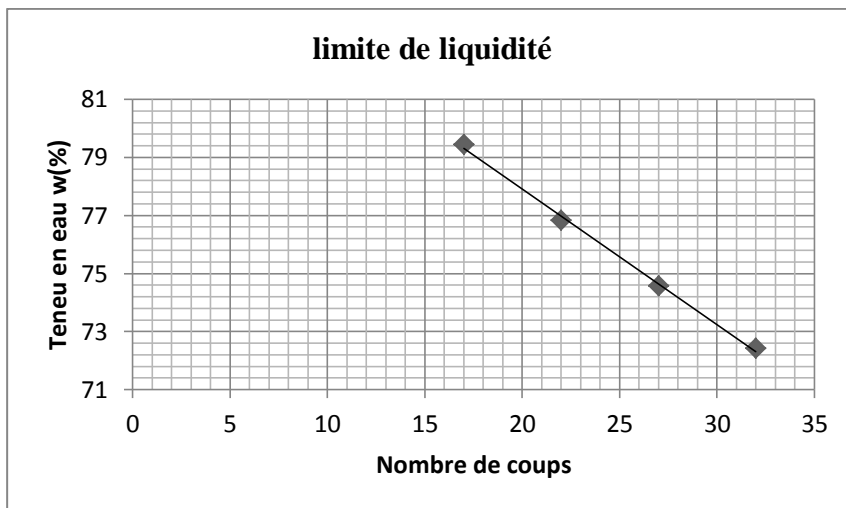
**Tableau III.15.** Résultats des limites d'Atterberg du sol traité avec **2%** de cheveux humains

limite de liquidité (%)	WL = 73,07
limite de plasticité (%)	WP = 44,24
Indice de plasticité	IP = 28,83



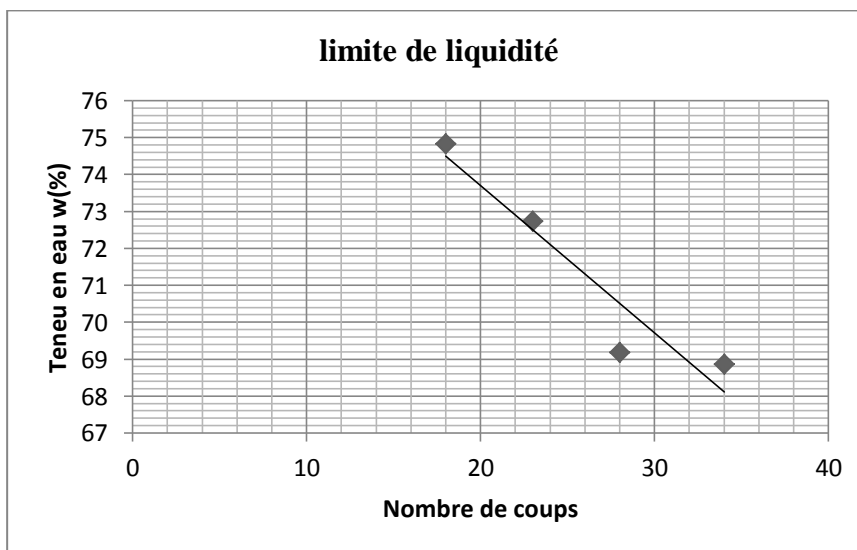
Ech N: 0	W(%)
1	37,17
2	37,37
3	37,40
4	37,50

Figure III.7. Limites d'Atterberg du sol reconstitué de référence



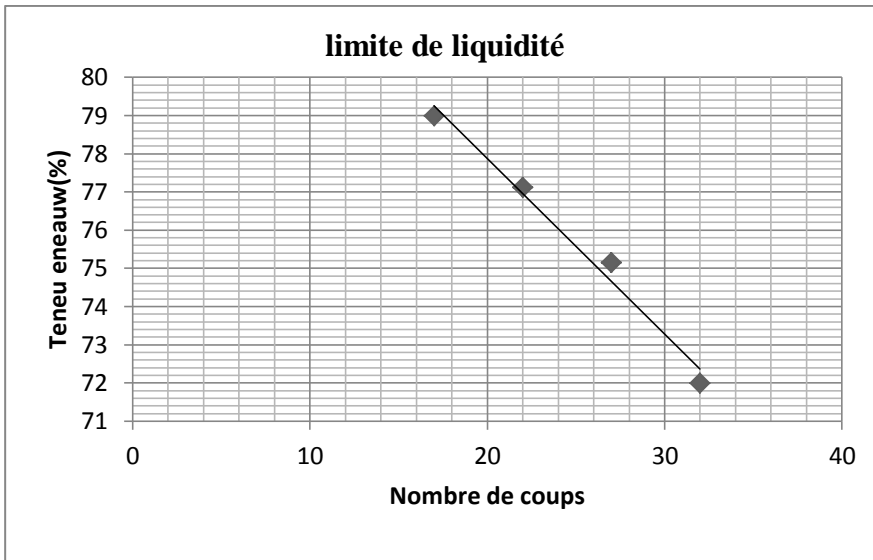
Ech N : 1	W(%)
1	40,35
2	40,00
3	40,95
4	40,85

Figure III.8. Limites d'Atterberg du sol traité avec 0.5% de cheveux humains



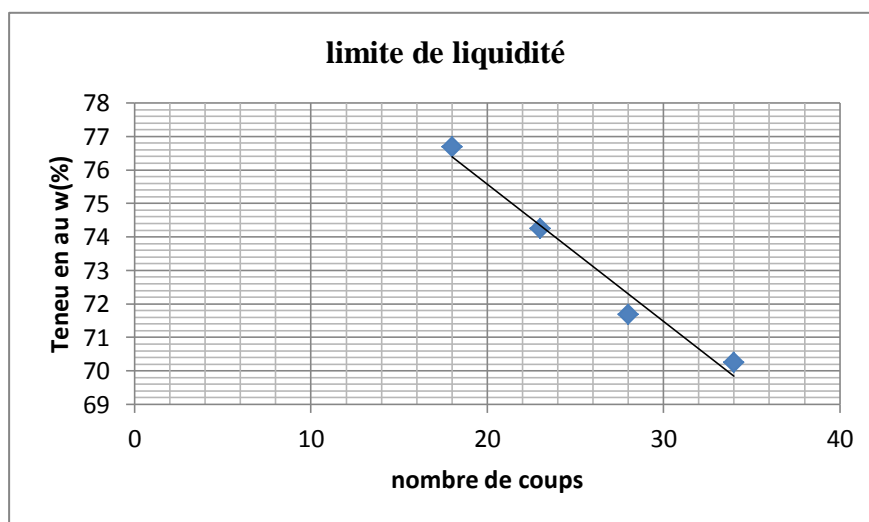
Ech N : 2	W(%)
1	40,00
2	39,78
3	38,61
4	36,99

Figure III.9. Limites d'Atterberg du sol traité avec 1% de cheveux humains



Ech N : 3	W(%)
1	44,93
2	42,86
3	44,93
4	43,88

Figure III.10. Limites d'Atterberg du sol traité avec 1,5% de cheveux humains



Ech N : 4	W(%)
1	44,23
2	44,07
3	44,33
4	44,33

Figure III.11. Limites d'Atterberg du sol traité avec 2% de cheveux humains

### III.5. Détermination des caractéristiques de compactage (NF P94-093)

L'essai Proctor normal (figures III. 12 et III.13) est un essai géotechnique qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol par compactage à une énergie fixée (poids de dame, nombre de coups et dimensions normés). Mis au point par l'ingénieur Ralph R. Proctor (1933).





**Figures III.12.** Déterminations des caractéristiques de compactage



**Figure III.13.** Le matériel utilisé pour réaliser l'essai Proctor normal

### III.5.1. Les résultats des essais de compactage

Les résultats des essais Proctor normal effectués sur les échantillons de références ainsi que sur les autres échantillons de sol traités avec 0,5% ; 1% ; 1,5% et 2% de cheveux humains sont présentés dans les tableaux et figures ci-dessous :

**Tableau III.16.** Résultats de l'essai Proctor normal sur le sol reconstitué de référence

<b>Sol de référence (20% Bentonite + 80% Kaolin)</b>					
<b>Teneur en eau optimale W (%)</b>	<b>17,37</b>	<b>18,5</b>	<b>21,16</b>	<b>22,8</b>	<b>24</b>
<b>Densité sèche max <math>\gamma_{d\max}</math> (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1,485</b>	<b>1,492</b>	<b>1,501</b>	<b>1,491</b>	<b>1,483</b>

**Tableau III.17.** Résultats de l'essai Proctor normal sur le sol traité avec **0,5%** de cheveux humains

<b>Teneur en eau optimale W (%)</b>	<b>16,21</b>	<b>18,75</b>	<b>20,00</b>	<b>22,03</b>	<b>24,54</b>
<b>Densité sèche max <math>\gamma_{d\max}</math> (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1,475</b>	<b>1,483</b>	<b>1,487</b>	<b>1,481</b>	<b>1,472</b>

**Tableau III.18.** Résultats de l'essai Proctor normal sur le sol traité avec **1%** de cheveux humains

<b>Teneur en eau optimale W (%)</b>	<b>18,21</b>	<b>20,88</b>	<b>21,72</b>	<b>24,26</b>	<b>26,10</b>
<b>Densité sèche max <math>\gamma_{d\max}</math> (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1,469</b>	<b>1,481</b>	<b>1,483</b>	<b>1,477</b>	<b>1,469</b>

**Tableau III.19.** Résultats de l'essai Proctor normal sur le sol traité avec **1,5%** de cheveux humains

<b>Teneur en eau optimale W (%)</b>	<b>18,75</b>	<b>20,57</b>	<b>22,50</b>	<b>23,33</b>	<b>26,17</b>
<b>Densité sèche max <math>\gamma_{d\max}</math> (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1,468</b>	<b>1,476</b>	<b>1,480</b>	<b>1,482</b>	<b>1,470</b>

**Tableau III.20.** Résultats de l'essai Proctor normal sur le sol traité avec **2%** de cheveux humains

<b>Teneur en eau optimale W (%)</b>	<b>19,30</b>	<b>21,95</b>	<b>24,53</b>	<b>26,01</b>	<b>27,72</b>
<b>Densité sèche max <math>\gamma_{d\max}</math> (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1,468</b>	<b>1,479</b>	<b>1,477</b>	<b>1,475</b>	<b>1,471</b>

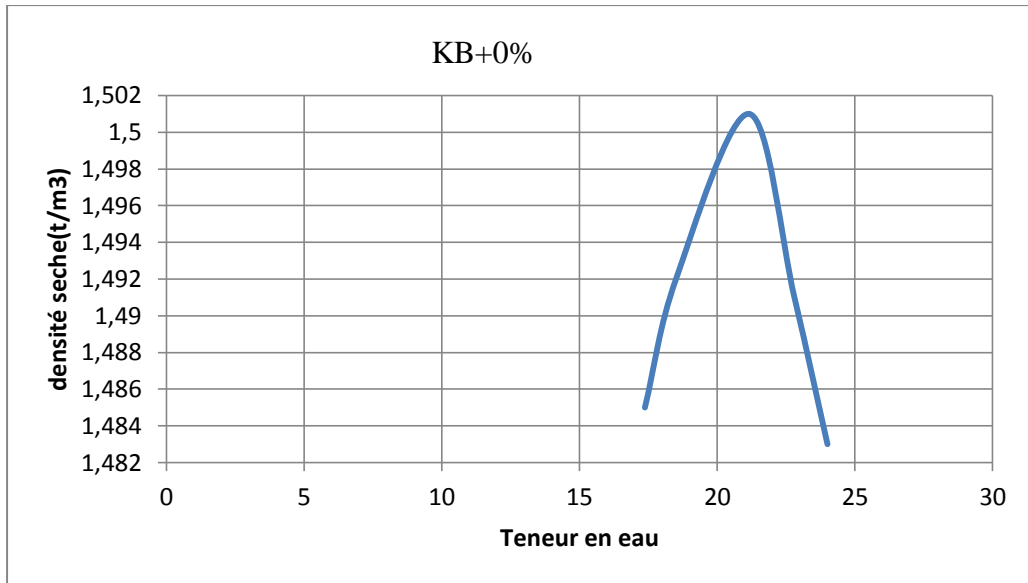


Figure III.14. Courbe Proctor du sol reconstitué de référence

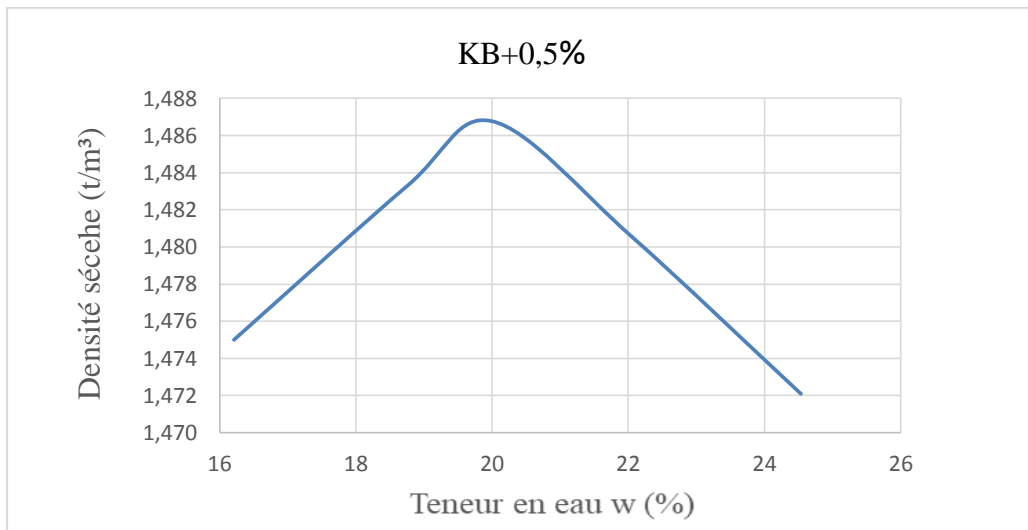


Figure III.15. Courbe Proctor du sol traité avec 0,5 % de cheveux humains

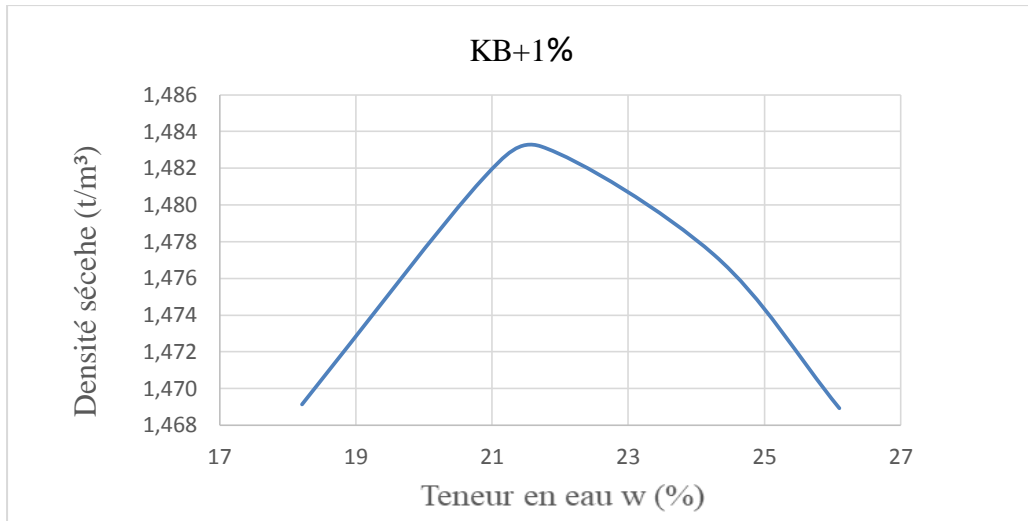


Figure III.16. Courbe Proctor du sol traité avec 1% de cheveux humains

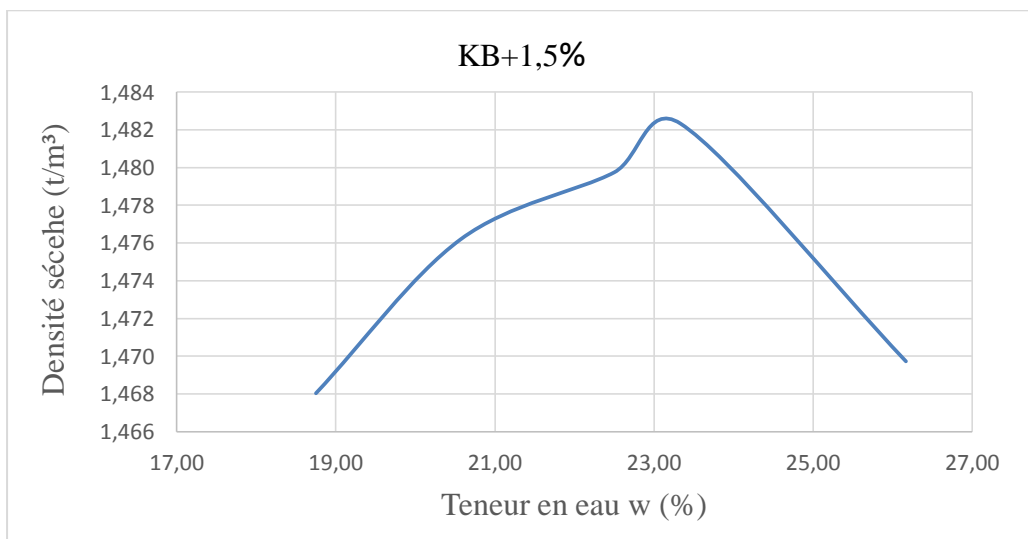
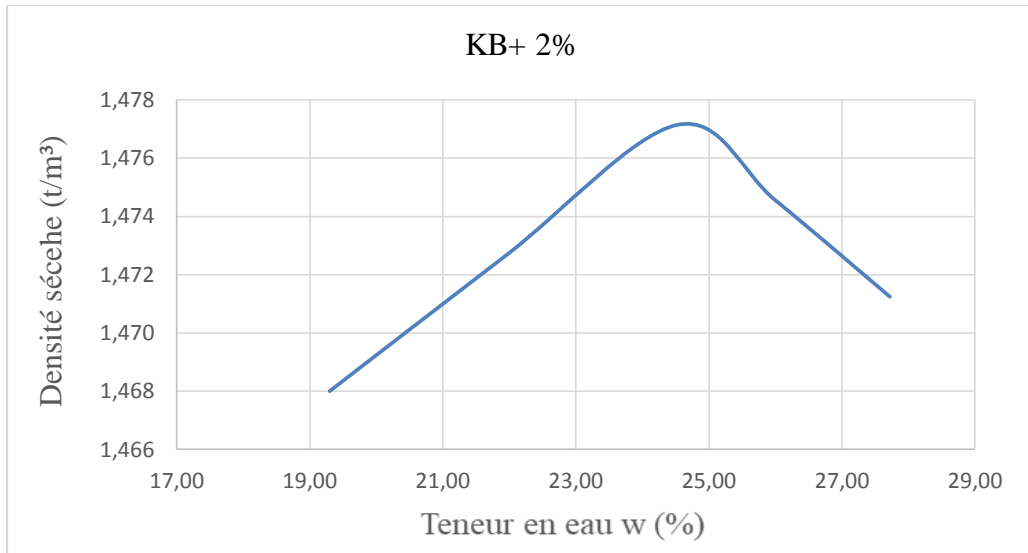


Figure III.17. Courbe Proctor du sol traité avec 1,5% de cheveux humains



**Figure III.18.** Courbe Proctor du sol traité avec 2% de cheveux humains

### III.6. Détermination les caractéristiques de cisaillement du sol (NF P94-071-1)

L'essai a pour objet de mesurer les caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol fin saturé soumis à un cisaillement direct selon un plan imposé, à une vitesse constante (figures III.19 ; III.20 et III.21).



**Figure III.19.** Détermination les caractéristiques de Cisaillement



**Figure III.20.** Les constituants de boîte de cisaillement



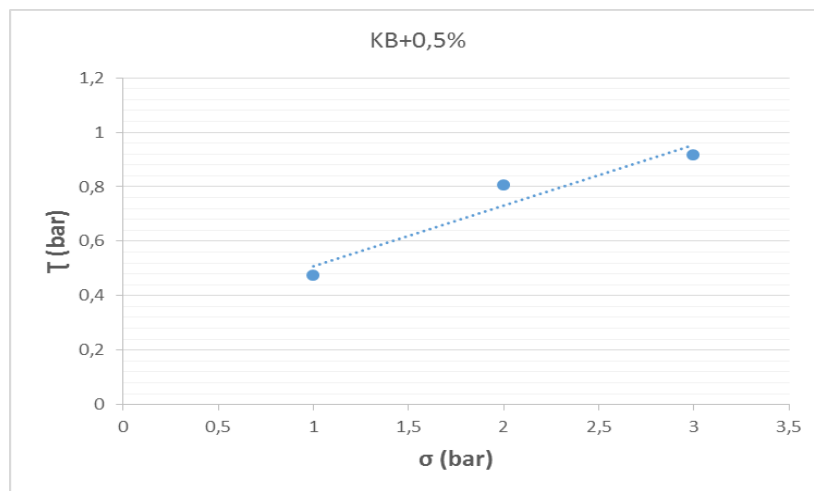
**Figure III.21.** La machine de cisaillement

### III.6.1. Les résultats des essais de cisaillement direct

Dans notre étude chaque essai de cisaillement direct été réalisés avec un minimum de trois (3) éprouvettes en augmentant à chaque fois la contrainte normale appliquée. Les résultats des essais de cisaillements effectués sur les échantillons de sol de référence ainsi que sur les autres échantillons de sol traités avec 0,5% ; 1% ; 1,5% ; et 2% de cheveux humains sont présentés dans le tableau III.21 et les figures III.22 au III.25.

**Tableau III.21.** Les résultats des essais de cisaillement direct

sol reconstitué de référence	l'angle de frottement $\varphi^\circ$	4,5
	la cohésion $C$ (kPa)	0,02
sol traité avec 0,5% de cheveux humains	l'angle de frottement $\varphi^\circ$	12,4
	la cohésion $C$ (kPa)	0,287
sol traité avec 1% de cheveux	l'angle de frottement $\varphi^\circ$	13,27
	la cohésion $C$ (kPa)	0,537
sol traité avec 1,5% de cheveux	l'angle de frottement $\varphi^\circ$	15,48
	la cohésion $C$ (kPa)	0,601
sol traité avec 2% de cheveux	l'angle de frottement $\varphi^\circ$	16,17
	la cohésion $C$ (kPa)	0,675



**Figure III.22.** Essai de cisaillement direct sur le sol traité avec 0,5% de cheveux

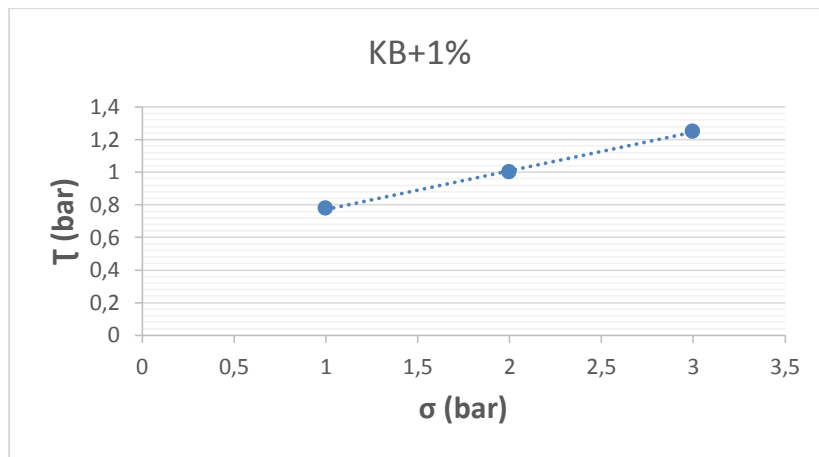


Figure III.23. Essai de cisaillement direct sur le sol traité avec 1% de cheveux

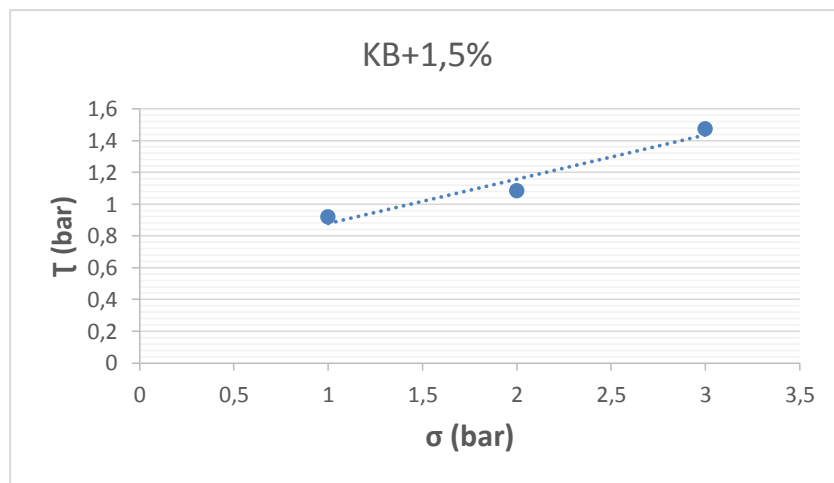


Figure III.24. Essai de cisaillement direct sur le sol traité avec 1.5% de cheveux

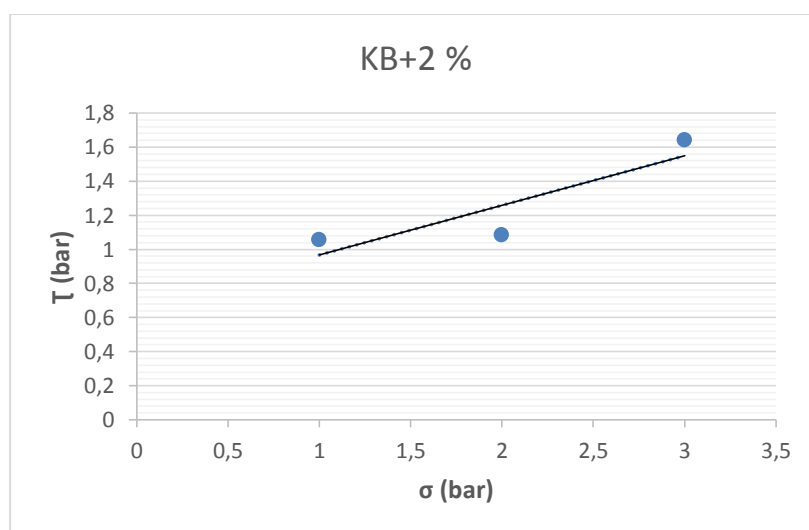


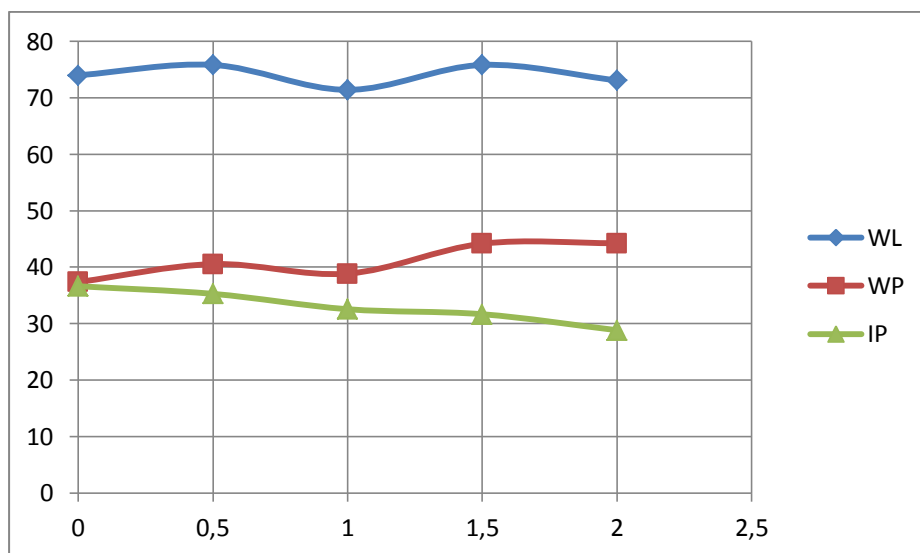
Figure III.25. Essai de cisaillement direct sur le sol traité avec 2% de cheveux

### III.7. Analyse et discussion des résultats obtenus

#### III.7.1. Effet de cheveux humains sur les limites d'Atterberg

(Figure III.26) montre l'effet des cheveux sur les limites d'Atterberg du sol traité. Le remplacement des cheveux dans le sol argileux entraîne une légère modification des valeurs des limites d'Atterberg. Les résultats obtenus indiquent que lorsque le pourcentage des cheveux humains augmente, la limite de liquide (WL) du sol traité diminue, tandis que la limite de plastique (WP) augmente pour un ajout de 0,5 et 1 et 1.5% puis elle diminue à nouveau pour 2% d'ajout. Cependant, l'indice de plasticité (IP) du sol traité diminue avec l'augmentation du pourcentage de cheveux.

D'autre part, sur l'abaque de Casagrande le point caractéristique se déplace de la gauche (argile très plastique) vers la droite (limon très plastique) de la ligne A en fonction de l'augmentation du pourcentage de l'ajout. C'est l'effet de la substitution d'une partie des fines particules par des particules plus légères qui sont les cheveux humains.



**Figure III.26.** Effet de l'ajout des cheveux sur les limites d'Atterberg

Nous avons constaté que l'indice de plasticité IP est passé de 36,62 (pour le sol de référence) à 28,83 pour le même sol traité avec 2% de cheveux humains. Ce qui représente une diminution de 21,27%. Cela veut dire que l'indice de plasticité diminue d'une manière proportionnelle avec l'augmentation de la quantité des cheveux humains et que le sol traité devient moins plastique.



### III.7.2. Effet de cheveux humains sur les caractéristiques du compactage

Les résultats obtenus (figures III.27 et III.28) montrent que l'augmentation de l'ajout en fibres de cheveux humains entraîne une réduction de la densité sèche maximale du sol traité. Nous avons enregistré une réduction de l'ordre de 1,46% (pour l'échantillon traité avec 2% d'ajout). Cela est dû au fait que les cheveux humains sont plus légers que les grains du sol de référence ( $\gamma_s = 3,26$  t/m<sup>3</sup>). C.à.d. pour un même volume de substitution, le poids volumique très faible des cheveux humains a réduit la masse du sol traité par rapport à celle du sol de référence, ce qui a donné des valeurs de densité sèche plus faibles.

D'autre part, les figures et tableaux précédents indiquent que les valeurs de la teneur en eau optimale sont relativement les mêmes dans tous les échantillons. L'ajout des cheveux humains n'a pas modifié l'état d'humidité du sol traité, cela est probablement dû aux quantités insignifiantes de l'ajout par rapport à la masse du sol traité.

Par contre ce qui est intéressant, c'est que le sol traité est devenu moins sensible à l'eau durant le compactage car les courbes obtenues sont de plus en plus aplaties à l'optimum Proctor. Cette propriété est très importante pour le déroulement des travaux d'arrosage (teneur en eau) sur chantier car la maîtrise de la quantité d'eau n'est pas aussi facile sur le chantier qu'en laboratoire.

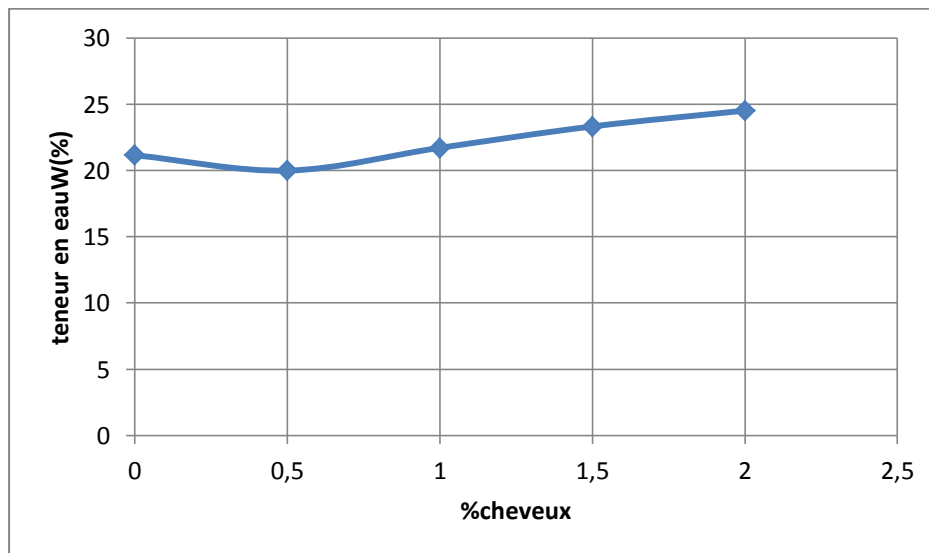
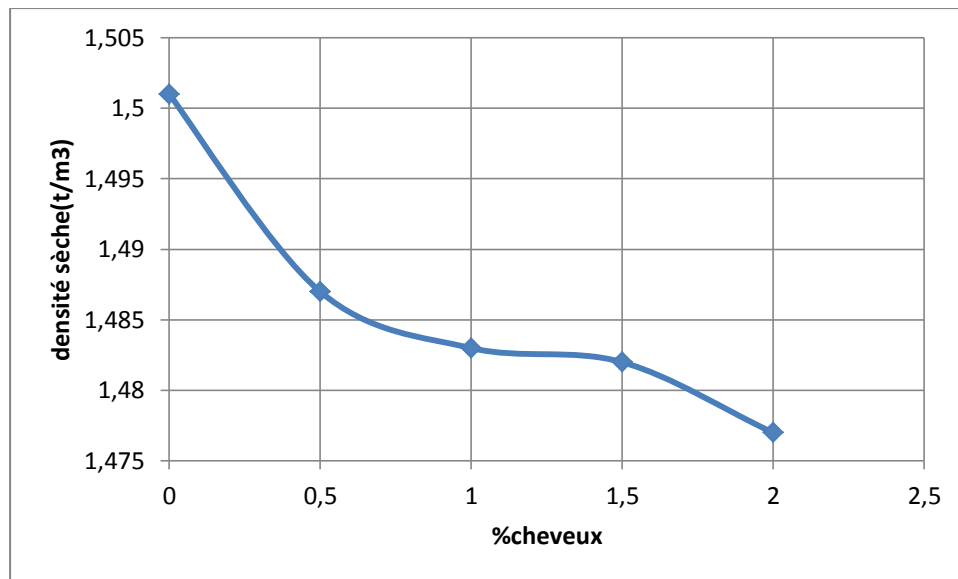


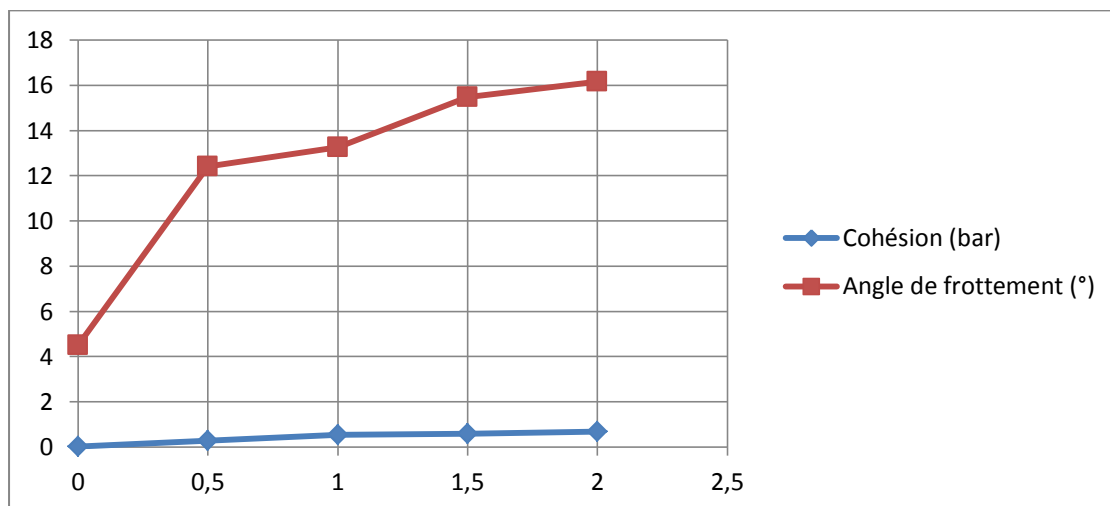
Figure III.27. Effet de l'ajout des cheveux humains sur la teneur en eau optimale



**Figure III.28.** Effet de l'ajout des cheveux humains sur la densité sèche maximale

### III.7.3. Effet des cheveux humains sur la résistance au cisaillement

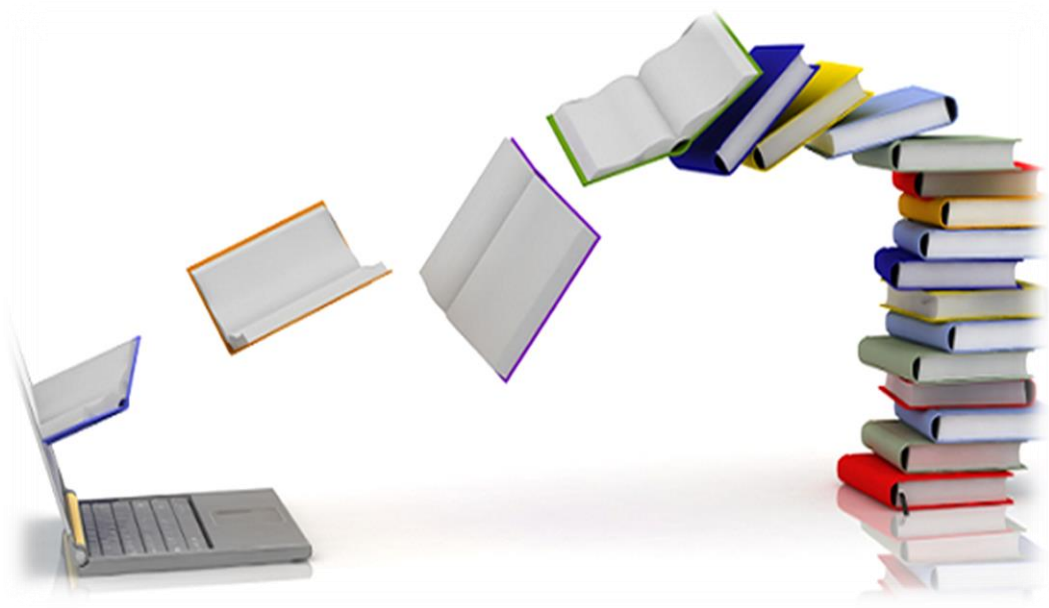
Sur la base des résultats des essais de cisaillement direct sur les échantillons de sol traité avec 0,5% ; 1% ; 1,5% et 2% de cheveux humains, l'augmentation de la cohésion s'est avérée respectivement de 0,02 bar à 0,675 bar ce qui très important. Cette augmentation est due à la disposition aléatoire des cheveux humains ce qui constitue un réseau de mailles qui contient les grains du sol est les rend plus cohésifs.



**Figure III.29.** Effet de l'ajout des cheveux humains sur les caractéristiques de cisaillement

D'autre part, nous constatons des augmentations intéressantes de l'angle de frottement interne  $\varphi$  du sol traité de l'ordre de 175%, 194%, 244 % et 259% respectivement (figure III.29 et le tableau III.21). Cette importante amélioration est due à la nature fibreuse de l'ajout et à sa résistance à la traction qui lui confère au sol. C'est le même principe de base de la terre armée car les efforts de traction développés dans la masse du sol sont repris par les fibres (cheveux humains) qui jouent le rôle d'un renfort.

## **CONCLUSION GENERALE**



## **Conclusion générale**

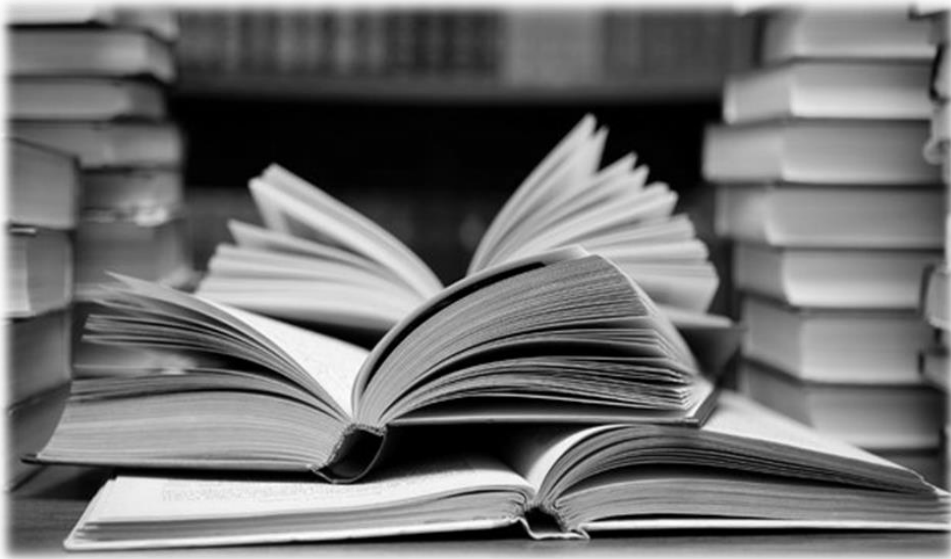
Renforcer un sol par une inclusion résistante à la traction afin de lui conférer de meilleures caractéristiques, a toujours été le rêve de bien des ingénieurs. L'idée est séduisante et déjà fort ancienne (briques fabriquées par nos ancêtres à partir d'un mélange d'argile et de paille).

La problématique de ce travail repose sur l'idée de valoriser des déchets locaux à travers leurs réutilisations dans le domaine de la stabilisation/et ou traitement des sols argileux ce qui peut assurer un développement durable dans les régions pauvres du pays avec des coûts raisonnables.

Dans cette étude, nous avons donné dans un premier temps un aperçu détaillé sur l'état de connaissance des sols. A cet effet, des échantillons de sol, essentiellement des sols argileux. Ces derniers étaient reconstitués à partir d'un mélange de Kaolinite et de Bentonite traité avec des cheveux humains. En second temps on a fait une étude expérimentale basée sur quelques essais géotechniques tels que l'essai Proctor, l'essai de cisaillement direct et les limites d'Atterberg.

On conclusion générale les cheveux humains, un déchet abandonné, peuvent être considérés comme une alternative aux matériaux de traitement traditionnels qui sont parfois couteux et non écologique. Techniquement les résultats obtenus confirment l'efficacité de l'ajout choisi (l'indice de plasticité IP est passé de 36,62 pour le sol de référence à 28,83 pour le même sol traité avec 2% de cheveux humains ; le sol traité est devenu moins sensible à l'eau durant le compactage car les courbes obtenues sont de plus en plus aplaties à l'optimum Proctor ; une augmentation de la cohésion de 0,02 bar à 0,675 bar et l'amélioration spectaculaire de l'angle interne de frottement du sol traité qui été de l'ordre de 175% jusqu'à 259%. Sur le plan économique les cheveux humains sont des déchets indésirables qui ne coute rien alors que sur le plan écologiquement leurs réutilisation dans le domaine de traitement des sols argileux est très intéressante car elle va contribuer à épargner la nature de ce déchet difficilement dégradable.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE**



- Abou-Bekr. N, Aissa Mamoune. S.M. (2004) Stabilization of swelling soils using salts. Conférence internationale de géotechnique. Beyrouth, Lebanon.
- Aggarwal, P., Sharma, B. (2010) Application of jute fiber in the improvement of subgrade characteristics. In Proc of int conf on adva in civ eng, Trabzon, Turkey (pp. 27-30).
- Aggoun A. (2018) Analyse du comportement draine et non draine du site de ouled fadel région de Batna par l'essai triaxial et à la boîte de casagrande, Université Larbi Ben M'hidi Oum-Elbouaghi.
- Allam, O. (2011) Etude au laboratoire de l'influence des sels sur la pression de gonflement des marne. Mémoire de magister université Aboubeker Belkaid- Tlemcen, Algérie.
- Azzouz, F.Z, (2006) Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen. Mémoire de magister université Aboubeker Belkaid- Tlemcen, Algérie.
- Babouri, R. (2008) Stabilisation des sols argileux par la chaux cas des kaolinites de Guelma. Mémoire de magister université de M'Sila, Algérie.
- Belabbaci, Z. (2014) Stabilisation des sols gonflants. Thèse de doctorat Université Aboubeker Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- Bell. F. G, (1988) Stabilization and treatment of clay soils with lime, Part 1. basic principles. Ground Engineering, Vol 21 N1, pp.10-15.
- Benmessaoud, A. (2017) Types de solutions de construction sur sols gonflants, Université Kasdi Merbah- Ouargla.
- Berdi, I., Messast, S., Benzaid, R., Idoui, I. (2019) Soil stabilization using local waste. In Conference of the arabian journal of geosciences. Springer, Cham, 2019. pp. 49-51.
- Bouafia, A. (2013) Aide-mémoire de mécanique des sols. Office des publications universitaire, Algérie, 416 p.
- Budhu, M. (2007) Soil mechanics and foundations. 2<sup>ème</sup> édition, John Wiley & sons, Inc., 634p.
- Choudhary, A. K., Jha, J. N., Gill, K. S. (2010) A study on CBR behavior of waste plastic strip reinforced soil. Emirates journal for engineering research, 15(1), 51-57.
- Elias, T., George, S., Zachariah, A., Sulfi, S. (2016) Comparative study of soil stabilization using human hair and lime. International journal of scientific & engineering research, 7(2).
- Ghazavi, M., Roustaie, M. (2010) The influence of freeze–thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay. Cold regions science and technology, 61(2-3), 125-131.
- Gopal, R., Rao, A.S.R. (2005) Basic and applied soil mechanics. 2<sup>ème</sup> édition révisée, New age international publishers, New Delhi, 757 p.

- Gosavi, M., Patil, K. A., Mittal, S., Saran, S. (2004) Improvement of properties of black cotton soil subgrade through synthetic reinforcement. Journal of the Institution of Engineers (India). Civil Engineering Division.
- Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., Zadhoush, A. (2012) A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. Construction and building materials. Vol. 30, pp. 100-116.
- Holtz, R et Kovacs, W. (1991) Introduction à la géotechnique. Traduit en français par Lafleur, J., édition de l'École Polytechnique de Montréal, 808 p.
- Idoui, I., Bekkouche, R. B., Riad, B., & Inas, B. (2021). Use of biopolymers in the stabilization of clay soils. Selected scientific papers-journal of civil engineering, 16(2), 37-5. vol. 16, no2, pp. 37-53.
- Iltis .M, (1979) Contribution à l'étude du traitement des argiles gonflantes en cours de forage. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon- France.
- Magnan, J-P. (2000). Cours de mécanique des sols et des roches. Ecole nationale des ponts et chaussées.
- Mahdi, C. (2019) Étude de l'effet des fibres de polypropylène sur les propriétés géotechniques d'une argile stabilisée. Mémoire de Magister, université é de M'sila-Algérie.
- Massinissa, K.S. (2017) Stabilisation des sols gonflants avec la chaux, cas de région de Mila. Mémoire de Master, université Larbi Ben M'hidi, Oum Bouaghi- Algérie.
- McCarthy David, F. (2007) Essentials of soil mechanics and foundations, basic geotechnics". Pearson Prentice Hall, 7<sup>ème</sup> édition, 850 p.
- Meddah, A. Merzoug, K. (2017) Feasibility of using rubber waste fibers as reinforcements for sandy soils. Innovative infrastructure solutions, 2(1), p.5.
- Moussaceb , K. (2014) Analyse et caractérisation physico-chimique des sols d'entreposage de la station de pétrole. Mémoire de Master, université Abderrahmane Mira, Bejaia- Algérie.
- Murray, J. J., Frost, J. D., Wang, Y. (2000) Behavior of a sandy silt reinforced with discontinuous recycled fiber inclusions. Transportation research record, 1714(1), 9-17.
- Nowamooz .H, (2007) Retrait/gonflement des sols argileux compacts et naturels. Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de Lorraine- France.
- Park, S. S., Kim, Y. S., Choi, S. G., Shin, S. E. (2008) Unconfined compressive strength of cemented sand reinforced with short fibers. KSCE Journal of civil and environmental engineering research, 28(4C), 213-220.



- Park, S. S. (2009) Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand. *Geotextiles and geomembranes*, 27(2), 162-166.
- Kim, Y. T., Kim, H. J., Lee, G. H. (2008) Mechanical behavior of lightweight soil reinforced with waste fishing net. *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 26, no 6, pp. 512-518.
- Kumar, A., Walia, B. S., & Mohan, J. (2006). Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay. *Construction and Building materials*, 20(10), 1063-1068.
- Rahai, A., Boussalem, M. (2018) Renforcement des sols par ajout des fibres naturelles. Mémoire de Master, université de Jijel- Algérie.
- Rebiai, D.M. (2020). Valorisation d'un déchet agricole dans la stabilisation des sols. Mémoire de Master, université de Jijel- Algérie.
- Renju, R.P., Ayothiraman R. (2012), An Innovative Technique of Improving the Soil Using Human Hair , Third International Conference on Construction In Developing Countries (ICCIDC–III). Advancing civil, architectural and construction engineering and management. July 4-6, 2012 Bangkok, Thailand.
- Segetin, M., Jayaraman, K., Xu, X. (2007).Harakeke reinforcement of soil–cement building materials: manufacturability and properties. *Building and environment*, 42(8), 3066-3079.
- Singh, R. R., Mittal, E.S. (2014) Improvement of local subgrade soil for road construction by the use of coconut coir fiber. *International journal of research in engineering and technology*. Vol.3, issue 5.
- Wakim, J. (2005) Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses. Thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris- France.
- Yadav, J.S., Tiwari, S. K. (2017) Effect of waste rubber fibres on the geotechnical properties of clay stabilized with cement. *Applied clay science*, 149, 97-110.
- Yetimoglu, T., Inanir, M., Inanir, O. E. (2005).A study on bearing capacity of randomly distributed fiber-reinforced sand fills overlying soft clay. *Geotextiles and geomembranes*, 23(2), 174-183.
- LCPC (1987), limites d'Atterberg, méthode d'essai. LPC n°19.

**Les normes techniques**

La Norme NFP 94-093 Détermination des références de compactage d'un matériau.

La Norme NFP 94-071-1 Essai de Cisaillement.

La Norme NFP 94-051 Détermination des limites d'Atterberg.

**Sites de web**

[1] [https://fr.abcdef.wiki/wiki/Soil\\_stabilization](https://fr.abcdef.wiki/wiki/Soil_stabilization)

[2] <http://soalka.com/filiales/el-milia/>

