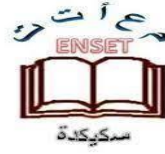


République algérienne démocratique et populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement  
Technologique-Skikda



Département de Technologie

Filière : Génie Civil

**Mémoire Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Professeur  
d'Enseignement Secondaire Technique**

**Thème :**

**Contribution à la valorisation des déchets  
industriels à base d'EPV dans l'amélioration et  
la stabilisation des sols argileux**

Présenté par :

- Rekrak Meriem
- Benhalima Kheira Soumia
- Belkhier Sihem

Encadrant(e) : DOB Hanane

**Jury de Soutenance :**

Nom et prénom	Grade	Université	Rôle
MIROUZI Ghania	M.C.A	ENSET-Skikda	Président
DOB Hanane	M.C.B	ENSET-Skikda	Encadrant
BISKRI Yasmina	M.C.A	ENSET-Skikda	Examinateur

**Année Universitaire : 2023/2024**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# 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 et surtout la santé tout au long de nos années d'études.

Nous tenons à remercier très chaleureusement Madame Dob Hanane, pour l'encadrement de qualité dont elle a su faire preuve, pour sa patience, pour sa disponibilité à tout moment, et pour ses qualités humaines. Nous la remercions pour la confiance et le courage qu'elle nous a donné dès le début de ce travail.

À tous les membres de jury Dr.Mirouzi Ghania et Dr. Beskri Yasmina qui ont accepté d'évaluer cette mémoire.

Nous exprimons nos vifs remerciements à tous les enseignants du département de Génie civil, surtout le chef de département Mr Salih Rahmouni, pour leurs aides, leurs encouragements et leurs conseils tout au long de notre cursus universitaire, qu'ils puissent trouver ici l'expression de notre profond respect et pour développement de notre formation scientifique.

Nous n'oublierons jamais toute l'équipe de laboratoire LTPE de Skikda et Annaba d'avoir accepté notre accueil en stage et pour leurs aides dans la réalisation des essais. Nos familles et tous nos amis qui nous ont encouragé et aidé durant nos études.

Nous remercions toute personne qui nous directement ou indirectement soutenus pour finaliser cette mémoire.

## إهداء

بعد مسيرة دراسية حملت في طياتها التعب و الفرح, ها أنا اليوم أقف على عتبة تخرجي فالحمد لله على فرصة البدايات و بلوغ النهايات.

أهدي ثمرة تخرجي هذا إلى من كلله الله بالهبة والوقار و علمني أن النجاح لا يأتي إلا بالصبر و الإصرار, إلى النور الذي أنار دربي و السراج الذي لا ينطفئ نوره بقلبي أبدا, من بذل الغالي و النفيس و استمدت منه قوتي و اعتزازي بذاتي.

### "أبي الحبيب"

إلى التي ورثت في جوفها كيف أكون إنسانا قبل صرختي الأولى, إلى من جعلت الجنة تحت أقدامها و سهلت لي الشدائد بدعائها, إلى الإنسانية العظيمة معنى الحب و الامتنان, التي لطالما تمننت أن تقر عينها لرؤيتي في يوم كهذا.

### "أمي الحبيبة"

إلى ضلعي الثابت أمان أيامي, إلى من كانوا لي ينباع ارتوي منها, إلى قرة عيني إلى أخواتي

**إيمان, أسماء, حياة, خولة, بشرى, غزالة, سميرة, يسرى**

إلى من شددت عضدي بهم فكانوا لي السند و الظهر إخوتي

### عبد الله, محمد, عبد الناصر

إلى من يعلو صوتهم في البيت فيزيده بهجة و سرورا صغار العائلة

**غيث الرحمان, إبراهيم الخليل, هارون, صلاح الدين**

إلى من كانت لنا عوننا و معينا الأستاذة المؤطرة

### دوب حنان

إلى خيرة أيامي و صفوتها إلى من تحلين بالإخاء و الوفاء رفيقات الخطوات الأولى من كن في السنوات العجاف سحابة ممطرة رفيقات المواقف و السنين

**سمية, سهام, أشواق, أمينة, بسمة, منال, هديل, بثينة, رهام, يقين, أنفال, خديجة, ندى**

إليكم عائلتي أهديكم هذا النجاح الذي لطالما تمنيته

فمن قال أنا لها نالها, فأنا لها وإن أبت رغما عنها أتيت بها

فالحمد لله شكرا و حبا و امتنانا على البدء و الختام

**مريم**

## إهداء

"بسم خالقي و ميسر أموري و عصمت أمري لك الحمد و الامتنان"

أهدي هذا النجاح لنفسي أولاً ثم إلى كل من سعى معي لإتمام هذه المسيرة، دمتم لي سنداً لا عمر له.  
إلى الذي زين اسمي بأجمل الألقاب، إلى من زرع في روحي مكارم الأخلاق ذلك الرجل العظيم الذي علمني أن الدنيا كفاح و سلاحها العلم و المعرفة.

"والدي حفظه الله"

إلى المرأة التي جعلتني فتاة طموحة و سهلت علي الصعاب، إلى معنى الحب و الحنان و التفاني إلى  
بسمة الحياة داعمي الأول و وجهتي التي أستمد منها القوة.

"أمي حفظها الله"

إلى نور البيت و روح العائلة جدتي رقية و ميمونة حفظهما الله و أطال بعمرهما.  
إلى أمان أيامي و مصدر قوتي، إلى من شددت عضدي بهم و رزقت بهم سنداً تميل الدنيا و لا يميلون  
أخواتي: خليدة، إيمان، بشرى، زينب، مروى.

إلى فرحة البيت و غذاء الروح، صغار البيت: ريهام، أمير، رفيف، ميرال، علي.

ولا أنسى رفقاء الروح الذين شاركوني خطوات هذا الطريق و هونوا تعبهم، إلى من شجعوني على  
المثابرة و إكمال المسيرة إلى رفقاء السنين: مريم، سهام، أشواق، بسمة، أمينة، بثينة، هديل، منال،  
ريهام، ندى، ياقين، أنفال.

إلى عائلتي بن حليمة و بوجناح و من أحبهم جميعاً.

لله الشكر كله أن وفقني لهذه اللحظة، فالحمد لله رب العالمين و الصلاة و السلام على نبيه الكريم

**خريجتكم: سمية**

## *Dédicace*

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

### *A mon cher père Saad*

De tous les pères, tu es le meilleur. Aucune dédicace ne saurait exprimer ma reconnaissance et mon profond amour. Puisse Dieu préserver et vous procurer santé et bonheur. Vous resterez : pour moi ma référence, la lumière qui illumine ma route. Ce travail est le résultat de l'esprit de sacrifice dont vous avez fait preuve, de l'encouragement et le soutien que vous m'avez donné : de manifester, j'espère que vous y trouverez : les fruits de votre semence et le témoignage de ma grande fierté.

### *A mon chère mère Khadîdja*

Source inépuisable de tendresse. De patience et de sacrifices. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie. Quoique je puisse dire et écrire, je ne pourrais exprimer ma grande affection et ma profonde reconnaissance. Puisse Dieu tout préserver, te préserver et t'accorder santé, longue vie de bonheur.

A mes chères sœurs *Rekia, Naima, Samra*, et mes chers frères *Mohammed Amine, Hakim* qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leur offre la chance et le bonheur.

A ceux qui ont un doux sourire et un toucher tendre, mes chers petits membres de la famille  
*Khadija, Othman, Amir, Yaakoub, Wassim, Lydia, Iyad, Ritedj*

Aux filles les plus chères et les plus gentilles que j'ai connues de ma vie, aux sœurs que ma mère n'a pas enfantées, à mes chères amies *Soumia, Meriem, Lamia, Yasmine, Kheira, Narimen, Mays, Hiba, Basma, Achouak, Amina, Manel, Bouthaina, Hadil, Rihem, Yakine, Anfel, Kahadidja et Nada*. Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

A toute la famille *Belkhier* et *Arab* à toutes les personnes qui ont fait une énorme différence dans ma vie merci pour vous.

*Sihem*

# Résumé

A travers la géologie des terrains, des sols peu convenables présentant une plasticité élevée et une faible capacité de portance sont fréquemment rencontrés, il a été donc nécessaire d'améliorer ces sols pour les rendre acceptables pour la construction. Ces limitations pourraient être surmontées par l'amélioration des propriétés géotechniques des sols en employant différentes méthodes. Le remplacement des agents de stabilisation classique comme la chaux et le ciment par des nouveaux produits moins coûteux avec un impact environnemental faible est considéré d'aujourd'hui comme un enjeu important. Le traitement des sols argileux avec des déchets industriels présente de nombreux avantages en géotechnique, offrant une solution aux problèmes caractéristiques de ces sols, tels que leur faible stabilité, leur sensibilité à l'eau et leurs variations de volume, est considérée comme une solution intéressante sur le plan économique et environnemental. En effet, elle permet de réduire les impacts écologiques des déchets industriels (les emballages pharmaceutiques vides) sur l'environnement et la santé de l'être humain d'une part, et de réduire les besoins en matière première.

Dans ce mémoire, nous avons étudié la possibilité d'inclure un type de déchet industriel commun qui est l'emballage pharmaceutique vide pour améliorer les caractéristiques et le rendre comme matériau de construction.

A cet effet, une série d'essai au laboratoire des travaux publics de l'est de SKIKDA et ANNABA a été effectué sur un sol argileux d'OUM ETOUB la ville de SKIKDA traité par les déchets industrielles ( EPV), y compris essais de compactage Proctor, essais CBR ,essai œdométrique et essais de cisaillement rectiligne, afin d'étudier l'influence du traitement utilisé sur les caractéristiques physiques et mécaniques d'un matériau traité par l'évaluation de l'influence d'une variété du pourcentages d'emballages pharmaceutique vide (0.3% ; 0.5% et 1%) avec différent longueur (0.5 ;1cm).

D'après les résultats trouvés, Il a été prouvé que l'addition des EPV est économique, efficace pour l'amélioration des sols argileux, et leur 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.

**Mots clés :** Traitement, les emballages pharmaceutiques vides, argile, les déchets industriels, amélioration.

# ملخص

من خلال جيولوجيا الأرض، كثيرًا ما تصادف تربة غير مناسبة ذات مرونة عالية وقدرة تحمل منخفضة، لذلك كان من الضروري تحسين هذه التربة لجعلها مقبولة للبناء. يمكن التغلب على هذه القيود من خلال تحسين الخصائص الجيوتقنية للتربة باستخدام مجموعة متنوعة من الطرق. ويُنظر الآن إلى استبدال عوامل التثبيت التقليدية مثل الجير والأسمت بمنتجات جديدة أقل تكلفة وذات تأثير بيئي منخفض كمسألة مهمة. وتوفر معالجة التربة الطينية بالمخلفات الصناعية العديد من المزايا في الهندسة الجيوتقنية، حيث توفر حلاً للمشاكل المميزة لهذه التربة، مثل انخفاض ثباتها وحساسيتها للماء وتغير حجمها. كما أنها تعتبر حلاً مثيلاً للاهتمام من وجهة نظر اقتصادية وبيئية. فهو يقلل من التأثير البيئي للنفايات الصناعية (عبوات الأدوية الفارغة) على البيئة وصحة الإنسان، ويقلل من الحاجة إلى المواد الخام.

في هذه الأطروحة، درسنا إمكانية تضمين نوع من النفايات الصناعية الشائعة، وهي عبوات الأدوية الفارغة، من أجل تحسين خصائصها وجعلها مناسبة كمادة بناء.

ولتحقيق هذه الغاية، تم القيام بدراسة تجريبية في مختبرات الأشغال العمومية شرق بسكيكدة وعناية على تربة طينية من أم الطوب في مدينة سكيكدة معالجة بالنفايات الصناعية (EPV)، بما في ذلك اختبار بروكتور، واختبار نسبة تحمل كاليفورنيا، مقياس الخطى واختبارات القص المستقيم، وذلك لدراسة تأثير المعالجة المستخدمة على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمادة المعالجة من خلال تقييم تأثير مجموعة متنوعة من النسب المئوية (0.3%، 0.5% و 1%) من العبوات الصيدلانية الفارغة بأطوال مختلفة (0.5، 01 سم).

وقد ثبت من النتائج التي تم التوصل إليها أن إضافة العبوات الدوائية الفارغة اقتصادية وفعالة لتحسين التربة الطينية، كما أن إعادة استخدامها في مجال معالجة التربة الطينية أمر مثير للاهتمام حيث سيساهم في تجنب طبيعة هذه النفايات التي يصعب تحللها.

**الكلمات المفتاحية:** المعالجة، العبوات الدوائية الفارغة، الطين، النفايات الصناعية، التحسين.

# Abstract

Through the geology of the land, unsuitable soils with high plasticity and low bearing capacity are frequently encountered, so it has been necessary to improve these soils to make them acceptable for construction. These limitations could be overcome by improving the geotechnical properties of soils using a variety of methods. Replacing conventional stabilizers such as lime and cement with new, less costly products with low environmental impact is seen as a major challenge today. The treatment of clay soils with industrial wastes offers many advantages in geotechnical engineering, providing a solution to the characteristic problems of these soils, such as their low stability, sensitivity to water and variations in volume. In addition to these advantages, the use of the waste-rock mixture is considered an interesting solution from both an economic and an environmental point of view. Indeed, it reduces the ecological impact of industrial waste (empty pharmaceutical packaging) on the environment and human health, as well as reducing the need for raw materials.

In this thesis, we studied the possibility of including a type of common industrial waste, empty pharmaceutical packaging, to improve its characteristics and make it suitable as a construction material.

To this end, a series of tests at the LTPE SKIKDA and ANNABA were carried out on a clay soil from OUM ETOUB in the city of SKIKDA treated with industrial waste (EPV), including Proctor compaction tests, CBR tests, oedometer tests and straight shear tests, in order to study the influence of the treatment used on the physical and mechanical characteristics of a treated material by evaluating the influence of a variety of percentages (0.3%; 0.5% and 1%) of empty pharmaceutical packages with different lengths (0.5 ;1cm).

From the results obtained, it was shown that the addition of EPV is economical and effective for the improvement of clay soils, and their reuse in the field of clay soil treatment is very interesting as it will contribute to sparing the nature of this hardly degradable waste.

**Key words:** Treatment, empty pharmaceutical packaging, clay, industrial waste, improvement

## Sommaire

Remerciements.....	
Dédicace.....	
Résumé .....	
Sommaire .....	
Liste des figures .....	
Liste des tableaux .....	
Notations et abréviations .....	
Introduction générale.....	1

## Chapitre I: Généralités sur les argiles

I.1 Introduction .....	3
I.2 Définition.....	3
I.3 Origine et formation de sol.....	3
I.3.1 La désagrégation des roches .....	3
I.3.2 La décomposition d'organismes vivants.....	3
I.4 Divers phases du sol .....	3
I.5 Classification des sols.....	4
I.6 Les sols fins .....	5
I.6.1 Définition .....	5
I.6.2 Différents types des sols fins .....	5
I.6.2.1 Les limons .....	5
I.6.2.2 Les marnes.....	6
I.6.2.3 Les vases .....	6
I.6.2.4 Les tourbes .....	6
I.6.2.5 Les argiles .....	6
I.7 Conclusion.....	16

## Chapitre II: Traitements et déchets industriels

II.1 Introduction .....	17
II.2 Traitement des sols .....	17
II.2.1 Méthodes mécaniques.....	17
II.2.2 Méthodes hydrodynamiques .....	18
II.2.2.1 Pré-chargement ou pré-compression.....	18
II.2.2.2 Accélération de la consolidation par les drains verticaux .....	18
II.2.3 Méthodes thermiques.....	19

---

II.2.3.1 Déshydratation .....	19
II.2.3.2 Congélation .....	19
II.2.4 Méthodes chimiques.....	19
II.3 Définition du déchet.....	20
II.4 Origine de la production des déchets .....	20
II.5 Caractéristiques des déchets.....	21
II.5.1 Densité.....	21
II.5.2 Degré d'humidité .....	21
II.5.3 Pouvoir calorifique.....	21
II.5.4 Rapport des teneurs en carbone et azote .....	21
II.6 Classification des déchets .....	21
II.6.1 Classification selon leur nature.....	21
II.6.2 Classification selon leur typologie .....	21
II.6.2.1 Déchets biodégradables ou décomposables.....	21
II.6.2.2 Déchets inertes .....	21
II.6.2.3 Déchets dangereux.....	22
II.6.2.4 Déchets ultimes .....	22
II.6.2.5 Déchets recyclables.....	22
II.6.3 Classification selon leur origine .....	22
II.6.3.1 Déchets ménagers et assimilés .....	22
II.6.3.2 Déchets agricoles et Agro-alimentaire .....	23
II.6.3.3 Déchets des activités de soins.....	23
II.6.3.4 Déchets industriels.....	23
II.7 Gestion des déchets .....	25
II.7.1 Les étapes de la gestion des déchets industriels.....	25
II.7.1.1 Collecte des déchets .....	25
II.7.1.2 Tri des déchets .....	25
II.7.1.3 Stockage des déchets .....	26
II.7.1.4 Transport des déchets .....	26
II.7.2 Traitement des déchets industriels .....	26
II.7.2.1 Valorisation de matière .....	26
II.7.2.2 Valorisation organique par le compostage ou la méthanisation .....	26
II.7.2.3 Valorisation énergétique .....	27
II.7.2.4 Enfouissement.....	27
II.8 Emballages vides pharmaceutiques (EPV).....	27

---

II.8.1 Types des emballages vides.....	28
II.8.1.1 PVC-ALU.....	28
II.8.1.2 ALU-ALU.....	28
II.8.2 Polychlorure de vinyle (PVC) .....	28
II.8.2.1 Préparation de PVC.....	28
II.8.2.2 Mise en œuvre.....	29
II.8.2.3 Propriétés de pvc.....	30
II.8.3 Feuille d'aluminium pharmaceutique.....	31
II.8.3.1 Alliages d'aluminium utilisés pour fabriquer des feuilles pharmaceutiques .....	31
II.8.3.2 Propriétés de la feuille pharmaceutique.....	32
II.8.3.3 Film pharmaceutique est-il recyclable ? .....	32
II.9 Résultats de traitement d'un sol avec un déchet industriel .....	32
II.9.1 Déchet plastique .....	32
II.9.2 Fibres de verre.....	33
II.9.3 Granulats de caoutchouc.....	34
II.10 Conclusion .....	35

### Chapitre III: Matériaux et procédés expérimentales

III.1 Introduction .....	36
III.2 Matériaux utilisés.....	36
III.2.1 Le déchet industriel utilisé.....	36
III.2.2 Sol étudié .....	37
III.2.2.1 Localisation géographique de la zone étudiée .....	37
III.3 Echantillonnage.....	38
III.3.1 Méthodes d'échantillonnage pour les sols cohérents (fins).....	38
III.4 Préparation de l'échantillon.....	38
III.5 Essais d'identification de sol .....	39
III.5.1 Teneur en eau (NF P 94-050).....	39
III.5.1.1 Objectif d'essai.....	39
III.5.1.2 Principe d'essai .....	39
III.5.1.3 Expression des résultats .....	39
III.5.2 Analyse granulométrique des sols (NF P 94-056).....	40
III.5.2.1 Objectif d'essai.....	40
III.5.2.2 Principe d'essai .....	40
III.5.2.3 Traitement des résultats .....	40

III.5.3 Analyse sédimentométrique (NF P 94-057) .....	40
III.5.3.1 Principe d'essai .....	40
III.5.4 Limites d'Atterberg (NF P 94-051) .....	42
III.5.4.1 Principe d'essai .....	42
III.5.4.2 Expression des résultats .....	42
III.5.5 Essai Proctor (NF P94-093).....	43
III.5.5.1 Principe d'essai .....	43
III.5.5.2 Expression des résultats .....	44
III.5.6 Essai de CBR (California Bearing Ratio test) (NF P94-078).....	45
III.5.6.1 Principe d'essai .....	45
III.5.6.2.Expression des résultats .....	46
III.5.7 Essai Œdométrique (XP P 94-090-1).....	46
III.5.7.1 Principe d'essai .....	46
III.5.7.2 Expression des résultats .....	48
III.5.8 Essai de cisaillement rectiligne à la boîte (NF P 94-071) .....	48
III.5.8.1.Principe d'essai .....	48
III.5.8.2 Expression des résultats .....	49
III.6 Conclusion.....	50

## Chapitre IV: Résultats et interprétations

IV.1 Introduction .....	51
IV.2 Préparation des mélanges.....	51
IV.3 Essai Proctor .....	51
IV.3.1 Influence des pourcentages de l'ajout d'EPV sur les caractéristiques de compactage .....	53
IV.3.2 Influence de longueur de l'ajout d'EPV sur les caractéristiques de compactage .....	54
IV.3.3 Comparaison des résultats.....	55
IV.4 Essai CBR .....	57
IV.4.1 Influence des pourcentages de l'ajout d'EPV sur les caractéristiques de CBR .....	57
IV.4.2 Influence de longueur d'ajout d'EPV sur les caractéristiques de CBR .....	58
IV.4.3 Comparaison des résultats.....	60
IV.5 Essai œdomètre.....	61
IV.5.1 Influence de pourcentage et longueur d'EPV sur les caractéristiques œdométriques .....	61

IV.5.3 Comparaison des résultats .....	64
IV.6 Essais de cisaillement .....	66
IV.6.1 Sol avec ajout de 0.3% d'EPV .....	66
IV.6.2 Sol avec ajout de 0.5% d'EPV .....	68
IV.6.3 Sol avec ajout de 1% d'EPV .....	70
IV.6.4 Comparaison des résultats .....	72
IV.7 Conclusion.....	73
Conclusion générale .....	75
Référence bibliographique.....	

## Liste des figures

### Chapitre I: Généralités sur les argiles

<b>Figure I.1</b> Schéma simplifié des trois phases du sol. ....	4
<b>Figure I.2</b> Les éléments constitutifs d'un sol et l'état de l'eau dans un sol. ....	4
<b>Figure I.3</b> Classification des particules solides d'un sol. ....	5
<b>Figure I.4</b> Couches tétraédriques. ....	9
<b>Figure I.5</b> Couches octaédrique. ....	9
<b>Figure I.6</b> Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile. ....	11
<b>Figure I.7</b> Structure atomique de kaolinite. ....	12
<b>Figure I.8</b> Structure atomique de l'illite. ....	12
<b>Figure I.9</b> Structure atomique de montmorillonite. ....	13
<b>Figure I.10</b> Ouverture des fissures en proximité des matériaux rigides. ....	14
<b>Figure I.11</b> Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation. ....	15
<b>Figure I.12</b> Phénomène de glissement. ....	16

### Chapitre II: Traitements et déchets industriels

<b>Figure II.1</b> Les différentes techniques de compactage: a) Compactage de surface; b) Compactage dynamique; c) Vibro-compactage ....	18
<b>Figure II.2</b> Traitement du sol par congélation en France. ....	19
<b>Figure II.3</b> Les déchets inertes. ....	22
<b>Figure II.4</b> Les déchets banals. ....	24
<b>Figure II.5</b> Les emballages des médicaments pharmaceutiques. ....	27
<b>Figure II.6</b> Réaction de polymérisation du CVM. ....	29
<b>Figure II.7</b> Feuille d'aluminium pharmaceutique. ....	31
<b>Figure II.8</b> Résultat d'essai de CBR en utilisant 0.5% de couches dorsales avec différentes tailles de bandes. ....	33
<b>Figure II.9</b> Résultats d'essai de CBR avec des bandes de 10 et 30 mm avec différentes proportions. ....	33
<b>Figure II.10</b> Densité sèche maximale des sols stabilisés à différents pourcentages de fibres de verre. ....	34
<b>Figure II.11</b> Résultats d'essai de CBR à différents pourcentages de fibres de verre. ....	34

### Chapitre III: Matériaux et procédés expérimentales

<b>Figure III.1</b> Déchet d'emballage pharmaceutique vide EPV. ....	36
<b>Figure III.2</b> Sol conservé dans un sac en plastique. ....	37
<b>Figure III.3</b> Carte géographique de la zone d'étude OUM ETOUB. ....	37
<b>Figure III.4</b> Carotte d'échantillons. ....	38
<b>Figure III.5</b> Tarière motorisé. ....	38
<b>Figure III.6</b> Préparation de l'échantillon. ....	39
<b>Figure III.7</b> Courbe granulométrique ( profondeur 1). ....	41
<b>Figure III.8</b> Courbe granulométrique (profondeur 2). ....	41
<b>Figure III.9</b> Représentation des limites d'Atterberg. ....	42
<b>Figure III.10</b> Abaque de Casagrande (profondeur 1). ....	43
<b>Figure III.11</b> Abaque de Casagrande (profondeur 2). ....	43

<b>Figure III.12</b> Essai Proctor. ....	44
<b>Figure III.13</b> Courbe de Proctor. ....	44
<b>Figure III.14</b> Courbe de compactage. ....	44
<b>Figure III.15</b> Essai de CBR. ....	45
<b>Figure III.16</b> Courbe de CBR. ....	46
<b>Figure III.17</b> Cellule œdométrique ....	47
<b>Figure III.18</b> Appareillage Œdométrique. ....	47
<b>Figure III.19</b> Courbe œdométrique du sol étudié. ....	48
<b>Figure III.20</b> Principe d'essai de cisaillement rectiligne. ....	49
<b>Figure III.21</b> Echantillon de cisaillement. ....	49
<b>Figure III.22</b> Courbe contrainte de cisaillement- déformation de sol naturel. ....	49
<b>Figure III.23</b> Courbe intrinsèque du sol étudié. ....	50

### **Chapitre IV: Résultats et interprétations**

<b>Figure IV.1</b> Préparation des mélanges au laboratoire. ....	51
<b>Figure IV.2</b> Essai Proctor (argile +0.3% d'EPV) pour différentes longueurs: a) EPV de 1 cm; b) EPV de 0.5 cm. ....	52
<b>Figure IV.3</b> Essai Proctor (argile +0.5% d'EPV) pour différentes longueurs: a) EPV de 1 cm; b) EPV de 0.5 cm. ....	52
<b>Figure IV.4</b> Essai Proctor (argile +1% d'EPV) pour différentes longueurs: a) EPV de 1 cm; b) EPV de 0.5 cm. ....	53
<b>Figure IV.5</b> Essai Proctor (argile + % d'EPV) pour cm de longueur ....	53
<b>Figure IV.6</b> Essai Proctor (argile +% d'EPV) pour 1 cm de longueur. ....	54
<b>Figure IV.7</b> Essai Proctor (argile +0.3% d'EPV) pour différentes longueurs. ....	54
<b>Figure IV.8</b> Essai Proctor (argile + 0.5% d'EPV) pour différentes longueurs. ....	55
<b>Figure IV.9</b> Essai Proctor (argile +1% d'EPV) pour différentes longueurs. ....	55
<b>Figure IV.10</b> Effet de la longueur et la teneur en EPV sur la teneur en eau optimale. ....	56
<b>Figure IV.11</b> Effet de la longueur et la teneur en EPV sur la densité sèche. ....	56
<b>Figure IV.12</b> Essai CBR pour 0.5 cm de longueur. ....	57
<b>Figure IV.13</b> Essai CBR pour 1 cm de longueur. ....	58
<b>Figure IV.14</b> Essai CBR (argile +0.3% d'EPV) pour différentes longueurs. ....	58
<b>Figure IV.15</b> Essai CBR (argile + 0.5% d'EPV) pour différentes longueurs. ....	59
<b>Figure IV.16</b> Essai CBR (argile +1% d'EPV) pour différentes longueurs. ....	59
<b>Figure IV.17</b> Histogramme de la variation des pourcentages d'ajout d'EPV en fonction de l'indice de CBR. ....	60
<b>Figure IV.18</b> Histogramme de la variation des pourcentages d'ajout d'EPV en fonction de l'indice de gonflement. ....	60
<b>Figure IV.19</b> Essai œdométrique d'argile traité à 0.3% et 0.5 cm de longueur d'EPV. ....	61
<b>Figure IV.20</b> Essai œdométrique d'argile traité à 0.3% et 1 cm de longueur d'EPV. ....	62
<b>Figure IV.21</b> Essai œdométrique d'argile traité à 0.5% et 0.5 cm de longueur d'EPV. ....	62
<b>Figure IV.22</b> Essai œdométrique d'argile traité à 0.5% et 1 cm d'EPV. ....	63
<b>Figure IV.23</b> Essai œdométrique d'argile traité à 1% et 0.5 cm de longueur d'EPV. ....	63
<b>Figure IV.24</b> Essai œdométrique d'argile traité à 1% et 1 cm de longueur d'EPV. ....	64
<b>Figure IV.25</b> Variation du coefficient de compressibilité $C_c$ ....	65
<b>Figure IV.26</b> Variation du coefficient de gonflement $C_g$ ....	65

<b>Figure IV.27</b> Contrainte de cisaillement en fonction de déplacement pour argile traitée à 0.3% d'EPV de 0.5 cm de longueur. ....	66
<b>Figure IV.28</b> Courbe intrinsèque d'argile traitée à 0.3% d'EPV de 0.5 cm de longueur. ....	66
<b>Figure IV.29</b> Contrainte de cisaillement en fonction de déplacement pour argile traitée à 0.3% d'EPV de 1 cm de longueur. ....	67
<b>Figure IV.30</b> Courbe intrinsèque d'argile traitée à 0.3% d'EPV de 1 cm de longueur. ....	67
<b>Figure IV.31</b> Contrainte de cisaillement en fonction de déplacement pour argile traitée à 0.5% d'EPV de 0.5 cm de longueur. ....	68
<b>Figure IV.32</b> Courbe intrinsèque d'argile traitée à 0.5 % d'EPV de 0.5 cm de longueur. ....	68
<b>Figure IV.33</b> Contrainte de cisaillement en fonction de déplacement pour argile traitée à 0.5% d'EPV de 1 cm de longueur. ....	69
<b>Figure IV.34</b> Courbe intrinsèque d'argile traitée à 0.5% d'EPV de 1 cm de longueur. ....	69
<b>Figure IV.35</b> Contrainte de cisaillement en fonction de déplacement pour argile traitée à 1% d'EPV de 0.5 cm de longueur. ....	70
<b>Figure IV.36</b> Courbe intrinsèque d'argile traitée à 1% d'EPV de 0.5 cm de longueur. ....	70
<b>Figure IV.37</b> Contrainte de cisaillement en fonction de déplacement pour argile traitée à 1 % d'EPV de 1 cm de longueur. ....	71
<b>Figure IV.38</b> Courbe intrinsèque d'argile traitée à 1% d'EPV de 1 cm de longueur. ....	71
<b>Figure IV.39</b> Variation de la cohésion du sol traité. ....	72
<b>Figure IV.40</b> Variation d'angle de frottement du sol traité. ....	73

Liste des tableaux

**Chapitre II : Traitements et déchets industriels**

**Tableau II.1** La variation de l'angle de frottement interne en fonction du pourcentage de caoutchouc..... 35  
**Tableau II.2** La variation de la cohésion en fonction du pourcentage de caoutchouc. .... 35

**Chapitre III: Matériaux et procédés expérimentales**

**Tableau III.1** Fiche technique de PVC..... 36  
**Tableau III.2** Fiche technique d'ALU. .... 37  
**Tableau III.3** Résultats de la masse volumique et la teneur en eau..... 40  
**Tableau III.4** Résultats de la masse volumique et la teneur en eau..... 41  
**Tableau III.5** Résultats des limites d'Atterberg. .... 42  
**Tableau III.6** Les valeurs de compactage du sol fin. .... 44  
**Tableau III.7** Résultats de mesures. .... 46  
**Tableau III.8** Classification des résultats suivant le coefficient de gonflement Cg. .... 48  
**Tableau III.9** Classification des résultats suivant le coefficient de compression Cc..... 48  
**Tableau III.10:** Résultats d'essai œdométrique de sol..... 48

**Chapitre IV: Résultats et procédés expérimentales**

**Tableau IV.1** Résultats des paramètres de l'ensemble des essais de Proctor..... 56  
**Tableau IV.2** Résultats des paramètres de l'essai CBR. .... 60  
**Tableau IV.3** Résultats des paramètres oedométriques du sol traité. .... 64  
**Tableau IV.4** Résultats d'essai cisaillement (sol+0.3% d'ajout)..... 68  
**Tableau IV.5** Résultats d'essai cisaillement (sol+0.5% d'ajout)..... 70  
**Tableau IV.6** Résultats d'essai cisaillement (sol+1% d'ajout)..... 72  
**Tableau IV.7** Résultats des paramètres de cisaillement du sol traité.. .... 72

**Notations et abréviations**

$\omega$  : Teneur en eau de sol naturelle.

$\gamma_d$  : Densité sèche.

$\gamma_h$  : Densité humide.

$S_r$  : Degré de saturation.

$W_L$  : Limite de liquidité.

$W_p$  : Limite de plasticité.

$I_p$  : Indice de plasticité.

$I_c$  : Indice de consistance.

$\omega_{opt}$  : La teneur en eau optimum.

$\gamma_{d\ max}$  : densité sèche maximale.

$\tau$  : Contrainte tangentielle.

$\sigma$  : Contrainte Normal

$C$  : La cohésion.

$\varphi$  : Angle de frottement interne.

$m_1$  : Masse de la tare.

$m_2$  : Masse de l'échantillon humide, y compris la tare.

$m_3$  : Masse de l'échantillon sec, y compris la tare.

$V$  : Vitesse limite de chute des grains (m/s).

$D$  : Diamètre de la particule en (m).

$\eta$  : Viscosité dynamique.

**LTPE** : Laboratoire des travaux publics d'EST.

**CEC** : La capacité d'échange cationique.

**DMS** : Déchets ménagers spéciaux.

**DM** : Déchets ménagé.

**DIB** : Déchets industriels banals

**DII** : Déchets industriels inertes.

**Å** : Ångström

**DIS** : Déchets industriels spéciaux.

**CET** : Centre d'enfouissement technique.

**EPV** : Emballages pharmaceutiques vides.

**TOT** : deux feuillets tétraédriques + couche octaédrique.

**CBR** : California bearing ratio test.

**PVC** : Poly chlorure de vinyle.

**CVM** : Chlorure de Vinyle monomère.

**ALU** : Aluminium.

**C<sub>c</sub>** : Coefficient de compressibilité.

**C<sub>g</sub>** : Coefficient de gonflement.

**IPI** : L'indice portant immédiat.

**GTR** : Guide de terrassement routière.

**PP** : Polypropylène.

**PET** : Polyterephthalate d'éthylène.

**PCB** : Polychlorobiphényles.

**CFC** : Les déchets de chlorofluorocarbures.

**LCPC** : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

**USCS** : Unified Soil Classification System.

**INTRODUCTION**  
**GENERALE**

### Introduction générale

En génie civil, le sol est un terme utilisé pour désigner un matériau constitué d'un agrégat naturel de particules minérales de dimensions comprises dans des limites prédéfinies. L'argile est l'une des différentes particules minérales qui forment le sol, c'est une matière première utilisée depuis l'antiquité dans divers domaines de la vie courante comme la poterie et les matériaux de constructions. Aujourd'hui le champ d'exploitation de cette matière est encore développé jusqu'au domaine des travaux publics et du bâtiment.

Le comportement des sols argileux pose un problème très important aux ingénieurs lors de réalisation de différents ouvrages du génie civil. Le matériau argileux possède une particularité de changement. En effet, un certain degré d'humidité peut le transformer en un matériau plastique et malléable. Ces modifications de consistance peuvent s'accompagner, en fonction de la structure particulière de certains minéraux argileux, de variations de volume plus ou moins conséquentes qui se manifestent soit sous forme d'une forte augmentation de volume (phénomène de gonflement) lorsque la teneur en eau augmente, ou de rétrécissement (phénomène de retrait) en période de déficit pluviométrique marqué. Les vingt dernières années ont vu la recherche se consacrer en grande partie au développement et à la mise à disposition du plus grand nombre de nouvelles techniques d'amélioration des sols. Il existe plusieurs techniques de construction, de stabilisation et de confortement elles ont été utilisées dans le domaine de génie civil afin de résoudre les problèmes vécus.

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 [1]. Les principales méthodes sont la stabilisation mécanique, hydraulique, physique, 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.

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.

D'autre part, l'utilisation efficace des déchets industriels a été confirmée par plusieurs recherches. Cependant, nous avons constaté que des études sur l'utilisation des emballages pharmaceutiques vides dans le traitement des sols en tant que n'ont pas été rapportées suffisamment, 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 industriels qui sont les emballages pharmaceutiques vides en tant que renforcement pour les sols argileux afin de pouvoir remplacer les matériaux commerciaux conventionnels. L'influence de la teneur en EPV sur un sol argileux d'OUM

ETOUB (SKIKDA), a été observée à travers une série d'essais en laboratoire des travaux publics de SKIKDA et ANNABA tels que les limites d'Atterberg, CBR, PROCTOR, l'œdomètre et cisaillement rectiligne. Les résultats des tests révèlent que l'inclusion d'emballage pharmaceutique vide 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.
- Le premier chapitre est concerne quelques notions générales sur les argiles, ses formations, ses compositions chimiques et minéralogiques.
- Le deuxième chapitre donne un aperçu des connaissances sur les méthodes de traitements et les différents matériaux utilisés comme des ajouts, ensuite présente le déchet industriel utilisé dans cette étude (EPV) et ces différents types et propriétés.
- Le troisième chapitre est consacré à l'identification de matériaux utilisé (argile OUM ETOUB) par plusieurs essais géotechniques standards (essais mécaniques et physiques)
- Le quatrième chapitre consiste en la présentation des résultats de traitement par l'ajout d'EPV sur les caractéristiques du sol étudié.
- A la fin une synthèse des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de ce mémoire présenté dans une conclusion générale.

**Chapitre I**  
**Généralités sur les argiles**

## I.1 Introduction

Les sols très variés présents sur notre terre requièrent la compétence d'un ingénieur spécialisé pour mener à bien les projets de génie civil, en liaison avec d'autres spécialistes. Ce spécialiste met en lumière les propriétés des sols à prendre en compte et les caractérise par des essais adéquats, de manière à ce que les fondations des ouvrages de génie civil soient suffisamment stables, avec une réserve de sécurité.

Nous exposons dans ce chapitre les sols fins et leurs problèmes. Nous avons abordé les différentes phases du sol en commençant par une définition des sols fins. Ensuite, nous avons présenté les divers types de sols fins tels que les argiles, les limons, les marnes, ...etc.

En conclusion nous avons clôturé ce chapitre en évoquant quelques-uns des problèmes associés à ce type de sol, tels que le tassement, le glissement, et le gonflement.

## I.2 Définition

Le sol est l'interface essentiel dans l'environnement représenter la partie superficielle de l'écorce terrestre tendre et friable. Il désigne l'agrégat naturel de grains minéraux et organiques de différentes formes et dimensions. Il provient d'une part de la fragmentation des roches du sous-sol au cours de temps sous l'influence du plusieurs processus notamment physiques, chimiques et biologiques au contact de l'atmosphère et d'autre part de la décomposition lente des restes d'animaux et de végétaux sous l'action d'êtres vivants souvent microscopiques [2].

## I.3 Origine et formation de sol

Le sol à une double origines principales proviennent de :

### I.3.1 La désagrégation des roches

La désagrégation des roches fait processus de fragmentation ou la dislocation des roches en fragments plus petits. Ce phénomène peut résulter de divers mécanismes, tels que l'altération chimiques, l'érosion ou la variation de température. Par exemple l'eau peut agir comme un agent d'altération des roches provoquant à la fois une désagrégation mécanique et altération chimique.

### I.3.2 La décomposition d'organismes vivants

Végétaux (tourbes) ou animaux (craies). On distingue également :

- **Les sols résiduels** résultant de l'altération sur place des roches ;
- **Les sols transportés** provenant du dépôt des produits d'altération préalablement repris par un agent physique de transport. Ce sont les sols transportés qui posent au concepteur d'ouvrages les problèmes les plus délicats.

Enfin, suivant leurs conditions de formation et de dépôt, les sols peuvent contenir des matières organiques en proportion plus ou moins élevée [3].

## I.4 Divers phases du sol

Les sols comme étant composé de trois phases. Une phase solide composé de particules minérales solides et organiques. Une phase liquide sous différentes formes appelées: eau libre, eau interstitielle et pour finir une phase gazeuse (Figure I.1, 2) [4]

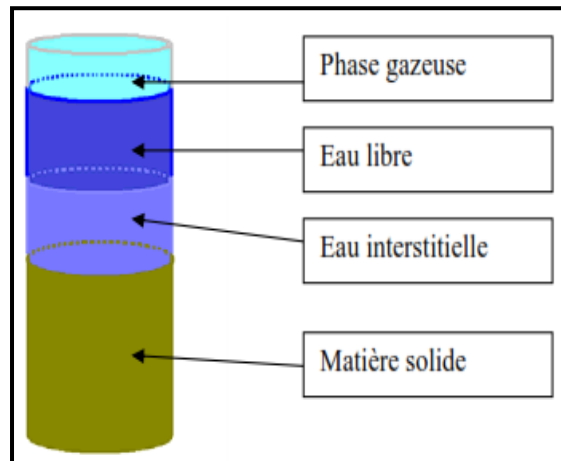


Figure I.1 Schéma simplifié des trois phases du sol [4].

- **La phase solide :** Appelée aussi « Squelette solide » provenant de la désagrégation des matériaux constituant l'écorce terrestre formé de particules dont la forme, la taille, et l'arrangement diffèrent sensiblement d'un sol à l'autre.
- **La phase liquide :** on distingue quatre types d'eau
  - Eau de constitution :** c'est la part d'eau présente au sein des particules de sol.
  - Eau libre :** s'écoule librement entre les grains.
  - Eau capillaire :** c'est la partie d'eau libre qui remonte par capillarité entre les grains.
  - Eau liée ou adsorbée :** un film autour des grains solides et elle ne s'écoule pas.
- **Phase gazeuse :** est l'air pour les sols secs et du gaz de décomposition ou la vapeur d'eau pour les sols humides.  
Lorsque tous les vides sont remplis de l'eau on dit que le sol est saturé.

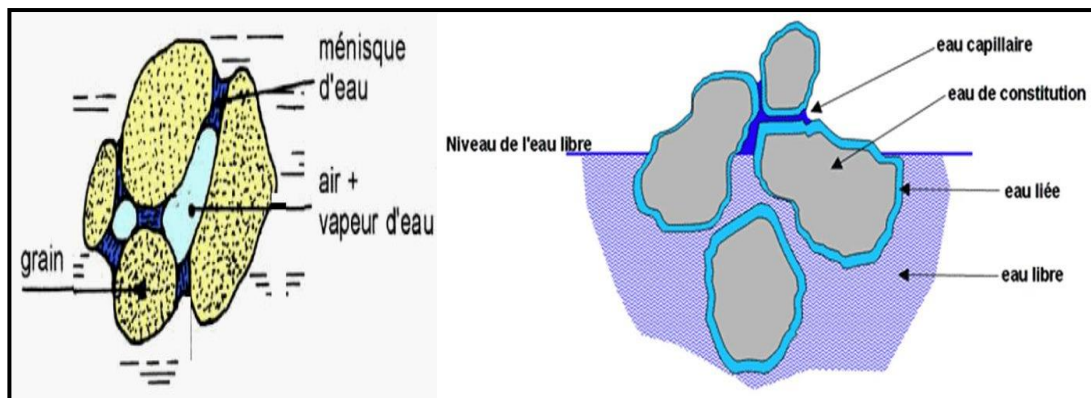


Figure I.2 Les éléments constitutifs d'un sol et l'état de l'eau dans un sol.

## I.5 Classification des sols

Les systèmes de classification des sols sont ont pour but de ranger les sols en familles présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou des caractéristiques très voisines. Ils permettent donc de grouper les très nombreux échantillons recueillis au cours d'une campagne de sondages et d'établir des coupes géotechniques du terrain. Ces coupes sont

précieuses pour l'ingénieur. Elles viennent compléter les données de la géologie, qui n'entraînent pas celles de la géotechnique : des sols de même origine géologique peuvent avoir des propriétés géotechniques très différentes, et réciproquement. (Figure I.3)

Il existe de très nombreux systèmes de classification des sols, parmi elles on peut citer :

- Les classifications élémentaires qui se réfèrent uniquement à la granularité du sol (triangulaire) ou aux seuils granulométriques (dimensions des particules).
- Classification LCPC/USCS (on utilise simultanément la granularité et la plasticité du sol).
- Classification GTR et AASHTOO (pour les terrassements routiers) [5].

On distingue deux grands types des sols :

- Sols grenus
- Sols fins

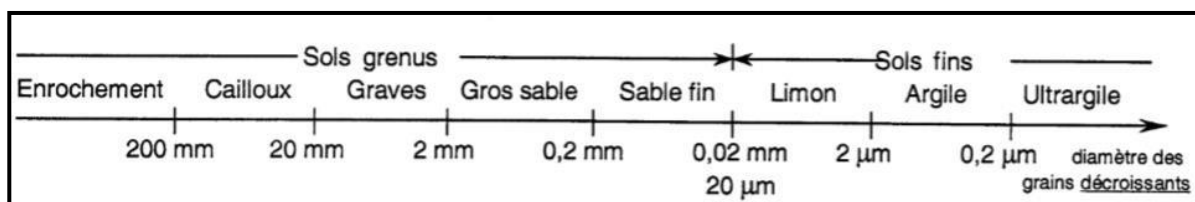


Figure I.3 Classification des particules solides d'un sol.

### I.6 Les sols fins

#### I.6.1 Définition

Ce sont des sols où les éléments fins dont le diamètre est inférieur à 20 μm 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 [5].

#### I.6.2 Différents types des sols fins

Il existe différents types de sols fins tels que les argiles et les limons, les marnes et les tourbes. 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, tassements...) [5].

##### I.6.2.1 Les limons

Les limons, constitués principalement de silt, de loess, possèdent un squelette siliceux à silicocalcaire à grains fins. Ils sont constitués par des éléments de dimensions comprises entre 2 et 20 μm (taille comprise entre celle des sables et celle des argiles). Le principal minéral constitutif est le quartz associé le plus souvent l'argile, la calcite, les feldspaths, les oxydes des hydroxydes de fer, le mica ou les minéraux lourds [5].

### I.6.2.2 Les marnes

Roche tendre composée en proportions variables d'argile et de calcaire mêlés à du sable, qui a la propriété de se déliter et qui est utilisée selon sa composition pour l'amendement des terres, la fabrication de ciments, de tuiles, de céramiques. On considère, selon leur composition, trois grandes catégories :

- les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35 % de carbonate de calcium ;
- les marnes proprement dites et les calcaires marneux avec des taux respectivement de 35 à 65 % et 65 à 95 %.

Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de craqueler sur marnes sont une assise de fondations bonne à moyenne en l'absence de gypse. En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse, avec risque de formation de fontis [6].

### I.6.2.3 Les vases

Les vases sont des dépôts formés par les marées ou que l'on rencontre dans les lits des lacs et des rivières. On peut les considérer comme des argiles en formation. Leur composition est extrêmement variable et dépend plus ou moins de leur mode de formation. Elles se composent en grande partie de roche broyée, d'argile et de sable, avec de coquillages (en partie rompus) et des débris organiques (restes végétaux et animaux) en quantités variables. Ce sont des matériaux gorgés d'eau et on les rencontre principalement dans les lacs, les ports, les estuaires, les bassins fluviaux ou marins [5].

### I.6.2.4 Les tourbes

La tourbe se définit comme le produit de la fossilisation de débris végétaux par des microorganismes (bactéries, anthropodes, champignons, microfaune) dans des milieux humides et pauvres en oxygène que l'on appelle tourbière sur un intervalle de temps compris entre 1 000 et 7 000 ans. Les tourbes se présentent comme un matériau de texture fibreuse et elles se forment dans le fond des vallées humides et les dépressions marécageuses. Elles peuvent contenir des éléments détritiques : Sables, graviers, vases. Elles contiennent une très forte proportion d'eau. Si la tourbe est soumise à des conditions particulières de pression et de température causées par son enfouissement, elle se transforme, au bout d'une période de l'ordre du million d'années, en charbon. Il existe plusieurs types de la tourbe à savoir : la tourbe blonde, la tourbe brune, la tourbe noire [5].

### I.6.2.5 Les argiles

#### a. Définition

L'argile est une matière première utilisée depuis l'antiquité par toutes les civilisations. Elle est nécessaire pour la fabrication des objets utilisés dans la vie quotidienne. Le mot argile vient du grec "Argilos" dérivé de "Argos" qui veut dire blanc, ou du latin "Argila" [7].

Il n'existe pas de définition unique du terme " argile ". Le mot " argile " englobe deux connotations, l'une liée à la taille des grains et l'autre à la minéralogie. La définition dépend de la discipline concernée. Le géologue ou le pédologue considèrent comme " argile " tout minéral de faible granulométrie, la limite étant fixée à 2 ou 4 microns selon les cas.

Les ingénieurs s'attachent plutôt aux propriétés de plasticité des matériaux argileux quel que soit leur taille. Les céramistes regroupent les matériaux selon leur comportement au chauffage [8].

Les argiles sont des roches constituées d'une variété de minéraux très fins, plus au moins bien définis, et dont la forme est généralement aplatie. Ils sont constitués par des minéraux spécifiques dits : argileux, mais on trouve aussi des espèces dont les plus fréquentes sont la silice, des silicates non phylliteux, des oxydes, des hydroxydes cristallisés ou amorphes et des carbonatés [9].

Ils possèdent certaines caractéristiques qui le distinguent en tant que groupe. L'analyse chimique montre que l'argile est composée essentiellement de silice, d'alumine, d'eau et souvent de quantités non négligeables de fer ( Fe ), magnésium ( Mg ), et de faibles quantités de sodium ( Na ), et de potassium ( K ). D'autres caractéristiques peuvent être citées comme : la grande superficie et la réactivité chimiques à la surface [10].

Le mot « argile » est si profondément ancré dans le langage courant, qu'il devient parfois imprécis. Il est nécessaire de le compléter par des connaissances minéralogiques confirmées permettant de définir les limites de ce terme, les argiles appartiennent à la famille des silicates, et nous le verrons plus précisément des phyllosilicates. La notion d'argile couvre une grande variété de minéraux et les spécialistes parlent plutôt d'argiles (au pluriel) ou de minéraux argileux. Il convient toutefois, selon une prescription des comités de nomenclature de l'Association Internationale Pour l'Etude des Argiles (AIPEA) et de la "Clay Mineral Society" (CMS) d'établir une distinction nette entre les termes "minéraux argileux" et "argile" [11]:

Les argiles peuvent être classées en deux grandes catégories :

- Les argiles plastiques : elles sont tendres et très déformables.
- Les argiles raides : elles sont indurées et présentent un comportement plus fragile que ductile au de la limite d'élasticité, et cela à cause de la présence des carbonates et du quartz.

### **b. Origine des argiles**

Les argiles ont une origine géologique secondaire, elles ont été formées par la dégradation des roches volcaniques dues à des phénomènes d'érosion et d'altération chimique sous l'action des agents atmosphériques [12].

L'origine des argiles est à chercher au sein même de notre planète. Elles proviennent en effet d'un magma liquide venu des entrailles de la terre et qui, une fois solidifié se retrouve, pour diverses raisons, en surface. Elle peut s'agir par exemple de granite, ou de roche volcanique. Une fois en surface, ces roches subissent une altération longue et minutieuse par les intempéries [13].

### **c. Formation géologique des argiles**

Les argiles désignent de très fines particules de matière arrachées aux roches par l'érosion ainsi que les minéraux argileux ou phyllosilicates (ces dernières observées au microscope ont la forme de plaquettes, ce qui explique leur plasticité). La plupart de ces particules proviennent de la désagrégation de roches silicatées (altération des silicates): du granite (mica et feldspath), du gneiss ou encore des schistes. Ces particules sont transportées par le vent ou l'eau sous forme de limon ou de vase. Les fleuves véhiculent des argiles qui finissent par se

déposer en alluvions, dans le cours d'eau lui-même, à son embouchure, dans un lac ou dans la mer. Les dépôts peuvent alors sédimenter et former une roche argileuse par diagenèse : déshydratation et compactage. En tant que roches sédimentaires, les affleurements argileux présentent une succession de strates empilées les unes sur les autres [14].

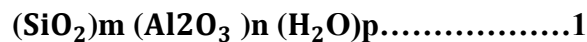
### d. Minéralogie des argiles

Les minéraux argileux sont de très petites particules très actives sur le plan électrochimique. Lorsque le pourcentage d'argile augmente, l'influence de la portion argileuse sur le comportement global du sol augmente proportionnellement [15].

Généralement, Les minéraux argileux sont fondamentalement constitués de silicium, aluminium, oxygène et ions hydroxyles. Ce sont des phyllosilicates d'alumine hydratés, le préfixe «phyllo» désignant des minéraux qui prennent des formes de feuillets [16].

Les minéraux argileux sont des substances cristallines qui tirent essentiellement leur origine de l'altération chimique de certains minéraux composant les matériaux parents. La famille des minéraux argileux regroupe tous les silicates hydratés appartenant au groupe des phyllosilicates. Sur le plan chimique, ce sont des aluminosilicates hydrox ajoutés à d'autres ions métalliques. [17]

Ils sont composés des particules de formes aplaties et de dimensions très petites qu'on ne peut voir qu'au microscope électronique, les cristaux ressemblent à de minces plaques ou plaquettes. Leur formule chimique est de la forme suivante [18]:



### e. Nature et structure des sols argileux

L'argile est un silicate, simple ou complexe, formé généralement d'une association d'un motif de silice  $\text{Si}_2\text{O}_7$ , d'Aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et de l'eau. L'argile est constituée par des substances diverses sous forme de particules de très petites tailles telle que les carbonates, les silices, l'aluminium, le sulfure, l'oxyde de fer, l'hydroxyde de fer, l'oxyde de manganèse et la matière organique [19].

La particularité des argiles est déterminée par des éléments de nature soit cristallographique ou géométrique (structurale) dont les quatre principaux sont :

- La maille ;
- Le feuillet ;
- L'empilement et l'alternance des feuillets ;
- L'espace interfolier.

#### ➤ Structure moléculaire microscopique des argiles

Le feuillet élémentaire se compose d'un empilement de 2 ou 3 unités de base. Les liens de covalence et les liaisons ioniques assurent les liaisons rigides du feuillet élémentaire. Des liaisons moins fortes, mais essentielles, assurent l'assemblage des feuillets élémentaires pour former les particules d'argile. Les forces de liaison entre feuillets sont principalement [19]:

- les forces d'attraction moléculaire de Van Der Waals qui sont des liaisons faibles ;
- les liaisons hydrogènes qui se forment avec des atomes fortement électronégatifs, par exemple l'oxygène dans le cas des argiles
- les substitutions isomorphes constituées dans le remplacement de certains cations constitutifs du réseau cristallin par d'autres de moindre valence.

## ➤ Structure élémentaire des minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des silicates hydratés (il s'agit généralement de silicates d'aluminium mais parfois de silicates de magnésium) dont la structure feuilletée permet de les ranger dans la famille de phyllosilicate.

Les phyllo silicates sont pour la plupart des aluminosilicates (oxydes de silicium et d'aluminium) [19].

On distingue quatre niveaux d'organisation :

- Les plans : sont constitués par les atomes.
- Les couches : association de deux plans d'atomes d'oxygène et/ou d'hydroxy le formant des couches de tétraèdre ou des couches d'octaèdre.
- Les feuillets correspondent à des combinaisons de couches.
- L'espace interfoliaire : c'est le vide séparant deux feuillets de même structure, il peut être occupé par des cations (éventuellement hydratés).

### ❖ La couche du tétraédrique de silice $Si_1O_4$

Dans l'élément tétraédrique, l'ion central est la silice (Si) qui est entouré par 4 ions d'oxygène  $O^{-2}$  (figure 4). Les tétraèdres sont liés ensemble par leurs bases en partageant un ion d'oxygène entre deux tétraèdres pour former une couche tétraédrique. La formule générale de cet ensemble est  $n[(Si_2O_5)^{-2}]$  (Figure I.4) [20].

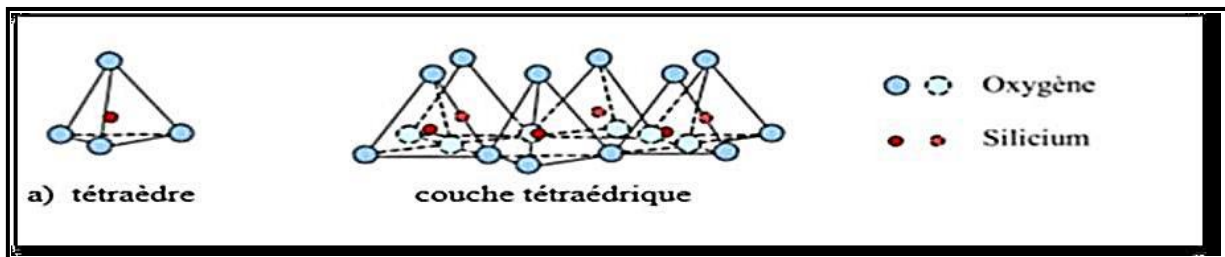


Figure I.4 Couches tétraédriques [21].

### ❖ La couche d'octaédrique d'alumine $Al_2(OH)$

Dans la couche octaédrique, l'ion central est soit un ion d'aluminium ( $Al^{+3}$ ), soit un ion de magnésium ( $Mg^{+3}$ ). Ces derniers sont entourés par six ions d'hydroxyde ( $OH^{-}$ ) (Figure. I.10).

Les unités octaédriques sont liées ensemble de telle sorte que chaque groupement fonctionnel ( $OH^{-}$ ) est partagé entre 3 unités octaédriques.

La formule générale de ce groupement est  $n[Al_2(OH)_6]$  ou  $n[Mg_3(OH)_6]$  (Figure I.5) [20].

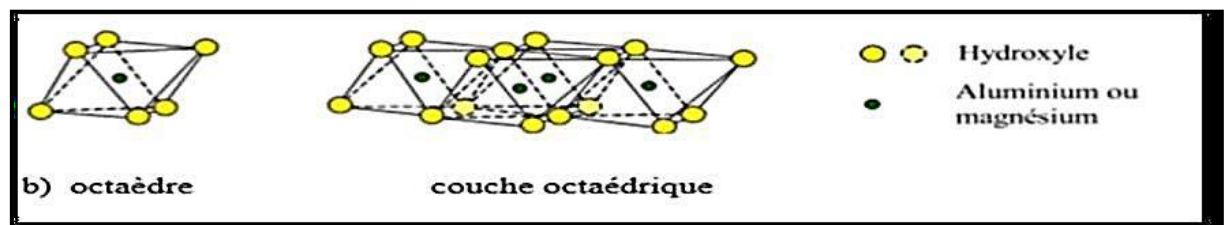


Figure I.5 Couches octaédrique [21].

## f. Types de feuillets

On distingue parmi les minéraux argileux trois grands groupes (1/1, 2/1 et 2/1/1), leur distinction a été établie en fonction de la composition chimique, de l'épaisseur des feuillets

[22], de la grandeur de l'espace interfoliaire et de la valeur de la capacité d'échange de cations (C.E.C) [23].

### ➤ Le type de feuillet (TO) ou 1:1

Le feuillet élémentaire est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Dans la couche octaédrique, deux cavités octaédriques sur trois sont occupées par des cations  $Al^{+3}$ , tandis que la couche tétraédrique est dépourvue en principe de substitution isomorphe. Donc le feuillet est neutre et sa capacité d'échange cationique est très faible (0,03 à 15 méq/100 g) (cas des kaolinites) [24].

L'épaisseur du feuillet élémentaire est de 7 Å. Ces feuillets élémentaires adhérents assez fortement entre eux par leurs faces basales, des liaisons hydrogènes existant entre les oxhydroyles de la base d'un feuillet et les oxygènes du haut du feuillet en dessous. Il constitue ainsi une particule primaire [25].

### ➤ Le type de feuillet (TOT) ou 2 :1

A une couche d'octaèdre encadrée par deux couches tétraédriques, les feuillets d'équidistance 10 Å sont assez fortement liés les uns aux autres par des ions potassium ( $K^+$ ), l'équidistance est donc constante. Les propriétés sont intermédiaires entre celles de la kaolinite et celles de la montmorillonite.

Ce type correspond aux illites, smectites et vermiculites; il comporte trois couches: deux couches tétraédriques de silice [22], encadrant une couche octaédrique alumineuse; mais cette couche octaédrique a une composition différente suivant les argiles, de sorte qu'il convient de distinguer deux types : le premier type est dioctaédrique telles que les illites et les smectites (montmorillonites, saponites, beidellites et les nontronites) et le second type est trioctaédrique (cas des vermiculites) [23].

La plupart des espèces de ce groupe sont des minéraux présentant des substitutions tétraédriques ou octaédriques, ou les deux simultanément et conduisent de ce fait à des feuillets chargés avec compensation des charges par l'intermédiaire de cations interfoliaires. Ces feuillets, séparés par des intervalles plus au moins larges, accusent une capacité d'échange cationique élevée (45 à 140 méq/100g) [16].

### ➤ Le type de feuillet (TOT) ou 2 :1 :1

Les minéraux argileux de ce groupe sont caractérisés par un feuillet constitué en plus des trois couches de la série 2/1, par une quatrième couche octaédrique qui s'insère dans l'espace interfoliaire (cas des chlorites). Ces trois groupes caractérisent les phyllites vraies, un quatrième groupe est représenté par les pseudophyllites, ou argiles fibreuses, telles que la sépiolite et la palygorskite (Figure I.6) [26].

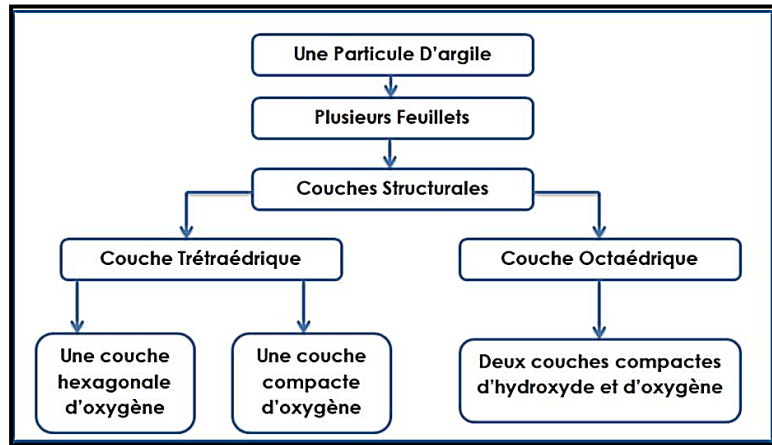


Figure I.6 Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile [17].

**g. Principales types d'argile**

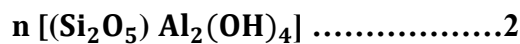
L'argile est une roche sédimentaire, composée pour une large part de minéraux spécifiques, silicates en général d'aluminium plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée (phyllo silicates) qui explique leur plasticité, ou bien une structure fibreuse qui explique leurs qualités d'adsorption. Il existe plusieurs variétés des familles d'argiles qui composent des dizaines d'espèces, Par ailleurs, les trois familles qui sont la Kaolinite, l'Illite et la montmorillonite sont présentes un peu partout dans la terre en différentes proportions [27].

➤ **Kaolinite**

Le terme kaolin, d'origine chinoise, vient de "Kaoling", nom d'une colline située à proximité de Yaochao-Fu dans la province de Kiangsi, où cette matière blanche et plastique a été exploitée à partir de 210 avant Jésus-Christ [27].

Kaolin, aussi appelé l'argile blanche, friable et réfractaire, composé principalement de kaolinite [28], c'est un minéral naturel de la famille des phyllosilicates. Il est composé de silicate d'aluminium hydraté, sa couleur blanche lui vient de son pourcentage élevé en alumine (environ 23%) réputé pour son pouvoir cicatrisant [29].

Elle est constituée d'une succession de couches alternées de silice (tétraèdre) et d'alumine (octaèdre), dont la liaison se fait par substitution de certain OH par des oxygènes O<sub>2</sub>. Les liaisons entre feuilletes de kaolinite sur l'effet composé de liaisons hydrogène et de forces de Van der Waals qui confèrent à l'ensemble une structure stable qui n'est pas affectée par la présence d'eau. La particule kaolinite comporte 100 à 150 feuilletes qui lui donnent une épaisseur de 0,1 mm et une largeur de 1 mm ; l'épaisseur d'un feuillet est d'environ 7,2. Sa surface spécifique totale de l'ordre de 10 à 20 m<sup>2</sup>/g (Figure I.7) .



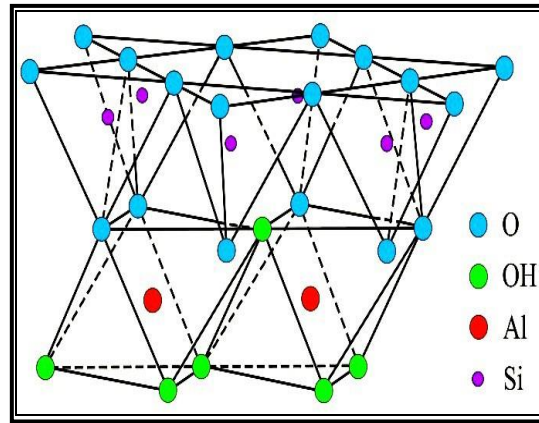


Figure I.7 Structure atomique de kaolinite [29].

➤ **L'illite**

Du nom de l'état américain de « l'Illinois », sont des minéraux à trois couches constituées de trois couches d'octaèdres à cœur d'aluminium positionnées entre deux couches tétraédriques à cœur de silicium. La formule chimique structurale des illites est  $KAl_2(OH)_2(AlSi_3(O,OH)_{10})$ , l'espace interfoliaire est de 10 Å [30]. Le feuillet élémentaire est composé d'une couche d'alumine entre deux couches de silice. Dans les couches de silice, un ion  $Si_4^+$  sur quatre est remplacé par un ion  $Al_3^+$ . Le déficit de charge qui en résulte est compensé par les ions  $K^+$  qui assurent des liaisons assez fortes entre les feuillets. On peut aussi rencontrer dans le feuillet de silice certaines substitutions isomorphes partielles de  $Al_3^+$  par  $Mg_2^+$  et  $F_2^+$  ainsi que de silicium par l'aluminium. Les particules d'illite sont plates de forme moins régulière que celle des particules de kaolinite. Elles ont diamètre moyen variant entre 0,1 m et 3 m et une épaisseur de l'ordre de 0,01m à 0,3 m. L'illite a une surface spécifique totale de l'ordre de 65 à 100 m<sup>2</sup>/g (Figure I.8).

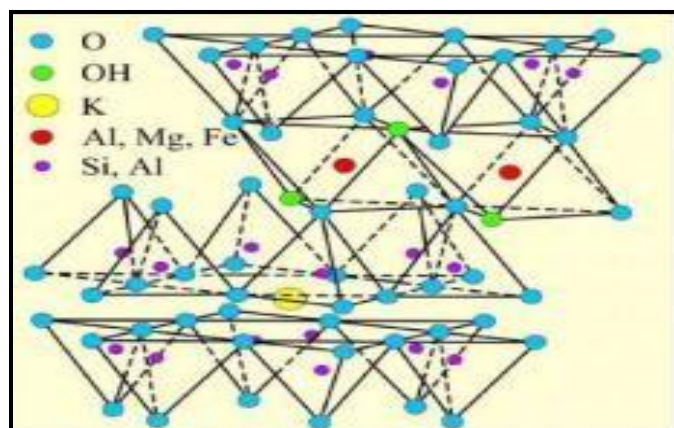
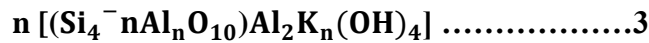


Figure I.8 Structure atomique de l'illite [30].

➤ **Montmorillonite**

La montmorillonite, appelée aussi smectite, est un minéral argileux de type 2:1 dont le feuillet élémentaire est composé d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. Une substitution partielle de l'aluminium « Al » par le magnésium « Mg » est fréquente. À l'instar de la kaolinite, les couches peuvent se prolonger indéfiniment dans les deux autres directions. Les forces de Van der Waals, dues principalement au moment électrique qui règne

entre les feuillets et qui soudent les sommets de feuillets de silice, sont faibles par rapport aux autres forces de liaison. Cela se traduit par une déficience en charge négative nette dans les feuillets en octaèdre. Pour cette raison les ions échangeables peuvent pénétrer dans la structure et séparer les couches. La montmorillonite est donc caractérisée par une structure instable qui est affectée par la présence d'eau. Les plaquettes de montmorillonite ont une forme quelconque est de taille très petite, un diamètre moyen entre 0,1µm et 1µm et une épaisseur moyenne entre 0,001µm et 0,01µm. La montmorillonite possède une surface spécifique totale entre 700 et 840 m<sup>2</sup>/g et un espace inter-feuillets de 9,6 Å (Figure I.9) [30] .

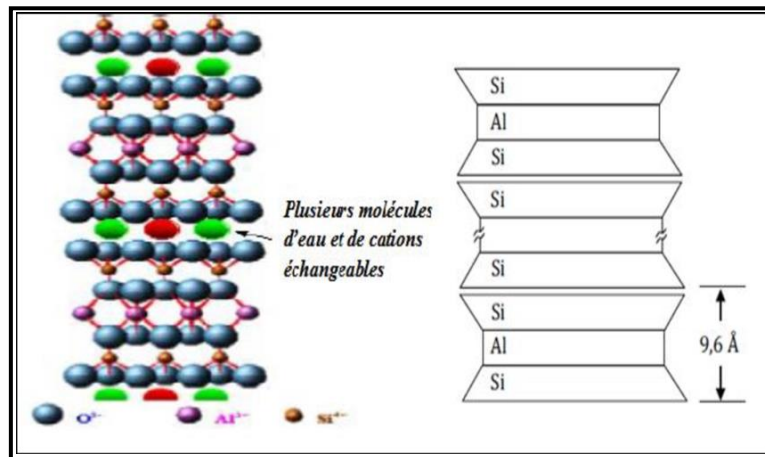
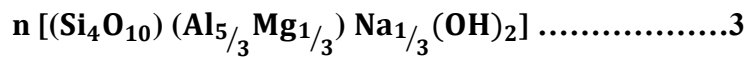


Figure I.9 Structure atomique de montmorillonite.

**h. Classifications des argiles**

On distingue 4 types d'argiles en fonction de leur origine:

- **Les argiles d'altération** :Formé principalement par l'altération des calcaires en climat tempéré ou l'altération des latérites en climat chaud et humide;
- **Les argiles fluviatiles** :Ils sont principalement déposés dans le lit majeur des rivières lors des inondations ;
- **Les argiles lacustres** : Déposées dans les lacs et les étangs ;
- **Les argiles marines** :Ce sont des argiles d'origine continentale déposées en milieu marin, et généralement modifiées par diagenèse.

**i. Texture des argiles**

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 [31].

Les matériaux argileux ne sont pas uniquement composés d'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 (Figure I.10).

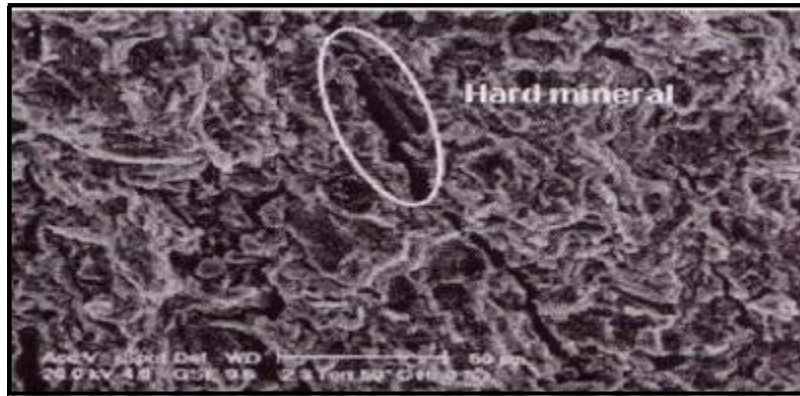


Figure I.10 Ouverture des fissures en proximité des matériaux rigides.

Le Roux (1972) distingue, à partir d'observations sur les marnes, trois classes principales de textures :

- la texture homogène où tous les minéraux sont intimés mélangés et où aucune direction n'est privilégiée ;
- la texture orientée où une direction privilégiée apparaît dans l'arrangement des grains ;
- la texture floconneuse où la phase argileuse se présente sous forme grossièrement sphérique soit seule, soit associée aux carbonates.

### j. Principales caractéristiques des minéraux argileux

Les minéraux argileux se caractérisent par plusieurs propriétés physico-chimiques dont les principales sont :

- Capacité D'échange Cationique
- Surface Spécifique
- Propriété De Gonflement

#### ➤ La capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique (CEC) correspond au nombre de cations monovalents qu'il est possible de substituer aux cations compensateurs pour compenser la charge négative de 100 grammes d'argiles. Elle s'exprime généralement en milliéquivalent pour 100 grammes. La montmorillonite a la capacité d'adsorber certains cations et de les maintenir dans un état d'échange, cela signifie que ces cations intercalés peuvent être échangés par le traitement d'autres cations dans une solution aqueuse. Les actions échangeables les plus communs sont  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{NH}^+$ . En effet, si l'argile est placée dans une solution d'un électrolyte donné, un échange se produit entre les ions de l'argile ( $\text{X}^+$ ) et ceux de l'électrolyte ( $\text{Y}^+$ ).



Il est important de noter que les molécules et les cations organiques peuvent être également adsorbés par la montmorillonite. Dans le cas des molécules organiques, cela donne lieu à de nombreuses applications dans le domaine du traitement des eaux et dans le domaine pharmaceutique [32].

#### ➤ La surface spécifique

Des argiles sont composées de la surface externe comprise entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace interfoliaire. L'augmentation de la surface spécifique donne

un pouvoir de gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé.

### ➤ Propriété De Gonflement

La propriété de gonflement à l'eau de ces structures résulte principalement des interactions des cations interfoliaires avec les molécules d'eau, qui en pénétrant dans l'espace intermellaire. Cette dernière est remplie par deux ou plusieurs couches moléculaires d'eau, la plus grande partie des ions dans le milieu extérieur entraîne de développement de la double couche électrique qui a pour effet d'écarter les feuillets les uns des autres. Cela se traduit par gonflement des argiles, ce qui réduit l'espace disponible pour l'écoulement des fluides et peut entraîner un colmatage partiel ou total du milieu poreux [33].

### k. Principales problèmes des argiles

#### ➤ Phénomène de gonflement

Un sol argileux change de volume selon son degré d'humidité comme le fait une éponge : il gonfle avec l'humidité et se rétracte avec la sécheresse, le gonflement se produit en présence d'humidité et l'hydratation se fait par l'hydratation des espaces inter foliaire (attraction des particules d'eau) ou par la répulsion des particules argileuses appelées aussi le gonflement osmotique, expliqués précédemment.

Plusieurs études ont expliqué le phénomène du gonflement de diverses manières :

❖ Selon Van Olphen (1963) a expliqué le processus de gonflement par deux étapes:

-La première étape serait due à la capacité d'absorptions monocouche successives et d'eau à la surface des particules.

-La seconde étape serait quant à elle due aux forces de répulsion qui sont dominants dans ce stade.

❖ Selon Mouroux (1988) ont distingué deux gonflements, un gonflement intraparticulaire (interfoliaire) et un gonflement interparticulaire (Figure I.11):

-Le gonflement interfoliaire résulte de la cassure des faibles liaisons entre les feuillets des particules d'argile, et permettant ainsi l'acquisition d'eau au sein de la structure des particules, quoique ce gonflement *est* assez rapide, dont l'amplitude est en revanche très notable.

-Le gonflement interparticulaire résulte de l'apport d'eau supplémentaire en écartant les plaquettes (assemblage de Feuillet) les unes des autres. Sa réaction est lente (peut durer des années, même lorsque la succion devient nulle). Contrairement au gonflement interfoliaire, le gonflement interparticulaire a une ampleur assez limitée et affecte toutes les argiles.



Figure I.11 Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation.

### ➤ Phénomène de glissement

Il s'agit d'un déplacement relatif d'un volume de l'argile par rapport au reste massif selon une surface de glissement quelconque.

Les glissements de terrain dans les argiles sensibles représentent une menace constante à la société en raison de leur grand potentiel de rétrogression et de la mobilité importante de ces matériaux lorsqu'ils sont remaniés. Les facteurs déclencheurs de glissements de terrain dans les argiles sensibles sont souvent attribués à des causes naturelles telles que l'érosion, des pluies diluviennes ou les tremblements de terre et/ou à l'activité humaine comme les constructions de remblai ou des excavations. (Figure I.12)

On distingue quatre types de glissements :

- Glissement plan ;
- Glissement rotationnel ;
- Glissement rotationnel simple ;
- Glissement rotationnel complexe.



Figure I.12 Phénomène de glissement.

### ➤ Phénomène de tassement

C'est la déformation verticale de l'argile, due à l'application des contraintes extérieures telles que les remblais, les fondations ou son propre poids. Les mêmes charges appliquées à des sols cohérents à grains fins et saturés (argiles, limons, ...) vont provoquer un tassement à plus long terme. En effet, l'eau présente dans le matériau mettra beaucoup de temps à être évacuée. Elle subira d'abord un phénomène de surpression avant de s'évacuer par les pores du sol et de permettre à la structure du terrain de se déformer. Ces tassements à long terme des sols cohésifs sous des charges constantes, sont appelés tassements de consolidation. Les sols fins présentent une faible perméabilité, par conséquent l'évacuation des pressions interstitielles est un processus très lent, qui peut s'étendre sur une durée relativement importante selon la distance à parcourir.

## I.7 Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'exploration des sols fins, notamment les argiles, qui sont des roches sédimentaires formées par la décomposition de roches volcaniques sous l'influence de l'atmosphère. Elles sont composées de minéraux argileux résultant de l'altération chimique de roches silicatées, avec une structure moléculaire complexe de feuilletés tétraédriques et octaédriques. Nous examinons également les diverses propriétés des minéraux argileux comme la kaolinite, l'illite et la montmorillonite ainsi que les classifications des argiles, les textures des argiles et des aspects essentiels tels que le gonflement, le glissement et le retrait.

**Chapitre II**  
**Traitements et déchets industriels**

### II.1 Introduction

Les procédés de traitement des sols sont l'un des procédés les plus importants qui se sont avérés efficaces pour améliorer les propriétés des sols. Il existe de nombreuses méthodes de traitement mécaniques, physiques, chimiques et autres qui se caractérisent par le traitement des sols au moyen de techniques utilisant des machines spécialisées ou par l'ajout de solides, d'impuretés ou de déchets.

La gestion des déchets dans le monde entier est un défi majeur en raison de l'urbanisation, de la croissance démographique et de l'industrie, en particulier des déchets industriels, qui posent de nombreux problèmes et présentent de nombreux risques. Les méthodes traditionnelles d'élimination des déchets industriels solides (mise en décharge, stockage, incinération ou recyclage) sont difficiles, laborieuses et parfois coûteuses.

Le domaine du génie civil pourrait donc être une solution pour la valorisation des déchets, car le sol est un matériau qui peut être renforcé par l'ajout de fibres ou d'inclusions solides produites à partir de déchets recyclés. Les déchets industriels sont utilisés dans la fabrication de liants hydrauliques dans le même but que la plupart des additifs : Valorisation des matériaux et développement durable.

### II.2 Traitement des sols

Les méthodes de traitement 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. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains, et sont jugées efficaces.

Il existe plusieurs méthodes de traitement des sols, on distingue :

- Les méthodes mécaniques.
- Les méthodes hydrodynamiques.
- Les méthodes chimiques.
- Les méthodes thermiques.
- Traitement par ajout des matériaux

#### II.2.1 Méthodes mécaniques

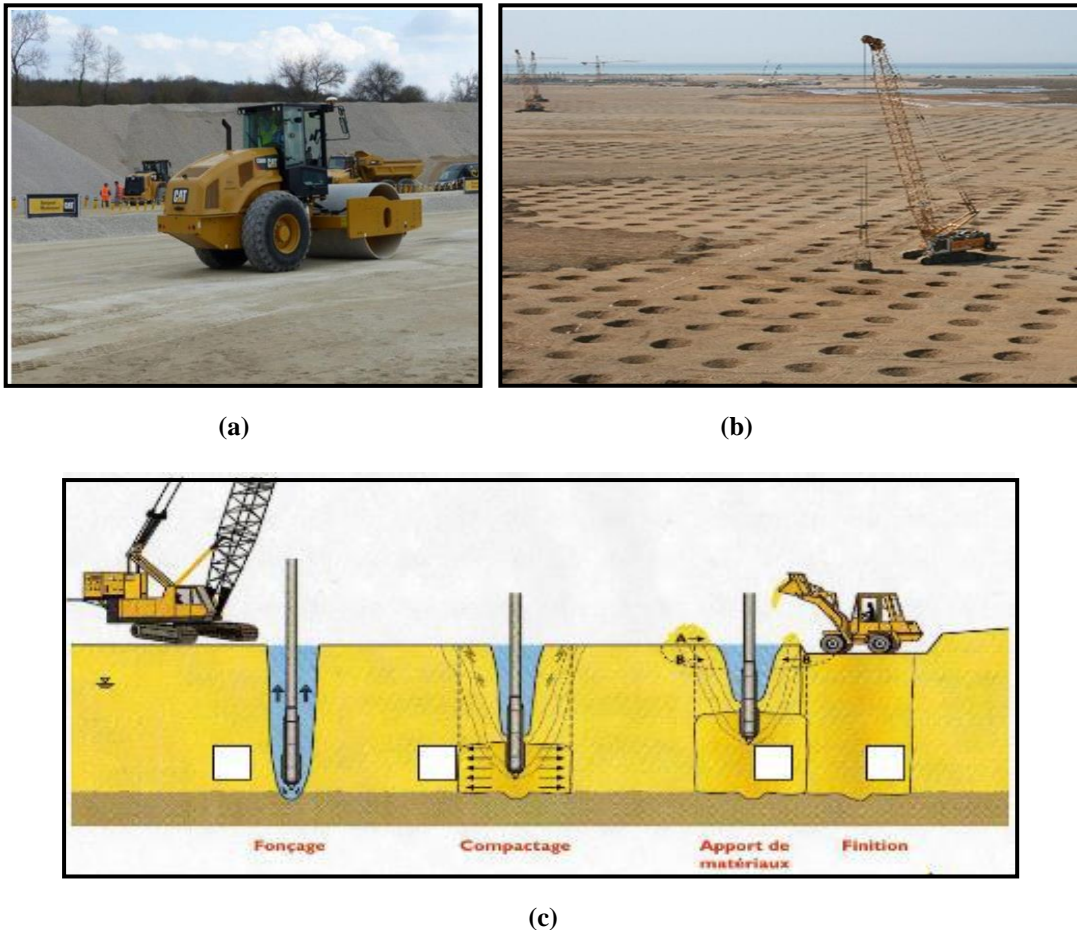
Les méthodes mécaniques sont fortement représentées par le compactage des sols. Le compactage est un procédé de densification des sols en place [34].

Ce procédé mène à une diminution des vides du sol par des moyens mécaniques aboutissant à une augmentation de la densité et de la résistance ainsi qu'une réduction de la compressibilité.

Les facteurs qui caractérisent le compactage sont en général : le poids volumique du sol sec, sa teneur en eau  $w$  à partir desquels on détermine le poids volumique total (ou humide) du sol.

Il peut être assuré par trois voies :

- Compactage de surface (une pression exercée par un rouleau compacteur) (Figure II.1. a).
- Compactage dynamique (une masse tombante à partir d'une hauteur donnée) (Figure II.1. b).
- Vibro-compactage (une vibration transmise par un moteur à pulsation hydraulique monté sur un compacteur ou grue) (Figure II.1.c) [35].



**Figure II.1** Les différentes techniques de compactage: a) Compactage de surface; b) Compactage dynamique; c) Vibro-compactage

### II.2.2 Méthodes hydrodynamiques

Ce sont des méthodes qui mènent à la diminution des vides du sol, principalement par élimination ou réduction de l'eau (réduction du volume du sol, et donc de la compressibilité) conduisant à une densification et à une évolution positive de la résistance du sol. On distingue deux principales méthodes [36]:

#### II.2.2.1 Pré-chargement ou pré-compression

Le pré-chargement est une solution simple recommandée pour les sols saturés très compressibles, en vue d'accélérer partiellement leur consolidation primaire qui s'accompagne d'un tassement et par suite d'une augmentation de leur cohésion non drainée.

Le pré-chargement consiste à placer une charge supplémentaire sur le sol qui nécessite un grand tassement de consolidation qui doit avoir lieu avant que la construction soit réalisée. Après que la consolidation suffisante a eu lieu, la surcharge sera retirée et le processus de construction sera entamé.

#### II.2.2.2 Accélération de la consolidation par les drains verticaux

L'inconvénient majeur du pré-chargement est la durée d'attente qui ne concorde pas avec les calendriers serrés des constructions. De ce fait, l'installation des drains verticaux est souvent combinée à la méthode de pré-chargement pour accélérer le processus de consolidation en diminuant la longueur des chemins de drainage.

La technique consiste à foncer verticalement dans le terrain, suivant un maillage régulier, un drain préfabriqué. Lors de la mise en charge du terrain, les drains facilitent l'évacuation de l'eau interstitielle jusqu'à la surface, permettant ainsi une consolidation accélérée des sols traités.

### II.2.3 Méthodes thermiques

#### II.2.3.1 Déshydratation

La déshydratation par la chaleur est très rarement appliquée en géotechnique, elle permet de durcir certaines argiles par exemple.

En pratique, la méthode consiste à brûler un carburant dans un forage en utilisant un forage voisin communiquant avec le premier et servant de cheminée de tirage [37].

#### II.2.3.2 Congélation

La congélation des terrains instables est un procédé ancien à caractère provisoire, employé pour le creusement des fouilles de puits ou de galeries. Cette technique rend le sol étanche et résistant provisoirement.

Ce procédé est généralement développé pour les sols grenus mais il peut être appliqué aux argiles molles et aux limons. La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé.

Les techniques de congélation utilisées sont basées sur la circulation d'un fluide froid dans des tubes enfoncés dans le massif de sol. Une saturation complète du sol est souhaitée. La congélation du sol s'effectue d'habitude en deux étapes à savoir les étapes active et passive de congélation. L'étape active est la plus importante et l'appareillage de réfrigération marche avec sa grande capacité que durant l'étape passive nécessaire pour maintenir l'épaisseur du front de gel contre le dégel (Figure II.2) [37].



Figure II.2 Traitement du sol par congélation en France.

### II.2.4 Méthodes chimiques

Le traitement chimique est une technique intéressante pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux. Aujourd'hui les divers produits et techniques font partie d'une pratique courante des grands ouvrages du Génie Civil à l'échelle mondiale.

Le recours massif à cette technique qui valorise les matériaux en place ce qui entraîne une diminution notable des coûts est due principalement aux facteurs suivants tels que la raréfaction des gisements naturels de matériaux nobles, le souci écologique croissant imposant de préserver d'une part les ressources naturelles existantes et délimiter d'autre part la mise en dépôt des matériaux impropres à la réutilisation en remblais ou en couches de forme. Les ajouts cimentaires et les produits chimiques les plus utilisés sont le ciment, la chaux, les cendres volantes. L'objectif principal du malaxage des ajouts cimentaires avec le sol est l'amélioration de ses propriétés physico-mécaniques ainsi que sa durabilité.

Les différentes propriétés qui peuvent être améliorées sont la résistance, la plasticité, la compressibilité, la perméabilité, le potentiel de gonflement et le potentiel d'effondrement.

L'amélioration de ces propriétés s'effectue soit par l'augmentation de certaines d'entre elles telle que la résistance, soit par la réduction d'autres telles que la plasticité, la perméabilité et l'érosion. Un bon malaxage des ajouts cimentaires avec le sol à traiter est un facteur important affectant d'une façon significative la qualité des résultats [37].

### II.3 Définition du déchet

Le concept déchet est polysémique. Sa définition varie d'un pays à un autre et a évolué selon les différentes disciplines. Plusieurs termes existent pour exprimer la notion de déchet, certains dérivent de la langue familière, d'autres du vocabulaire administratif. Le mot « déchet » apparaît au 13<sup>ème</sup> siècle sous la forme « déchiié » ou « déchiet ». D'une manière générale plusieurs définitions de déchet ont été élaborées, selon différents volets [38].

Pour connaître une notion générale, il convient spécifiquement de relever toutes les diverses définitions de ce vocabulaire dans les dictionnaires. Campan [2007] a exposé différentes définitions du dictionnaire Larousse. Au départ, il définit les déchets comme « la diminution en quantité ou en valeur ». En 1972 le même dictionnaire a donné une définition plus précise sur ce mot : « Discrédit », « Diminution ». En 1988 et dans la dernière édition, il apporte une définition très détaillée : « ce qui tombe d'une matière qu'on travaille, déchet de laine. Perte, partie irrécupérable de quelque chose : cageots de fruits où il y a du déchet. Personne avilie moralement et physiquement dégradée, un déchet de l'humanité » [39].

Selon le point de vue environnemental, « un déchet est tout résidu résultant d'un processus d'extraction, d'exploitation, de transformation, de production, de consommation, d'utilisation, de contrôle ou de traitement dont la qualité ne permet pas de le réutiliser dans le cadre d'un procédé dont il est issu ou, plus généralement tout bien, tout meuble, abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon. » [39].

### II.4 Origine de la production des déchets

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- **Biologiques** : tout cycle de vie produit des métabolites.
- **Chimiques** : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès que veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième.
- **Technologiques** : tout procédé industriel conduit à la production de déchet.
- **Économiques** : les produits en une durée de vie limitée.
- **Écologiques** : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres Déchets qui nécessiteront une gestion spécifique.

- **Accidentelles:** l'inévitable dysfonctionnement des systèmes de production et de Consommation Sont eux aussi à l'origine de déchets [40].

### II.5 Caractéristiques des déchets

#### II.5.1 Densité

La connaissance de la densité est d'une grande importance pour le choix des moyennes décollectes et de stockage. C'est pourquoi on peut avoir une densité en poubelle, une densité en benne, une densité en décharge, une densité en fosse, etc.

#### II.5.2 Degré d'humidité

Les ordures renferment une suffisante quantité d'eau variant en Fonction des saisons et le milieu environnemental. Cette eau a une grande influence sur la rapidité de la décomposition des matières qu'elles renferment et sur le pouvoir calorifique des déchets.

#### II.5.3 Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est défini comme la quantité de chaleur dégagée par la combustion de l'unité de poids en ordures brutes.

#### II.5.4 Rapport des teneurs en carbone et azote

Le rapport C/N a été choisi comme Critère de qualité des produits obtenus par le compostage des déchets. Il est d'une grande importance pour le traitement biologique des déchets, car l'évolution des déchets en fermentation peut être suivie par la détermination régulière de ce rapport [41].

### II.6 Classification des déchets

#### II.6.1 Classification selon leur nature

Le guide des techniques communales pour la gestion des déchets ménagers et assimilés du ministère d'aménagement du territoire et environnement (2003), présente une classification des déchets selon leur nature physique en 03 catégories [42] :

- **Déchets solides** : ordures ménagères, emballages, gravats.....etc.
- **Déchets liquides**: huiles usagés, peintures, rejet de lavage.....etc.
- **Déchets gazeux**: biogaz, fumées d'incinération .....etc.

#### II.6.2 Classification selon leur typologie

##### II.6.2.1 Déchets biodégradables ou décomposables

Sont au moins pour partie détruits naturellement, plus ou moins rapidement, En général par les bactéries, champignons et autres micro-organismes et/ou par des réactions chimiques laissant des produits de dégradation identiques ou proches de ceux qu'on peut trouver dans la nature, parfois néanmoins contaminés par certains résidus.

##### II.6.2.2 Déchets inertes

Tous déchets provenant notamment de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation, qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge, et qui ne sont pas contaminés par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances, susceptibles de nuire à la santé ou à l'environnement (Figure II.3) [43].



Figure II.3 Les déchets inertes.

### II.6.2.3 Déchets dangereux

Issus de la famille des déchets spéciaux, ils contiennent des quantités de substances toxiques potentiellement plus importantes et présentent de ce fait beaucoup plus de risques pour le milieu naturel (poussières d'aciéries, rejets organiques complexes, bains de traitement de surface contenant soit du chrome, cyanure ou une forte acidité, les matériaux souillés par les polychlorobiphényles (P.C.B) les déchets de chlorofluorocarbures (C.F.C), et mercuriels [44].

### II.6.2.4 Déchets ultimes

Le Code de l'environnement définit dans son article L.541-1 [45], un déchet ultime comme «déchet résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est pas susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux ».

### II.6.2.5 Déchets recyclables

Le déchet recyclable est un type de déchet qui peut être collecté, traité, et transformé en de nouveaux produits. Il est généralement composé de matériaux tels que le papier, le carton, le verre, la plastique, qui ont la capacité d'être recyclés plutôt que d'être jetés à la décharge [46].

## II.6.3 Classification selon leur origine

### II.6.3.1 Déchets ménagers et assimilés

Les communes ou les établissements publics de coopération intercommunale assurent éventuellement en liaison avec les départements et les régions, l'élimination des déchets des ménages. Ces collectivités assurent également l'élimination des autres déchets définis par décret, qu'elles peuvent, eu égard à leurs caractéristiques et aux quantités produites, collecter et traiter sans sujétions techniques particulières [47].

Il faut distinguer [48]:

- **Les déchets ménagers** (déchets produits par les ménages) qui se composent des :
  - Ordures ménagères collectées dans le cadre des tournées de ramassage organisées par les municipalités.
  - Déchets volumineux ou "encombrants" soit collectés en porte à porte, soit réceptionnés dans une installation mise à la disposition des ménages.
  - Déblais et gravats produits par les ménages réceptionnés dans des déchetteries ou des dépôts réservés aux seuls déchets inertes.

- Déchets ménagers spéciaux (DMS), ne pouvant en raison de leur danger être éliminés sans risques avec les déchets ménagers. Ils sont réceptionnés dans des déchetteries équipées à cet effet.

- Déchets végétaux issus de l'habitat pavillonnaire.
- Déchets de l'automobile (huiles, épaves, batteries, pneus, ...).

- **Les déchets des espaces publics** (rues, marchés, égouts, espaces verts) ou des établissements publics (administrations, écoles, hôpitaux, casernes).
- **Les déchets artisanaux et commerciaux.**
- **Les déchets assimilables aux ordures ménagères** synonymes de déchets industriels banals (DIB), ne sont pas des déchets des ménages mais peuvent être éliminés dans les mêmes installations que les ordures ménagères.

### II.6.3.2 Déchets agricoles et Agro-alimentaire

Les déchets agricoles correspondent aux déchets associés au niveau primaire de production agricole. Ils peuvent être classés de deux manières:

#### a. Classification au niveau de la production du déchet

- **Déchets agricoles** (produits au niveau de la production agricole),
- **Déchets agro-alimentaires** (produits au niveau du stockage, du conditionnement et de la transformation des produits agricoles).

#### b. Classification en fonction de l'origine du déchet

- **Origine animale**
  - Déchets d'élevage (déjections animales, ...etc).
  - Déchets des abattoirs, de l'équarrissage et des autres industries de la viande.
  - Déchets des industries de conserverie
  - Déchets des industries de la pêche.
  - Déchets de laiteries et de fromageries.
- **Origine végétale (déchets pauvres en azote)**
  - Résidus de culture.
  - Déchets des industries agro-alimentaires.
  - Déchets de l'aquaculture [49].

### II.6.3.3 Déchets des activités de soins

Souvent dénommés de façon réductrice "Déchets Hospitaliers ", ces déchets comprennent les déchets des établissements de soins ou déchets hospitaliers et les déchets des laboratoires médicaux [48].

### II.6.3.4 Déchets industriels

Il s'agit des déchets produits par les entreprises industriels, commerciales ou artisanales. Ils comprennent des matériaux de natures divers (déchets de fabrication, d'emballages vides sous-produits de production...etc.) [50], les déchets industriels sont classés dans trois grandes catégories : déchets inertes, déchets banals, déchets spéciaux.

#### a. Déchets industriels inertes (DII)

Ce sont des déchets non susceptibles d'évolution physique, chimique ou biologique importante. Ce sont principalement les déchets de chantier du bâtiment et des travaux publics.

Ils sont essentiellement constitués de déblais et gravats et ne doivent pas être mélangés avec d'autres déchets [51].

- Les déchets inertes produits par le secteur du bâtiment on trouve : Les déblais et gravats de chantier : béton, les briques, les céramiques, les carrelages, les matériaux à base de gypse, parpaing, pierres ...etc.
- Les déchets inertes de secteur des travaux publics : Il s'agit principalement de cailloux, de terres et de déblais ainsi que des déchets minéraux de démolition d'ouvrages d'art et de génie civil.
- Les déchets inertes issus des travaux de VRD (Voirie et Réseaux Divers) sont les déblais de tranchées, de bordures de trottoirs, de pavés ...etc [52].

### b. Déchets industriels banals (DIB)

Ce sont des déchets produits par les entreprises (commerces, artisanat, services, industries) et par les établissements collectifs (éducatifs, hospitaliers, pénitentiaires...) qui ne présentent pas de caractère dangereux. Leur manutention et leur stockage ne nécessitent pas de précautions particulières au regard de la protection de l'environnement et des travailleurs. Cependant une fraction est valorisable et peut donc nécessiter des précautions de stockage telles qu'un stockage séparé ou à l'abri de la lumière. Les DIB sont des déchets assimilables aux ordures ménagères constitués de verres, plastiques, métaux, bois, papiers, cartons, textiles...etc (Figure II.4) [51].



Figure II.4 Les déchets banals.

### c. Déchets industriels spéciaux (DIS)

Appelés aussi toxique, ce sont les déchets très variés qui, par leur nature ou leur volume, font courir un risque (risque physique, risque lié à des réactions dangereuses, risque biologique, risque pour l'environnement) et nécessitent un traitement spécifique dans des installations adaptées (certains sont traités sur place) car leur élimination nécessite des précautions particulières pour la protection de l'environnement, en fait un déchet dangereux n'est souvent qu'un composé ordinaire qui se trouve là où il ne faut pas, avec ce qu'il ne faut pas, quand il ne faut pas [53].

Le DIS ont des sources diverses selon la branche et /ou les stades des procédés de fabrication, il peut notamment s'agir [53] :

- De produits de mauvaise qualité générés par suite d'un contrôle inadéquat du procédé ou d'une qualité insuffisante des matières premières (plastiques, médicaments inutilisables).
- Des matières auxiliaires utilisées par des procédés : catalyseurs usés, adsorbants, décolorants, plastifiants et adhésifs.

-D'eaux et boues de lavage de produits.

Parmi les types de déchets spéciaux les plus importants par leur poids, on trouve :

- la terre souillée provenant de l'assainissement de sites contaminés.
- Les déchets spéciaux à haute valeur calorifique.
- les résidus de broyage non métalliques : cesse des vieilles voitures, valorisation de câbles , ...etc.
- Inorganiques des bains galvaniques.
- Les ratés de fabrication, rebus et produits secondaires de la synthèse de produits organiques.
- Les piles, accumulateurs et lampes.
- Les agents filtrants et les restes de produits chimiques.

### II.7 Gestion des déchets

La gestion des déchets dans toutes ses opérations (Tri, Collecte, Transport, Valorisation, Élimination) constitue le plan de charge d'un service public, tout comme l'eau, la santé, le transport et autres. Elle vise l'intérêt supérieur de la population, la préservation de la santé publique et la protection de l'environnement. Donc la gestion des déchets est sous l'égide de l'état à travers ses organes locaux, notamment les municipalités qui se chargent de la collecte et le transport des déchets. Les municipalités délèguent parfois certaines opérations qui relèvent de la technicité industrielle comme le recyclage, a des opérateurs privés [54].

#### II.7.1 Les étapes de la gestion des déchets industriels

##### II.7.1.1 Collecte des déchets

Opération consistant en l'enlèvement des déchets des points de rebuts ou de regroupement pour les acheminer vers un lieu de tri et de stockage. Mais il faut respecter le principe de la marche en avant qui est une démarche qualitative de l'hygiène qui a pour principe de base que les produits sains ne doivent pas croiser les produits souillés. Alors la collecte des déchets doit se faire suivant un chemin spécifié prévu pour cette fonction afin d'éviter toute contamination ou endommagement des produits finis ou des matières premières [55].

##### II.7.1.2 Tri des déchets

Il est indispensable de les trier de manière correcte. Vu la variété des déchets générés par les différentes activités professionnelles, cette tâche peut s'avérer très complexe. Le tri diffère d'une entreprise a une autre selon les différent type de déchets qu'elles produisent et leur quantité. Voici une grille de tri simplifiée pour les déchets industriels en trois étapes :

Premièrement séparer les déchets selon leur type, designer une zone spécifier pour chaque type car le traitement applicable à un déchet spécifique varie en fonction de différents critères, une zone pour les déchets industriels banals (DIB) une autre pour les déchets industriels spéciaux (DIS) ainsi qu'une zone pour les déchets industriels inerte (DII).

Deuxièmement deviser ses zones selon la nature des déchets ou le traitement réserver à ses derniers par exemple : Les DIB assimiler aux déchets ménagé (DM) qui serrant expédier à la décharge.

Et troisièmement, trier les déchets valorisables selon le type de valorisation, et classé chaque type de matière dans sa zone, exemple : plastique, carton, bois ...etc, ou selon les articles [55].

### II.7.1.3 Stockage des déchets

La gestion du stockage des déchets est une problématique pour les entreprises industrielles. D'autant plus concernât les déchets dangereux, pour bien la maîtriser il faut avoir connaissance des types, des quantités de déchets stockés et de leur dangerosité.

Il faut donc bien connaître son stockage de déchets afin de prévenir les risques pour ses salariés et protéger l'environnement cela passe par la bonne connaissance :

- Des caractéristiques des déchets stockés et de leur dangerosité.
- Des quantités stockées par lieux de stockage.
- Des risques encourus en cas de déversement, d'accident ou d'incendie...etc [55].

### II.7.1.4 Transport des déchets

Comme dans l'étape de stockage il y a des règles à respecter durant le transport des déchets de l'entreprise jusqu'aux installations de traitement spécialisé, pour assurer la logistique dans les meilleures conditions en évitant tout dommage pouvant survenir au cours de cette étape que ce soit l'endommagement de la cargaison ou les risques lié à la sécurité des personnes ou de l'environnement.

Le transport se fait bien sûr, selon la nature des déchets : des camions citernes pour les déchets liquide des bennes pour les déchets solides en vrac ou des plateaux pour les déchets conditionner et les véhicule ou les entreprises qui assure se service doivent posséder les autorisations requises qu'il s'agisse d'attestation ou d'agrément délivré par les autorités [55].

## II.7.2 Traitement des déchets industriels

### II.7.2.1 Valorisation de matière

#### a. Réemploi

Consiste à utiliser une nouvelle fois un produit ou objet usagé, pour un usage analogue à celui de sa première utilisation ou pour une autre utilité, sans qu'il y ait de traitement intermédiaire. Exemple : la consignation des bouteilles qui sont à nouveau remplies après leur nettoyage.

#### b. Réutilisation

Consiste à utiliser de nouveau un déchet, pour usage différent de son premier emploi. Exemple : l'utilisation de pneus usagers pour protéger la coque des bateaux.

#### c. Recyclage

Le recyclage désigne la réintroduction d'un matériau contenu Dans un déchet dans le cycle production, en remplacement total ou partiel d'une matière neuve.

Exemple : utiliser les bouteilles cassées et les refondre pour en faire des bouteilles neuves.

### II.7.2.2 Valorisation organique par le compostage ou la méthanisation

#### a. Compostage

C'est un procédé biologique aérobie de dégradation et de valorisation de matière organique en un produit stabilisé et hygiénisé disposant des caractéristiques d'un terreau enrichi en composés humiques.

#### b. Biométhanisation

L'opération de méthanisation consiste à transformer des matières organiques en conditions anaérobies (sans oxygène), produisant à la fois un gaz combustible, appelé biogaz (mélange de gaz carbonique et méthane), et un amendement organique.

### II.7.2.3 Valorisation énergétique

Consiste à utiliser une source d'énergie résultant de l'incinération ou de la thermolyse, ces modes de traitement des déchets sont tout à fait applicables dans un système industriel appliquant les principes de l'écologie industrielle puisqu'ils permettent de récupérer l'énergie de la combustion.

### II.7.2.4 Enfouissement

Le dernier mode de traitement des déchets est l'enfouissement, méthode la moins écologique de toute puisque le déchet n'est ni réutilisé, ni valorisé, ce mode de gestion s'applique essentiellement aux déchets ultimes dont aucune solution, à l'heure actuelle n'été trouvée [56].

#### a. Types de centre l'enfouissement technique (CET)

On distingue 3 types de décharges ou de centres d'enfouissement technique (CET) :

-Les CET de classe 1 ou centres de stockage pour résidus ultimes sont capables d'accueillir les déchets les plus toxiques tels que mâchefers, poussières d'épuration, des usines d'incinération, déchets industriels spéciaux.

-Les CET de classe 2, un peu moins étanches que les précédents, sont habilités à recevoir les ordures ménagères et assimilés.

-Les CET de classe 3 accueillie les déchets, gravats et mâchefers non toxiques [57].

### II.8 Emballages vides pharmaceutiques (EPV)

Si le blister a fait ses preuves pour la protection des médicaments solides (contre les chocs, l'humidité, l'oxygène...), il fait partie des emballages du secteur qui ne bénéficient pas de filière de recyclage. En cause : sa composition complexe faite d'aluminium et de pvc.

L'élimination des déchets pharmaceutiques est devenue un problème pour les autorités publiques en raison des énormes quantités en attente d'incinération. L'augmentation de la quantité de déchets provenant de médicaments périmés et de bouteilles vides est due au manque d'installations d'incinération.

Ainsi, la mise en décharge et l'incinération sont les deux méthodes les plus courantes d'élimination des déchets pharmaceutiques en Algérie, sans aucun processus de recyclage, en raison de l'absence de capacité spéciale pour recycler ce type de déchets industriels.

Contrairement aux pays européens qui recyclent les blisters et éliminent tous les déchets inutiles, exemple : Allemagne, Belgique, Suisse...etc (Figure II.5).

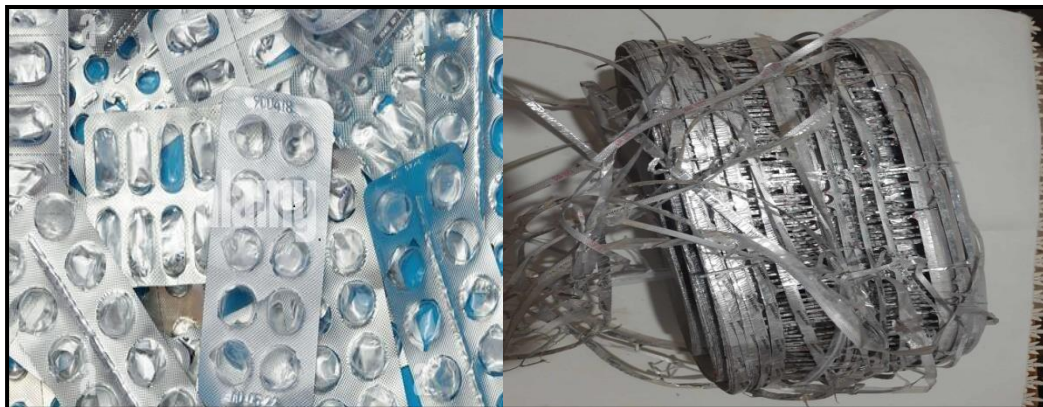


Figure II.5 Les emballages des médicaments pharmaceutiques.

### II.8.1 Types des emballages vides

La plupart des emballages pharmaceutiques produits sont des blisters à base de plastique recouvert d'un fin film d'aluminium pour le fermer (PVC-ALU), ainsi que le blister tout aluminium (ALU-ALU).

#### II.8.1.1 PVC-ALU

En industrie pharmaceutique, la plupart des matériaux utilisées dans l'emballage sont des thermoplastiques comme le PVC (polyvinyle chlorite), le PE (polyéthylène) et le PP (polypropylène).

La forme la plus courante de blister associe une partie plastique avec une feuille d'aluminium rigide qui forme la couche de scellement [58].

Les thermoplastiques et les plastiques thermodurcissables sont deux classes distinctes de polymères qui se différencient par leur comportement en présence de chaleur. La différence matérielle entre les deux réside dans le fait que les thermoplastiques peuvent être refondus, alors que les plastiques thermodurcissables restent à l'état solide une fois durcis [59].

Le PVC a pour principale qualité d'être un matériau transparent. C'est le matériau le plus basique pour la bande de formage. L'addition de plastifiants à celui-ci diminue sa température de transition vitreuse, ce qui permet de proposer un PVC souple à température ambiante [60].

#### II.8.1.2 ALU-ALU

Dans l'industrie pharmaceutique, du film composite à base d'aluminium et de papier et/ou de PET (polytéréphtalate d'éthylène) est également utilisé comme papier couvercle. Pour cela, le papier pesant de 40 à 50 g/m<sup>2</sup> est laminé avec un film d'aluminium [61].

L'aluminium est le composant de la dernière génération de blisters appelé « coldform ». Ce sont des blisters composés exclusivement aluminium. Cette dernière affiche des coûts inférieurs à son concurrent plastique [62]. Il doit son nom au fait que ceux-ci sont fabriqués à froid à l'aide d'un moule de formage par pression.

En effet, les alvéoles ou sont déposés les comprimés et gélules ne nécessitent pas d'être formés à l'aide de la chaleur. Il est dans le temps plus efficace en termes de protection contre l'humidité et les gaz que les blisters plastique/aluminium. Un autre avantage considérable à ce procédé, est que ce type de blister convient aux produits thermosensibles [58].

Dans ce chapitre, nous avons choisi de travailler sur le type PVC-ALU.

### II.8.2 Polychlorure de vinyle (PVC)

Le polychlorure de vinyle, dont le symbole international PVC découle de l'appellation anglaise « Polyvinyle Chloride », est une matière thermoplastique de synthèse composée de carbone, d'hydrogène et de chlore. Le carbone et l'hydrogène proviennent du pétrole (43 %) tandis que le chlore est originaire du sel (57 %).

La production industrielle du PVC remonte au début des années 1930. C'est un plastique très présent dans notre vie quotidienne car l'ensemble de ses propriétés mécaniques et physiques et son aptitude à être modifié selon les besoins en font un matériau adapté à de multiples usages [63].

#### II.8.2.1 Préparation de PVC

Le poly chlorure de vinyle est obtenu par polymérisation du chlorure de vinyle monomère (CVM) ou monochloréthylène. La découverte de cette réaction de polymérisation a été faite par le chimiste français Regnault en 1835 [63].

La figure ci-dessous présente la réaction de polymérisation du CVM. (Figure II.6)

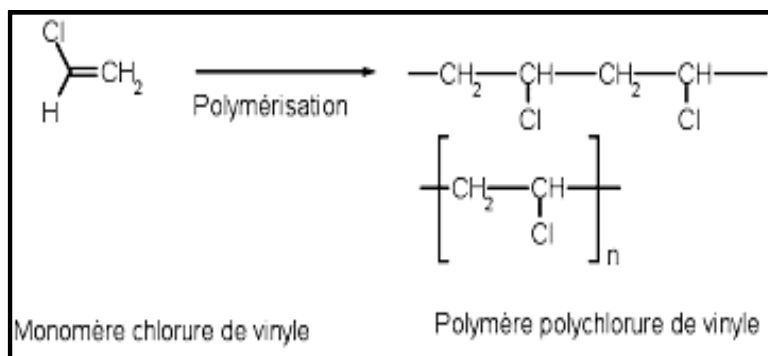


Figure II.6 Réaction de polymérisation du CVM.

Les procédés de polymérisation les plus importants sont:

➤ **Polymérisation en suspension**

Le système réactionnel (monomère + initiateur organo-soluble) est dispersé sous forme de gouttelettes dans un milieu spécifique (eau + colloïde protecteur). En fin de polymérisation, on obtient des grains de PVC (de diamètre moyen d'environ 120 à 150  $\mu\text{m}$ ) en suspension dans l'eau (slurry). Après récupération du monomère non transformé, le PVC est séparé de l'eau par essorage ou décantation, puis séché et tamisé.

➤ **Polymérisation en masse**

Ce procédé consiste à polymériser le monomère en l'absence totale d'eau et d'agent dispersant. Un initiateur organo-soluble est ajouté au chlorure de vinyle monomère. Le PVC, insoluble dans son monomère, précipite dans le milieu réactionnel au fur et à mesure de sa formation.

Après l'élimination du monomère n'ayant pas réagi, le PVC est tamisé. Il se présente sous forme de grains de 120 à 150  $\mu\text{m}$  de diamètre moyen. Les performances des résines obtenues par le procédé en masse sont en général voisines de celles des résines fabriquées par le procédé en suspension.

➤ **Polymérisation en émulsion**

La réaction a lieu en milieu aqueux où le monomère est maintenu en émulsion à l'aide d'agents tensioactifs. La polymérisation est réalisée au moyen d'un initiateur hydrosoluble et se poursuit à l'intérieur des micelles (agrégats de molécules de tensioactif en milieu alcalin). Par ce procédé, on forme une émulsion stable constituée de particules de dimensions comprises entre 0,1 et 1  $\mu\text{m}$  appelée latex. Après passage dans des sècheurs atomiseurs, on obtient des grains de PVC ayant la forme de sphères creuses (céosphères) de faible diamètre (10 à 100  $\mu\text{m}$ ) qui peuvent être classifiées et broyées [63].

### II.8.2.2 Mise en œuvre

Après polymérisation, on obtient une résine sous forme de poudre blanche et inerte qui ne peut être utilisée telle qu'elle [64]. De plus, compte tenu de la versatilité du PVC et de la multitude de ses applications, l'ajout d'adjuvants qui vont, d'une part, éviter une décomposition du polymère par déhydrochloruration, d'autre part, assurer un bon écoulement dans les appareils de transformation est indispensable [63].

Les adjuvants peuvent être très nombreux et très divers, on distingue [65]:

### a. Les stabilisants

Les principales actions des stabilisants sont les suivantes:

- Contre la chaleur : ils sont utilisés universellement en raison de la protection qu'ils assurent lors des opérations de moulage ou d'extrusion, les proportions étant croissantes en fonction des conditions d'utilisation.
- Contre le rayonnement UV : pour toutes les pièces utilisées à l'extérieur.
- Vis-à-vis des métaux lourds : pour les applications utilisées dans des circuits électriques.
- Vis-à-vis des détergents : pour les pièces au contact d'agents chimiques.

### b. Les lubrifiants

La mise en œuvre du PVC à température élevée fait intervenir des forces de frottement entre le polymère et les parois métalliques des machines de transformation et entre les grains ou les macromolécules du polymère lui-même. donc Il en existe deux grandes familles [63]:

-Externes : leur action vise à combattre les frottements sur les parois métalliques des outillages en facilitant le glissement de la matière plastique et en évitant les collages sur ceux-ci.

-Internes : leur action consiste à réduire les frottements intermoléculaires qui provoquent l'échauffement du polymère et risquent d'entraîner sa dégradation thermique.

### c. Les plastifiants

Le rôle du plastifiant est de diminuer les forces de liaisons entre les différentes chaînes moléculaires du polymère. Cela permet d'abaisser la température de transition vitreuse du PVC (78° c pour le PVC pur) et d'obtenir un comportement souple et une meilleure résistance au choc, à température ambiante [63].

### d. Charges et renforts

Une charge est une substance solide utilisée dans les matières plastiques. Elle est introduite dans celles-ci pour modifier, renforcer les propriétés physiques ou mécaniques, pour améliorer la résistance au feu, pour améliorer l'aspect de la surface ou pour diminuer le coût. Son taux d'incorporation varie de quelques % à plusieurs dizaines de % [66].

### e. Colorants et pigments

Dans un but esthétique, technique, de sécurité ou de repérage ou encore de camouflage, la coloration participe à la mise en valeur d'un objet [66].

### II.8.2.3 Propriétés de pvc

#### a. Propriétés chimiques

Le PVC non plastifié résiste bien (jusqu'à 60° C) aux acides et bases ainsi qu'aux huiles, alcools et hydrocarbures aliphatiques. Par contre, il est sensible aux hydrocarbures aromatiques et chlorés, aux esters et cétones qui occasionnent un gonflement. Le PVC souple est sensible aux agents atmosphériques et à la lumière solaire [67].

### b. Propriétés physiques

Le PVC est un polymère atactique donc essentiellement amorphe, mais il arrive que, localement, sur de courts segments de chaînes, le PVC soit syndiotactique et puisse s'organiser en phase cristalline, mais le taux de cristallinité ne dépasse jamais 10 à 15 %. La masse volumique du PVC est de  $1,38 \text{ g/cm}^3$ . Le PVC amorphe est transparent et relativement perméable à la vapeur d'eau [67].

### c. Propriétés mécaniques

Le PVC offre une excellente rigidité jusqu'au voisinage de sa température de transition vitreuse. Les PVC offrent une excellente résistance à l'abrasion. Les PVC sont fragiles aux chocs à basses températures. L'addition de plastifiants diminue la température de transition vitreuse, ce qui permet de proposer un PVC souple à température ambiante [67].

### d. Propriétés thermiques

Le PVC (amorphe) a une température de transition vitreuse comprise entre  $75$  et  $80^\circ\text{C}$ , c'est à dire qu'à température ambiante, il est rigide et qu'au-dessus de  $90^\circ\text{C}$ , il est caoutchouteux (faible résistance, grande déformation). Le PVC se décompose dans une flamme en libérant de l'acide chlorhydrique gazeux mais il est auto-extinguible [67].

### II.8.3 Feuille d'aluminium pharmaceutique

La feuille pharmaceutique (feuille d'aluminium médicinale) est une feuille mince, flexible et imperméable en aluminium ou en alliages d'aluminium spécialement conçue pour les applications d'emballage pharmaceutique. Il est disponible en différentes épaisseurs, largeurs et longueurs et peut être personnalisé pour répondre à des exigences d'emballage spécifiques (Figure II.7).



Figure II.7 Feuille d'aluminium pharmaceutique.

#### II.8.3.1 Alliages d'aluminium utilisés pour fabriquer des feuilles pharmaceutiques

La feuille pharmaceutique est un matériau nécessaire pour l'emballage des médicaments. Les alliages qui peuvent être utilisés pour fabriquer des feuilles de médecine sont [68]:

- feuille d'aluminium 1235 O.
- feuille d'aluminium 1235 H.

- feuille d'aluminium 8021 O.
- feuille d'aluminium 8079 O .

### II.8.3.2 Propriétés de la feuille pharmaceutique

La feuille pharmaceutique possède plusieurs propriétés uniques qui en font un choix idéal pour l'emballage de produits pharmaceutiques. Certaines de ces propriétés comprennent [68] :

#### a. Imperméabilité

La feuille pharmaceutique est imperméable à la lumière, à l'air, à l'humidité et à d'autres facteurs externes qui peuvent compromettre la qualité et la sécurité du médicament. Cela permet de prolonger la durée de conservation du produit et de le protéger de la dégradation.

#### b. Propriétés de la barrière

La feuille offre une excellente barrière contre les gaz, la vapeur et les rayons UV. Ceci est particulièrement important pour les médicaments sensibles à la lumière et à la chaleur.

#### c. Formabilité

La feuille pharmaceutique est hautement formable, ce qui lui permet d'être facilement façonnée, pliée et découpée dans une variété de configurations d'emballage.

#### d. Compatibilité

La feuille est compatible avec une large gamme de médicaments et peut être utilisée pour les produits stériles et non stériles. Il convient également aux processus de formage à froid et de thermoformage.

### II.8.3.3 Film pharmaceutique est-il recyclable ?

Bien que la feuille soit techniquement recyclable, elle n'est pas largement acceptée par les programmes de recyclage en raison de sa finesse et de sa composition mixte avec d'autres matériaux [68].

## II.9 Résultats de traitement d'un sol avec un déchet industriel

### II.9.1 Déchet plastique

Neopaney et al. (2012) ont stabilisé un sol argileux par des bandes de plastique coupées en différents formats ayant une longueur de (10, 20, 30 et 40 mm), avec une largeur constante de 10 mm et une épaisseur de 40 $\mu$ m. Différents pourcentages ont été utilisés à savoir 0,0 ; 0,25 ; 0,5 et 1,0%. Les résultats des tests CBR ont démontré que l'introduction des déchets plastiques dans les sols argileux avec des quantités appropriées amélioreraient considérablement la résistance à la compression et le comportement vis-à-vis la déformation des sols traités. Ils ont indiqué que l'amélioration maximale du CBR est obtenue en utilisant 0,5 % de l'ajout ayant une taille de (10 mm x 30 mm), ce qui correspond à (AR = 3). Tandis que la valeur la plus faible enregistrée est celle de l'échantillon sans bande (Figure II.8 ,9).

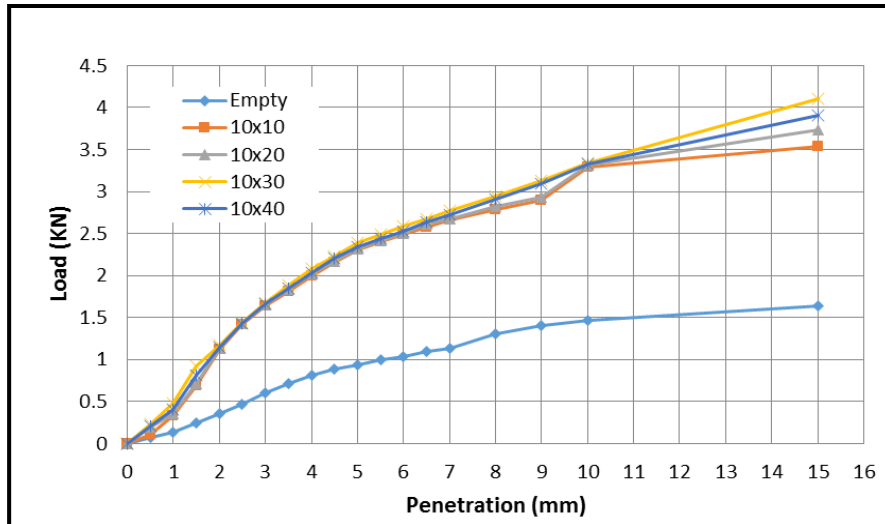


Figure II.8 Résultat d'essai de CBR en utilisant 0.5% de couches dorsales avec différentes tailles de bandes[69].

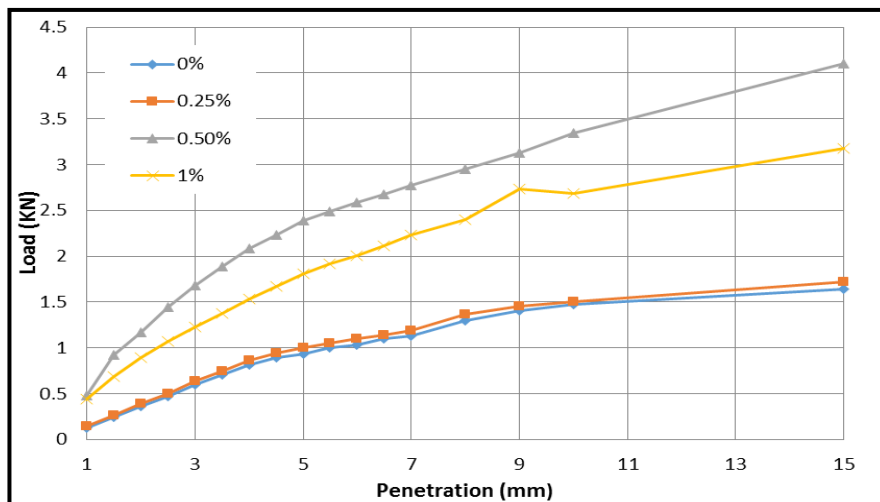
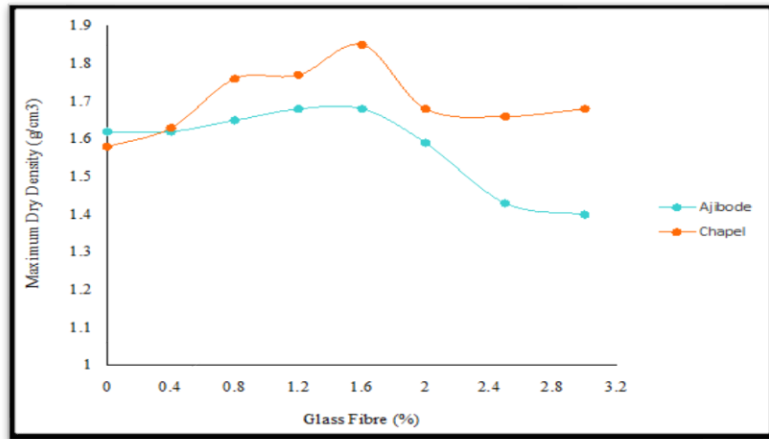


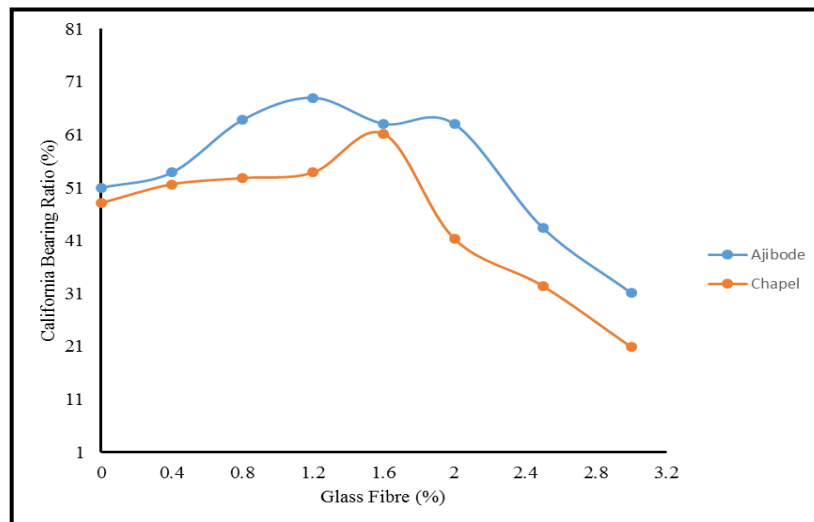
Figure II.9 Résultats d'essai de CBR avec des bandes de 10 et 30 mm avec différentes proportions [69].

### II.9.2 Fibres de verre

Ayininuola et Balogun (2018) ont stabilisé un sol argileux de deux régions (Ajipode et chaple, Nigéria) par des fibres de verre en utilisant des pourcentages allant entre 0,4% à 3% avec un incrément 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. La valeur de 1,6 % représente le seuil de saturation pour ce type d'ajout. (Figure II.10 ,11)



**Figure II.10** Densité sèche maximale des sols stabilisés à différents pourcentages de fibres de verre. [70]



**Figure II.11** Résultats d'essai de CBR à différents pourcentages de fibres de verre [70].

### II.9.3 Granulats de caoutchouc

Yamon (2021), a étudié le comportement mécanique d'un sol argileux avec l'ajout des granulats de caoutchouc en différentes proportions sont (0%, 2%, 4%, 6%).

L'ajout de caoutchouc a donné des résultats très intéressants en termes de compression et de cisaillement direct au niveau du caisson. En effet, avec l'augmentation du pourcentage d'ajout on constate une amélioration du sol.

Les essais de cisaillement ont montré une augmentation de l'angle de frottement interne et une diminution de la cohésion après chaque augmentation du pourcentage d'ajout, ce qui a permis le passage d'un état cohérent vers un état granulaire, et par la suite une augmentation de la résistance. Le meilleur résultat a été obtenu à 6% d'ajout de granulats de caoutchouc avec un une cohésion de 26bars et un angle de frottement interne de 59.39° (Tableau II.1, 2) [37].

**Tableau II.1** La variation de l'angle de frottement interne en fonction du pourcentage de caoutchouc.

Le pourcentage de caoutchouc (%)	L'angle de frottement interne ( $\phi$ )
0	27.47°
2	49.48°
4	54.65°
6	59.39°

**Tableau II.2** La variation de la cohésion en fonction du pourcentage de caoutchouc.

Le pourcentage de caoutchouc (%)	La cohésion (C) (Bar)
0	45
2	40
4	36
6	26

### II.10 Conclusion

Le traitement des sols argileux a été étudiés par un grand nombre des chercheurs et beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour connaître l'efficacité et l'effet d'une solution, d'un produit ou d'un matériau sur la stabilisation d'un sol argileux. Le choix des techniques de traitement les plus couramment utilisées dépend de plusieurs critères :les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée du processus, la disponibilité des matériaux à utiliser et les conditions environnementales. Grâce à ces études et recherches dans le domaine géotechnique, il a été prouvé que l'utilisation des déchets améliore les propriétés mécaniques des sols argileux surtout l'effet des déchets industriels (plastique ; fibre de verre ; aluminium ...etc.). Notre travail a donc consisté à utiliser des déchets industriels non recyclables en Algérie sont les emballages pharmaceutiques vides (EPV) et étudier leur effet sur les propriétés mécaniques des sols argileux.

**Chapitre III**  
**Matériaux et procédés  
expérimentales**

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons en premier lieu l'identification des matériaux utilisés dans notre étude (le déchet d'emballage pharmaceutique « EPV » et le sol étudié). Ensuite, nous avons consacré une partie pour présenter l'ensemble des résultats des essais géotechniques normalisés effectués sur un sol argileux prélevé de la région d'OUM ETOUB wilaya de SKIKDA tels que: l'analyse granulométrique , les limites d'Atterberg, essai de CBR, Proctor, cisaillement...etc. Le travail expérimental a été réalisé au Laboratoire des travaux publics de l'Est (LTPE ) wilaya de Skikda et d'Annaba.

### III.2 Matériaux utilisés

#### III.2.1 Le déchet industriel utilisé

Dans cette étude nous avons préféré d'utiliser un type de déchets industriels non recyclable en Algérie, donc nous avons choisi le déchet d'emballage pharmaceutique vide (EPV) découpé en 1cm et 0.5cm de longueur et d'une largeur constante 0.2cm avec des différents pourcentages. Nous avons obtenu ce déchet auprès l'entreprise de BIOGALENIC située à Constantine (11A, Zone industrielle 24 février 1956 Ex PALMA, Constantine) (Figure III.1) .



Figure III.1 Déchet d'emballage pharmaceutique vide EPV.

Comme nous avons mentionné dans le chapitre précédent, notre ajout d'EPV se compose d'une base de plastique recouvert d'un fin film d'aluminium (PVC-ALU). Les tableaux III.1 et III.2 montrent les fiches techniques de PVC et d'ALU.

Tableau III.1 Fiche technique de PVC.

Caractéristiques de base	Fiche technique
Produit utilisé	PVC 150
Fournisseur	Liveo Research
N° de lot interne	ACSP000004/058
Quantité reçue	9839.1
Date de réception	17/11/2022
Densité	1.38

**Tableau III.2** Fiche technique d'ALU.

Caractéristiques de base	Fiche technique
Produit utilisée	ALU neutre 128
Fournisseur	Shanghai Haishun pharmaceutical
N° de lot fournisseur	C2023061099
Quantité reçue	3109.78
Date de réception	18/10/2023
Densité	2.7

### III.2.2 Sol étudié

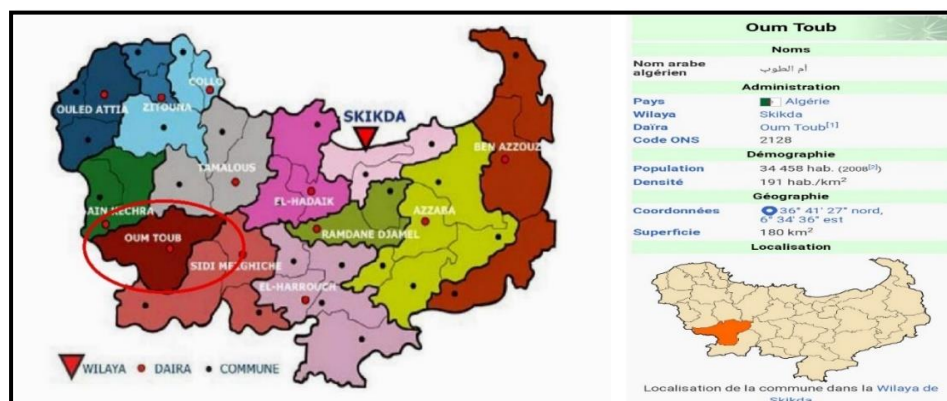
Pour mener cette étude on a utilisé un sol extrait de la commune d'OUM ETOUB wilaya de Skikda, en deux profondeurs d'environ 02.00 à 05.00 m et 05.00 à 10.00 m. Après l'extraction, le sol a été déplacé au laboratoire dans des sacs en plastique et conservé aux conditions de laboratoire afin d'exécuter les essais géotechniques d'identification et de caractérisation (Figure III.2).



**Figure III.2** Sol conservé dans un sac en plastique.

#### III.2.2.1 Localisation géographique de la zone étudiée

OUM ETOUB est une commune algérienne de la wilaya de Skikda, située à 30 Km à l'ouest de Skikda, à 40 Km de Constantine, à 100 Km de Guelma et à 110 Km d'Annaba (Figure II.3).



**Figure III.3** Carte géographique de la zone d'étude OUM ETOUB.

### III.3 Echantillonnage

Le prélèvement d'échantillon de sol est l'opération qui consiste à prélever une petite quantité de sol extrait du terrain, afin d'analyser au laboratoire. La qualité des échantillons conditionne la précision et la fiabilité des résultats des essais. Généralement on a deux types d'échantillons :

- échantillon intact (structure et teneur en eau conservé).
- échantillon remanié (Échantillon de sol dont la composition ou la structure spatiale a été modifiée par la technique de prélèvement).

#### III.3.1 Méthodes d'échantillonnage pour les sols cohérents (fins)

- **Sondage carotté** : est une technique d'investigation du sol qui permet de prélever des échantillons cylindriques intacts à différentes profondeurs appelées les carottes (Figure III.4).
- **Sondage à la tarière** : est une technique de prélèvement des échantillons remaniés, utilisé pour les sols cohérents non compacts réalisé à l'aide d'une tarière qui est un outil hélicoïdal en acier (Figure III.5).



Figure III.4 Carotte d'échantillons.



Figure III.5 Tarière motorisé.

### III.4 Préparation de l'échantillon

Avant d'établir les essais en laboratoire, les échantillons sont séchés dans une étuve à la température de 150°C puis concassé (à l'aide de l'appareil LOS ANGELES) et tamisé dans le tamis n°5 (Figure III.6) .



Figure III.6 Préparation de l'échantillon.

### III.5 Essais d'identification de sol

C'est l'ensemble des essais mécaniques et physiques qui permet de classer et caractériser le sol et de calculer les différents paramètres physiques et mécaniques.

#### III.5.1 Teneur en eau (NF P 94-050)

L'essai de la teneur en eau est un élément crucial pour la caractérisation des sols. Il est également connu sous le nom de test d'humidité du sol.

Cet essai définit comme une procédure fondamentale dans le domaine de la mécanique des sols et de la géotechnique. Il permet de déterminer la quantité d'eau présente dans un échantillon de sol, exprimée en pourcentage de sa masse sèche.

##### III.5.1.1 Objectif d'essai

Déterminer la quantité d'eau contenue dans un échantillon de sol par rapport à sa masse sèche. La connaissance de la teneur en eau permet de classer le sol selon sa texture (sableux, argileux) et son état (sec, humide, et saturé).

##### III.5.1.2 Principe d'essai

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

La teneur en eau  $\omega$  sera égale à :

$$\omega = \frac{M_W}{M_S} \times 100 \%$$

Avec :

$M_W$  : Masse d'eau évaporée.

$M_S$  : Masse du matériau sec.

##### III.5.1.3 Expression des résultats

La teneur en eau est déterminée par la formule suivante :

$$\omega = \frac{(m_2 - m_1) - (m_3 - m_1)}{(m_3 - m_1)} \times 100$$

Avec :

$\omega$  : Teneur en eau (exprimée en %).

$m_1$  : Masse de la tare.

$m_2$  : Masse de l'échantillon humide, y compris la tare.

$m_3$  : Masse de l'échantillon sec, y compris la tare.

Tableau III.3 Résultats de la masse volumique et la teneur en eau.

Profondeur (m)	Densité sèche $\gamma_d$ max ( $g/cm^3$ )	Densité humide $\gamma_h$ ( $g/cm^3$ )	Teneur en eau $\omega$ (%)	Degré de saturation $S_r$ (%)
(02.00-05.00)	1.73	2.04	17.77	88.53
(05.00-10.00)	1.85	2.10	13.55	83.01

### III.5.2 Analyse granulométrique des sols (NF P 94-056)

L'analyse granulométrique des sols est un essai d'identification qui permet de déterminer la distribution des particules du sol en fonction de leur taille. Cette information est essentielle pour caractériser le sol et pour évaluer son comportement.

#### III.5.2.1 Objectif d'essai

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0.063 et 125 mm.

On appelle :

- Refus** : Quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.
- Tamisât** : (Ou passant) c'est la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

#### III.5.2.2 Principe d'essai

L'analyse granulométrique est réalisée par tamisage. Un échantillon de sol secoué à travers une série de tamis de dimensions décroissantes. Les particules de sol qui passent à travers un tamis sont retenues par le tamis suivant. La masse des particules retenues sur chaque tamis est mesurée et rapportée à la masse totale de l'échantillon.

#### III.5.2.3 Traitement des résultats

- Calculer le pourcentage de la masse total de l'échantillon retenu sur chaque tamis.
- Tracer la courbe granulométrique sur un papier semi-logarithmique.
- En abscisses, reporter les ouvertures des tamis.
- En ordonné, reporter les pourcentages cumulés de la masse retenue. (Figure III.7 , 8)

### III.5.3 Analyse sédimentométrique (NF P 94-057)

Est un essai complémentaire à l'essai de l'analyse granulométrique par tamisage pour la détermination de la taille des particules du sol. Elle permet d'analyser les éléments les plus fins inférieures à 80  $\mu m$  qui ne peuvent pas être efficacement séparés par tamisage.

#### III.5.3.1 Principe d'essai

L'analyse sédimentométrique repose sur la loi de Stocke, qui décrit la vitesse de sédimentation des particules sphériques dans un liquide en fonction de leurs diamètres, leurs densités, et la viscosité du liquide.

L'échantillon de sol est mis en suspension dans une solution et laissé au repos. Les particules les plus grosses sédimentant plus rapidement que les particules fines. En mesurant la densité de la suspension à différents moments et à différentes hauteurs, on peut calculer la distribution granulométrique des particules fines du sol.

Cette loi s'exprime par :

$$V = D^2 (\gamma_s - \gamma_\omega) / 18\eta$$



### III.5.4 Limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Les limites d'Atterberg sont des essais qui permettent de définir des indicateurs qualifiants la plasticité d'un sol, et plus précisément de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'actions des variations de teneur en eau. Notons que cet essai se fait uniquement sur les éléments fins du sol (la partie du sol qui passe au travers d'un tamis de 0.42 mm) et il consiste à faire une classification du sol (Figure III.9) [71].

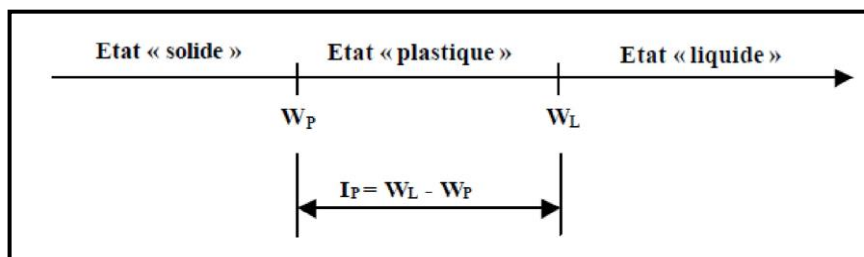


Figure III.9 Représentation des limites d'Atterberg.

$W_L$  : Limite de liquidité qui sépare les états liquides et plastiques.

$W_P$  : Limite de plasticité qui sépare l'état plastique et semi-solide.

$I_P$  : indice de plasticité  $I_P = W_L - W_P$

$I_C$  : indice de consistance  $I_C = \frac{W_L - \omega}{I_P}$  avec ( $\omega$ : La teneur en eau pondérale).

#### III.5.4.1 Principe d'essai

L'essai des limites d'Atterberg, également connu sous le nom d'essai de plasticité, est une procédure standardisée en géotechnique pour caractériser la plasticité d'un sol. Il permet de déterminer deux limites importantes :

- **Limite de liquidité ( $W_L$ ):** C'est la teneur en eau minimale à laquelle un sol peut s'écouler sous son propre poids, en se comportant comme un liquide visqueux. En d'autres termes, c'est la limite à partir de laquelle le sol passe de l'état solide à l'état plastique.
- **Limite de plasticité ( $W_P$ ):** C'est la teneur en eau minimale à laquelle un sol peut être roulé en un boudin de 3 mm de diamètre sans se fissurer. En d'autres termes, c'est la limite à partir de laquelle le sol passe de l'état plastique à l'état solide.

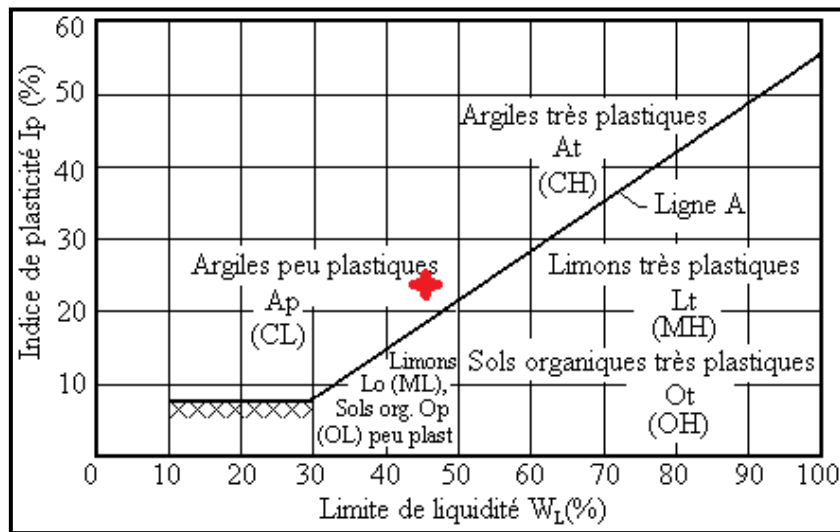
#### III.5.4.2 Expression des résultats

Tableau III.5 Résultats des limites d'Atterberg.

Profondeur (m)	Teneur en eau $\omega$ (%)	Limite de liquidité $W_L$ (%)	Limite de plasticité $W_P$ (%)	Indice de plasticité $I_P$ (%)	Indice de consistance $I_C$	Observation
(02.00-05.00)	17.77	46	23	23	1.22	Argile peu plastique
(05.00-10.00)	13.55	29	14	15	1.02	Argile peu plastique

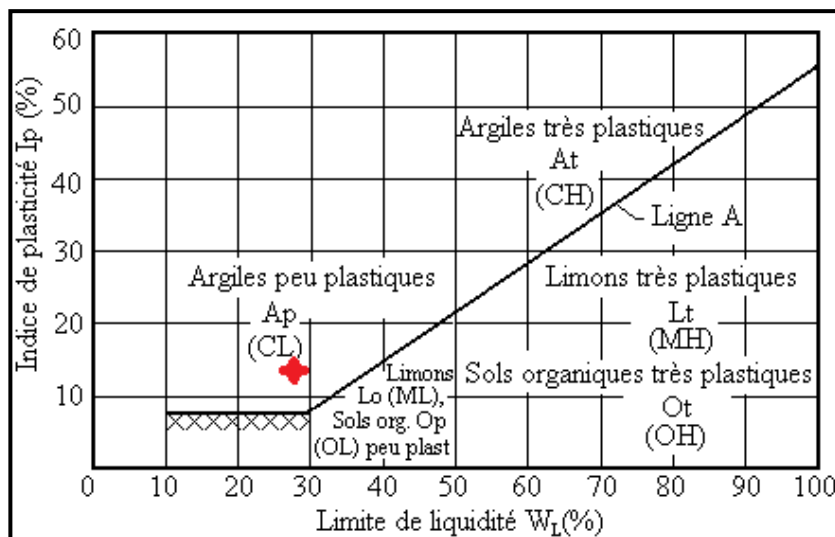
D'après les résultats des limites d'Atterberg obtenus (Tableau III.5) et les abaques de Casagrande (Figure III.10 ,11), le sol étudié est classé comme argile peu plastique.

• **Profondeur 1 (02.00-05.00)**



**Figure III.10** Abaque de Casagrande (profondeur 1).

• **Profondeur 2 (05.00-10.00)**



**Figure III.11** Abaque de Casagrande (profondeur 2).

**III.5.5 Essai Proctor (NF P94-093)**

C'est l'essai qui définit une méthode pour déterminer la teneur en eau optimale  $\omega_{opt}$  et la densité sèche  $\gamma_d$  maximale d'un sol pour obtenir son compactage maximal. Pour l'essai Proctor normal, le remplissage se fait en 03 couches (Figure III.12).

**III.5.5.1 Principe d'essai**

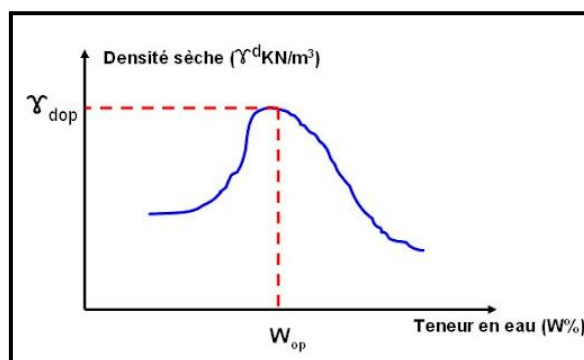
L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, selon un processus bien défini, l'échantillon de sol à étudier et à mesurer sa teneur en eau et son poids spécifique sec après compactage.

L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau croissantes (4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%). On définit ainsi plusieurs points d'une

courbe ( $\gamma_d ; \omega$ ) ; on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale et l'ordonnée est la densité sèche maximale (Figure III.13).



**Figure III.12** Essai Proctor.



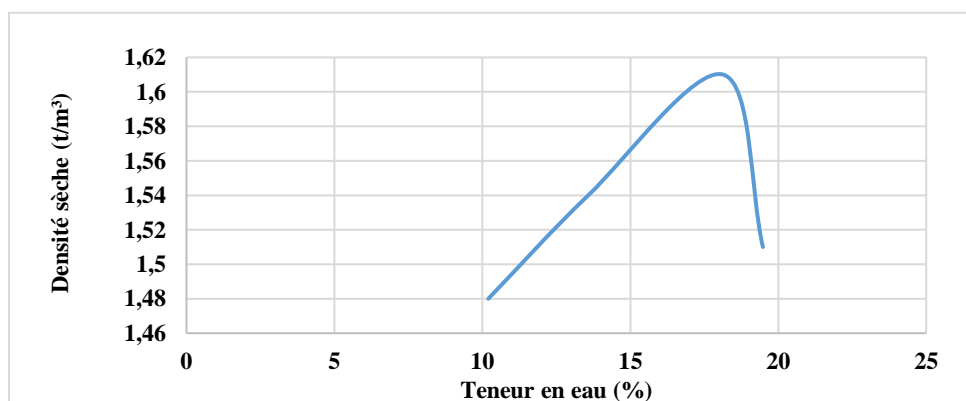
**Figure III.13** Courbe de Proctor.

**Note :** il n'est pas autorisé de réutiliser le même matériau pour la détermination de plusieurs points de la courbe Proctor.

### III.5.5.2 Expression des résultats

**Tableau III.6** Les valeurs de compactage du sol fin.

<b>Teneur en eau <math>\omega</math> (%)</b>	10.20	13.58	18.14	19.48
<b>Densité sèche <math>\gamma_d</math> (t/m<sup>3</sup>)</b>	1.48	1.54	1.61	1.44



**Figure III.14** Courbe de compactage.

On constate que la densité sèche maximale de sol étudié  $\gamma_{d \max}$  est  $1.61 \text{ (t/m}^3\text{)}$  et la teneur en eau optimale est  $18.14 \%$  (Tableau III.6 et figure III.14).

### III.5.6 Essai de CBR (California Bearing Ratio test) (NF P94-078)

L'essai CBR est un essai de portance (aptitude des matériaux à supporter les charges) des remblais et des couches de formes compactées des ouvrages routiers (Figure III.15 ,16) (Tableau III.7).

Il s'agit de déterminer expérimentalement des indices portants (IPI, CBR) qui permettent :

- d'établir une classification des sols (GTR).
- d'évaluer la traficabilité des engins de terrassement (IPI).
- déterminer l'épaisseur des chaussées (CBR augmente épaisseur diminue).

#### III.5.6.1 Principe d'essai

La charge apportée par le pneu sur la chaussée poinçonne le sol de fondation. Ce poinçonnement est d'autant plus petit que l'épaisseur de la chaussée est grande.

On peut reproduire ce phénomène en compactant le matériau dans les conditions de l'essai Proctor dans un moule CBR puis en mesurant les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de ce matériau.

On lui applique les conditions hydriques prévues pendant la vie de l'ouvrage:

- Immersion pendant 4 jours dans de l'eau.
- Pas d'immersion : essai immédiat.

On applique ensuite une charge voisine de ce que sera la charge de service et on poinçonne le matériau dans des conditions déterminées (vitesse constante et déterminée) tout en mesurant les efforts et les déplacements (pénétrations) en résultant : On obtient la courbe d'essai.

On mesure 3 types d'indices en fonction des buts fixés:

- ❖ **L'indice portant immédiat (IPI) :** Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins de chantier directement sur sa surface lors des travaux (pas de surcharges).
- ❖ **L'indice C.B.R. immédiat :** Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau.
- ❖ **L'indice C.B.R. après immersion :** Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau et soumis à des variations de régime hydrique. [71]



Figure III.15 Essai de CBR.

### III.5.6.2. Expression des résultats

Tableau III.7 Résultats de mesures.

<b>Temps (min)</b>	1.00	1.5	2	4	6	8
<b>Enfoncement (mm)</b>	1.25	2.00	2.50	5.00	7.50	10.00
<b>Force totale (KN)</b>	0.061	0.071	0.076	0.102	0.122	0.148

L'indice recherché est par convention la plus grande de ces deux valeurs :

$$\text{CBR} = \frac{\text{L'effort de pénétration à 2.5 d'enfoncement (en KN)}}{13.35} \times 100 = \frac{0.076}{13.35} \times 100 = 0.57$$

$$\text{CBR} = \frac{\text{L'effort de pénétration à 5.00 d'enfoncement (en KN)}}{19.93} \times 100 = \frac{0.102}{19.93} \times 100 = 0.51$$

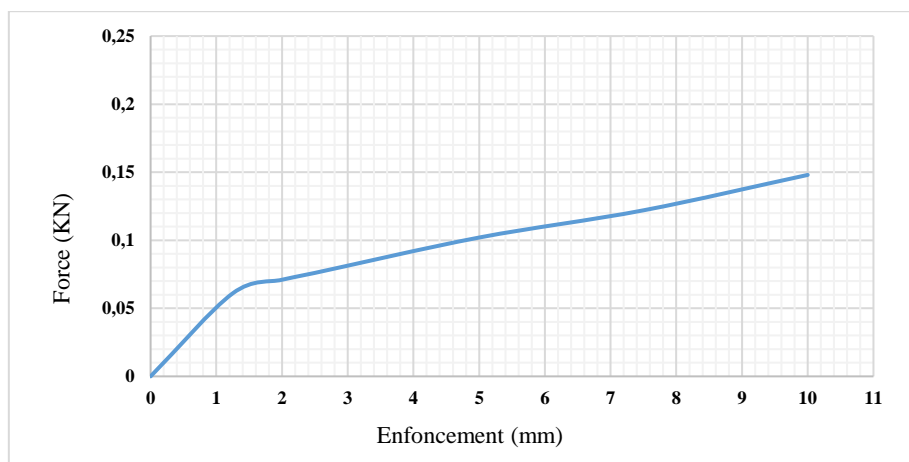


Figure III.16 Courbe de CBR.

La figure III.16 représente l'évolution de l'enfoncement du piston dans le sol avec l'augmentation de la pression appliquée. Cette courbe donne une valeur de l'indice CBR de 0.57 pour le sol non traité et ainsi un gonflement de 4.08%.

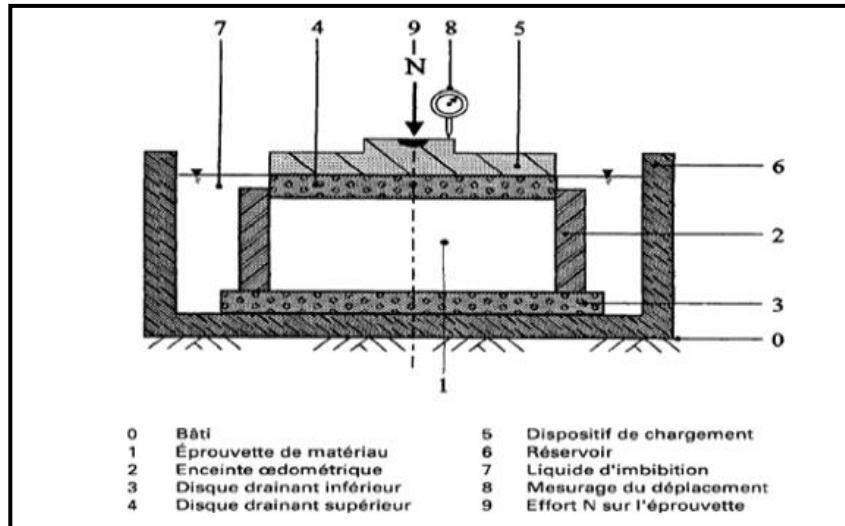
### III.5.7 Essai Œdométrique (XP P 94-090-1)

L'essai œdométrique a pour objet essentiel d'étudier la consolidation d'échantillons de sols intacts ou remaniés soumis à des charges verticales. L'œdomètre permet de suivre la consolidation du sol au cours du temps et de déterminer les relations entre les charges et les déformations obtenues.

#### III.5.7.1 Principe d'essai

L'essai s'effectue sur une éprouvette de matériau placée dans une enceinte cylindrique rigide (œdomètre) (Figure III.17, 18). Un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial vertical, l'éprouvette étant drainée en haut et en bas et maintenue saturée pendant l'essai.

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



**Figure III.17** Cellule œdométrique.



**Figure III.18** Appareillage Œdométrique.

**Tableau III.8** Classification des résultats suivant le coefficient de gonflement  $C_g$ .

Coefficient de gonflement $C_g$	Classification
$C_g > 0.05$	Sol gonflent
$C_g < 0.05$	Sol peu gonflent

**Tableau III.9** Classification des résultats suivant le coefficient de compression  $C_c$ .

Coefficient de compression $C_c$	Classification
$C_c < 0.02$	Sol incompressible
$0.02 < C_c < 0.05$	Sol très peu compressible
$0.05 < C_c < 0.1$	Sol peu compressible
$0.1 < C_c < 0.2$	Sol moyennement compressible
$0.2 < C_c < 0.3$	Sol assez fortement compressible
$0.3 < C_c < 0.5$	Sol très compressible
$0.5 < C_c$	Sol extrêmement compressible

### III.5.7.2 Expression des résultats

La figure III.19 et le tableau III.3 montrent la variation de l'indice des vides en fonction de la contrainte verticale appliquée pour le sol d'OUM ETOUB. La valeur moyenne de l'indice de gonflement est de 3.20% et l'indice de compression correspondant à 16.60% ce qui traduit que le sol étudié est un sol moyennement compressible et peu gonflant (Tableau III.8 ,9).

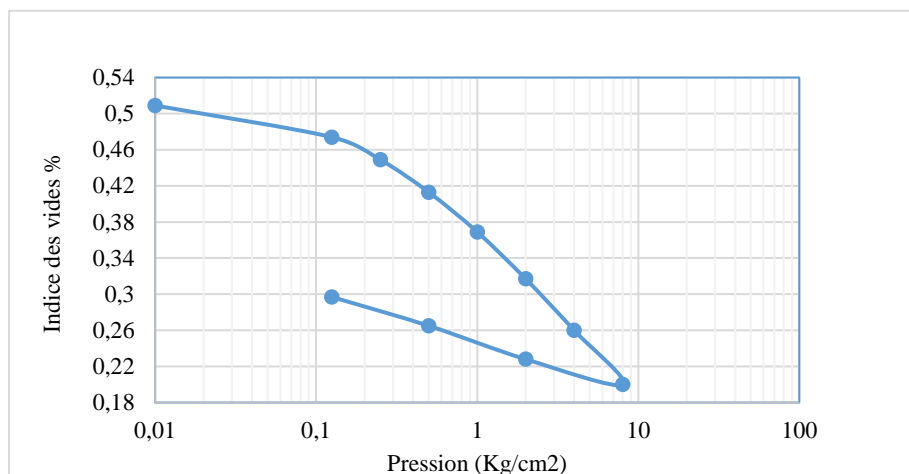


Figure III.19 Courbe œdométrique du sol étudié.

Tableau III.10 Résultats d'essai œdométrique de sol.

Les paramètres œdométriques	Coefficient de gonflement $C_g$ (%)	Coefficient de compression $C_c$ (%)	Pression $P_c$ (kPa)
Résultats	03.20	16.60	21.50

### III.5.8 Essai de cisaillement rectiligne à la boîte (NF P 94-071)

L'essai de cisaillement rectiligne à la boîte, normalisé par la norme NF P 94-071, est une méthode expérimentale utilisée pour déterminer les paramètres de résistance au cisaillement des sols. Il s'agit d'un essai de laboratoire courant en géotechnique et en mécanique des sols, utilisé pour caractériser le comportement des sols sous des charges appliquées.

#### III.5.8.1.Principe d'essai

L'essai consiste à placer une éprouvette cylindrique de sol dans une boîte de cisaillement. L'éprouvette est soumise à une contrainte normale verticale constante, puis à un cisaillement horizontal progressif jusqu'à sa rupture. La résistance au cisaillement du sol est mesurée par la contrainte de cisaillement maximale que l'éprouvette peut supporter avant de rompre. (Figure III.20 ,21)

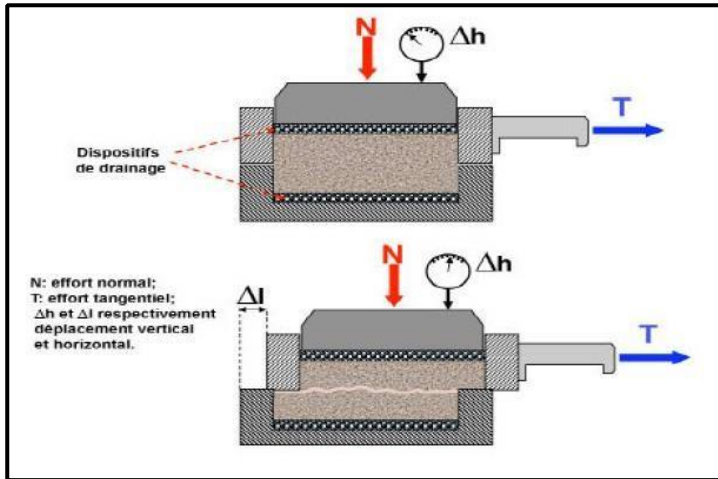


Figure III.20 Principe d'essai de cisaillement rectiligne.



Figure III.21 Echantillon de cisaillement.

### III.5.8.2 Expression des résultats

Afin de déterminer les paramètres de résistance au cisaillement de l'argile d'OUM ETOUB une campagne d'essais de cisaillement direct a été conduite.

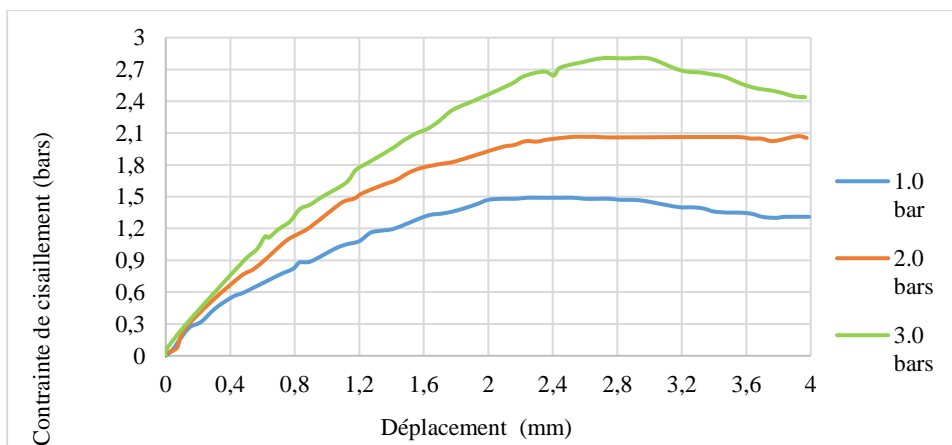


Figure III.22 Courbe contrainte de cisaillement- déformation de sol naturel.

La figure III.22 présente la variation de la contrainte de cisaillement  $\tau$  en fonction de la déformation pour trois contraintes normales: 01, 02 et 03 bar.

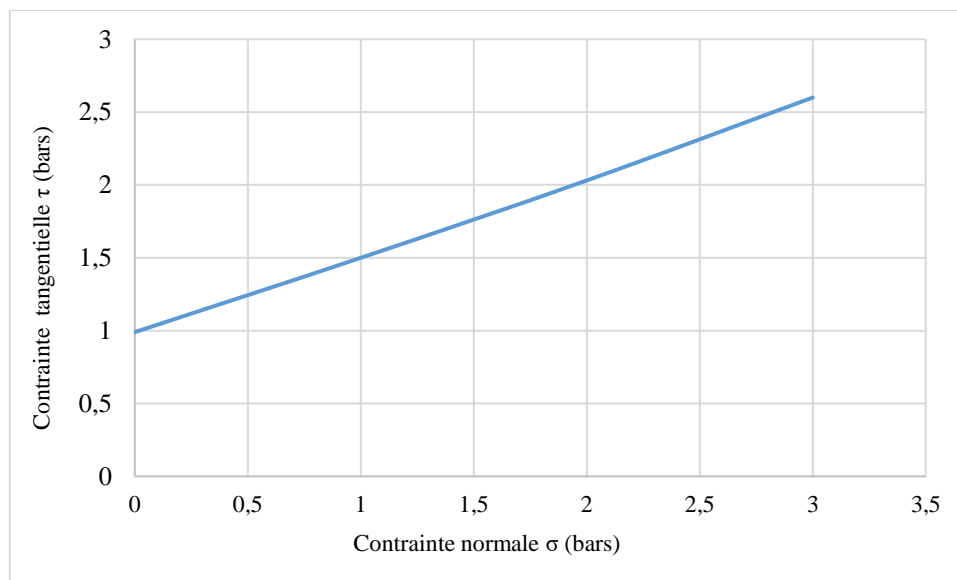


Figure III.23 Courbe intrinsèque du sol étudié.

Le diagramme de Mohr Coulomb indique que le sol a une cohésion de 99.90 kPa et un angle de frottement interne de  $27^\circ$  (Figure III.23).

### III.6 Conclusion

Les tests géotechniques de laboratoire sont très importants pour connaître les caractéristiques du sol, ce qui nous permet de connaître le sol et sa qualité à travers des tests d'identification. Dans ce chapitre, nous avons présenté les matériaux utilisés dans notre étude, en commençant par les déchets d'emballages pharmaceutiques vides, composés de PVC et d'ALU. Nous avons ensuite déterminé les propriétés physiques et mécaniques du sol étudié en réalisant un ensemble d'essais au laboratoire telles que l'essai de limites d'Atterberg, CBR, Proctor, ...etc. D'après les résultats des analyses granulométriques, le sol d'OUM ETOUB est constitué de 48% d'éléments inférieurs à  $80 \mu\text{m}$  les essais de limites d'Atterberg, CBR et l'essai œdométrique ont classé le sol étudié comme un sol peu plastique, moyennement compressible et peu gonflant avec un indice de gonflement de 0.57 et un gonflement de 4.08%. Ainsi que l'essai de cisaillement qui montre que l'angle de frottement interne du sol étudié est égale à  $27^\circ$  et une cohésion de 99.90 kPa

**Chapitre IV**  
**Résultats et interprétations**

### IV.1 Introduction

Cette partie est consacrée à l'étude de traitement du sol d'OUM ETOUB (la région de SKIKDA) par ajout d'additif : l'emballage pharmaceutique vide non recyclable en laboratoire des travaux public de l'est de Skikda et Annaba (L.T.P.E). L'additif est ajouté au sol avec différents pourcentage (0.3%, 0.5%,1%) et différent longueur (0.5, 1cm). L'objectif de ce chapitre est donc d'interpréter et de discuter les résultats expérimentaux, et de découvrir l'effet des déchets industriels (EPV) sur le comportement mécanique du sol traité.

### IV.2 Préparation des mélanges

La préparation des mélanges est faite selon la norme française.

La méthode que l'on utilise pour la préparation des mélanges est simple et nécessite des moyens de laboratoire :

- Des bacs
- Des petites pelles
- Une étuve
- Balance électrique
- Des tamis

On prend chaque fois une quantité d'argile tamisées à tamis N° : 5, puis on ajoute des quantités des emballages pharmaceutiques vides (EPV) suivant des pourcentages (0.3 ; 0.5 ; 1%).et avec un changement de longueur (0.5 ; 1cm) à chaque pourcentage.

Le mélange est mis dans un bac ; le malaxage du mélange (argile + eau + EPV) se fait à sec à l'aide des pelles jusqu' à l'homogénéisation, cette opération dure environ 5 à 10 min (Figure IV.1) [72].

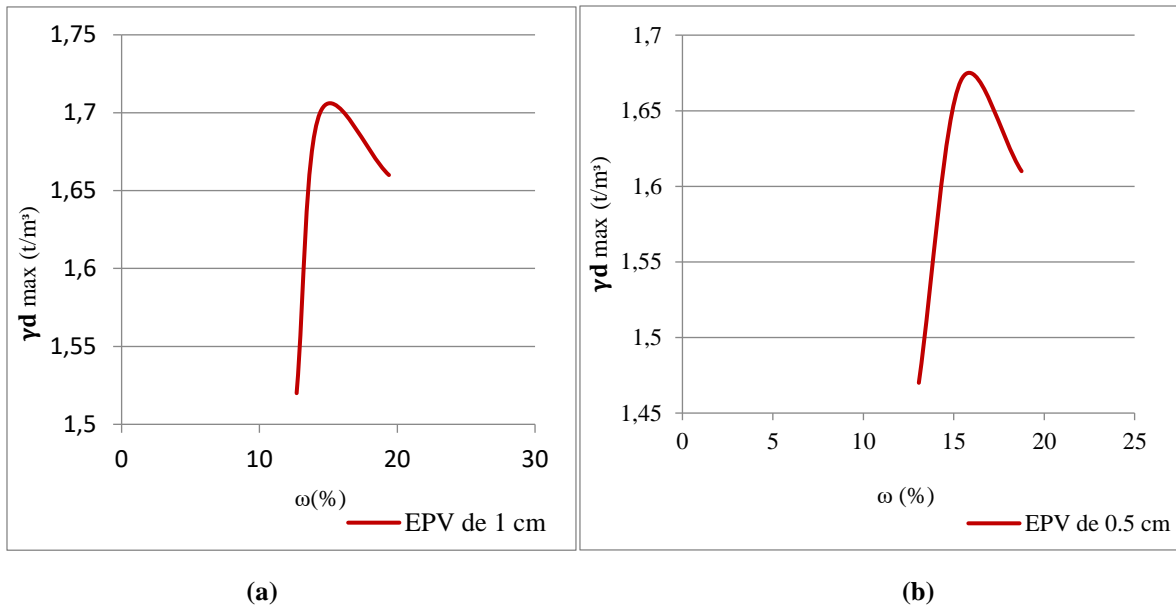


Figure IV.1 Préparation des mélanges au laboratoire.

### IV.3 Essai Proctor

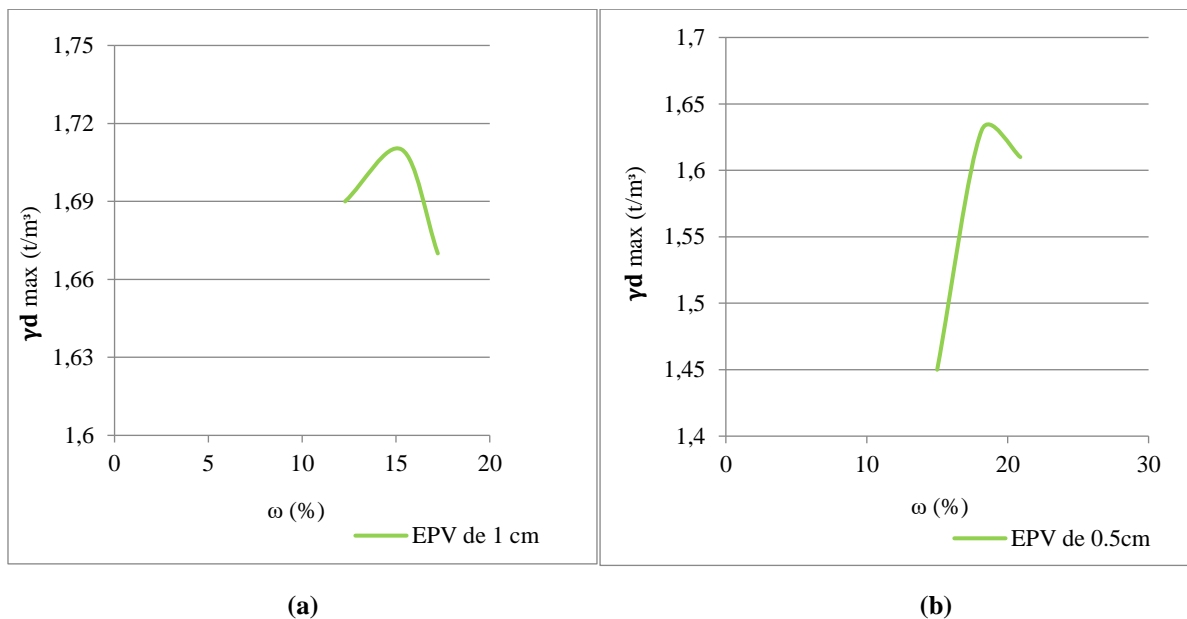
Pour aboutir à notre objectif fixé dans cette étude, c'est à dire le traitement de notre sol d'étude par des emballages pharmaceutiques vides (EPV), une série de 22 essais de compactage «Proctor normal » ont été effectuées, il faut tout d'abord choisir les facteurs. Dans notre étude, nous considérons 2 facteurs.

Ces facteurs sont: le pourcentage des emballages pharmaceutiques vides (%), la longueur de ces emballages pharmaceutiques vides (L) (Figure IV.2)



**Figure IV.2** Essai Proctor (argile +0.3% d'EPV) pour différentes longueurs: a) EPV de 1 cm; b) EPV de 0.5 cm.

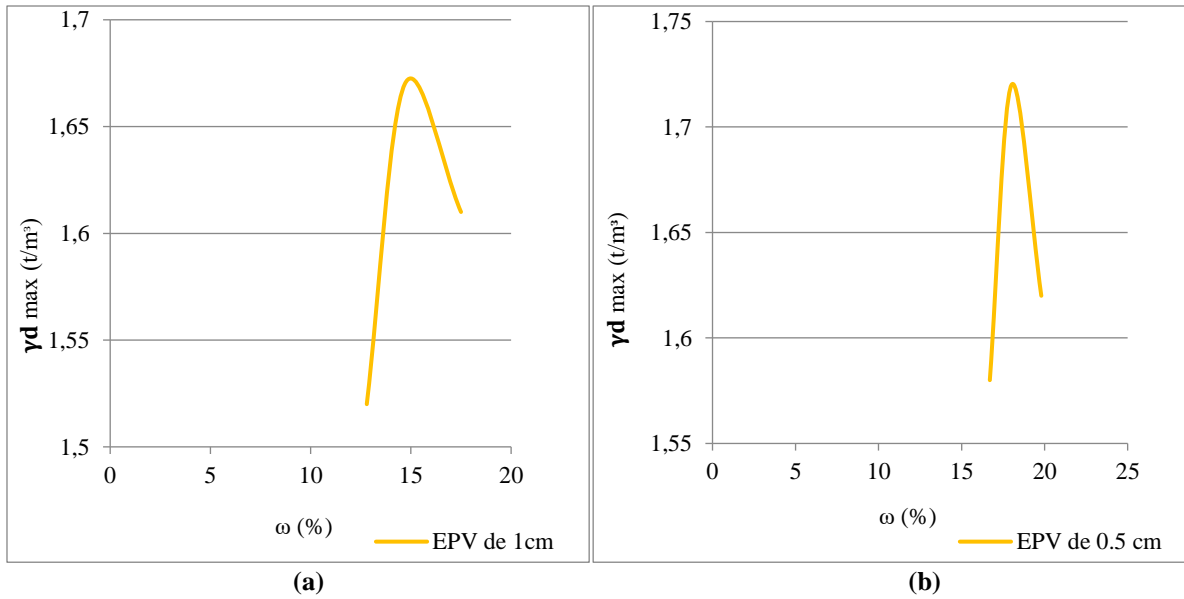
D'après la figure IV.2 on remarque une augmentation de la densité sèche maximale de l'ajout de 0.3% d'EPV, la valeur maximale est  $1.70 \text{ t/m}^3$  dans le cas d'ajout d'EPV de 1 cm.



**Figure IV.3** Essai Proctor (argile +0.5% d'EPV) pour différentes longueurs: a) EPV de 1 cm; b) EPV de 0.5 cm.

La figure IV.3 montre qu'il y a :

- Une valeur maximale  $1.71 \text{ t/m}^3$  de la densité sèche quand l'ajout d'un pourcentage de 0.5% d'EPV de 1 cm par rapport à l'ajout d'EPV de 0.5 cm.
- Une valeur de la teneur en eau maximale 18.15% de l'ajout d'EPV de 0.5cm.

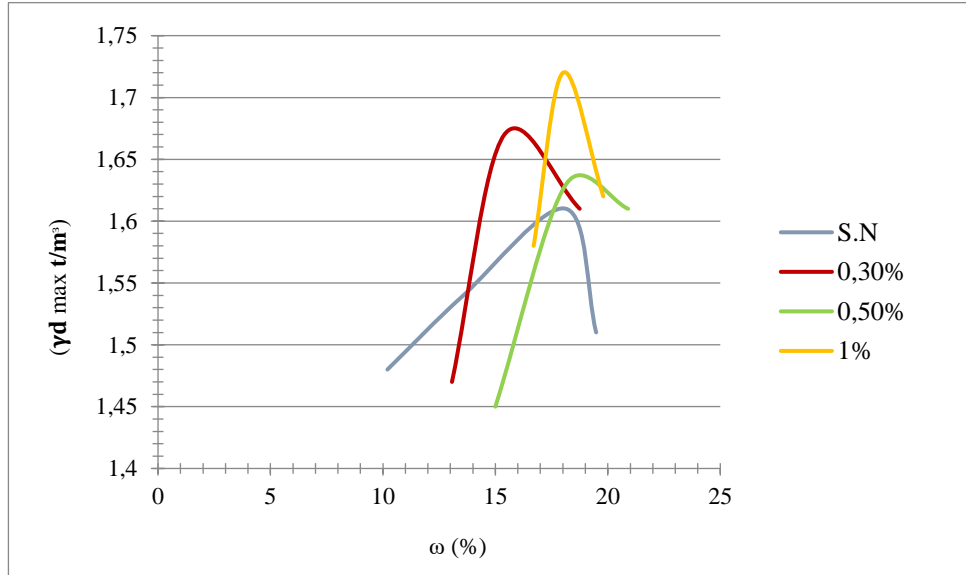


**Figure IV.4** Essai Proctor (argile +1% d'EPV) pour différentes longueurs: a) EPV de 1 cm; b) EPV de 0.5 cm.

D'après la figure IV.4 l'ajout de 1% d'EPV de 0.5 cm présente des valeurs maximales de la teneur en eau et la densité sèche avec 18.01% et 1.72 t/m<sup>3</sup> respectivement.

### IV.3.1 Influence des pourcentages de l'ajout d'EPV sur les caractéristiques de compactage

#### A.0.5 cm de longueur



**Figure IV.5** Essai Proctor (argile + % d'EPV) pour cm de longueur

La figure IV.5 montre une augmentation de la densité sèche maximale lors de l'ajout de différents pourcentages d'EPV par rapport au sol naturel, tandis que la teneur en eau a diminué de manière significative. Au contraire, lors de l'ajout de 0,3 % d'EPV, on a observé une diminution allant jusqu'à 15,4 %.

**B. 1 cm de longueur**

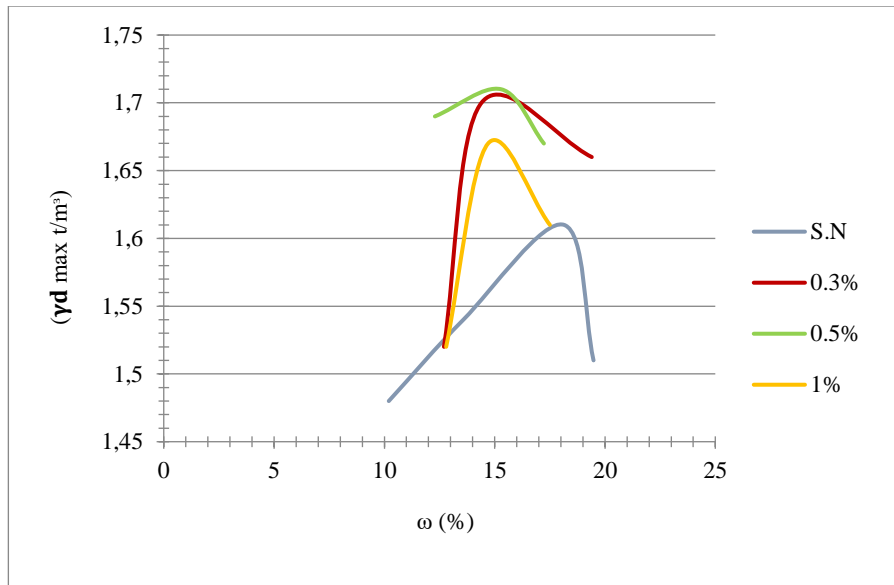


Figure IV.6 Essai Proctor (argile +% d'EPV) pour 1 cm de longueur.

L'augmentation de la teneur en ajout d'EPV de 1cm de longueur présente une augmentation de la densité sèche maximale par rapport au sol naturel, la valeur la plus élevée à 0.5 % d'EPV étant de 1.71(t/m<sup>3</sup>). Par contre, quand la teneur en ajout augmente, la teneur en eau diminue de 18.14% du sol naturel à 14.4% avec un ajout d'EPV du 0.3% (Figure IV.6)

**IV.3.2 Influence de longueur de l'ajout d'EPV sur les caractéristiques de compactage**

**A. Sol+0.3% d'EPV**

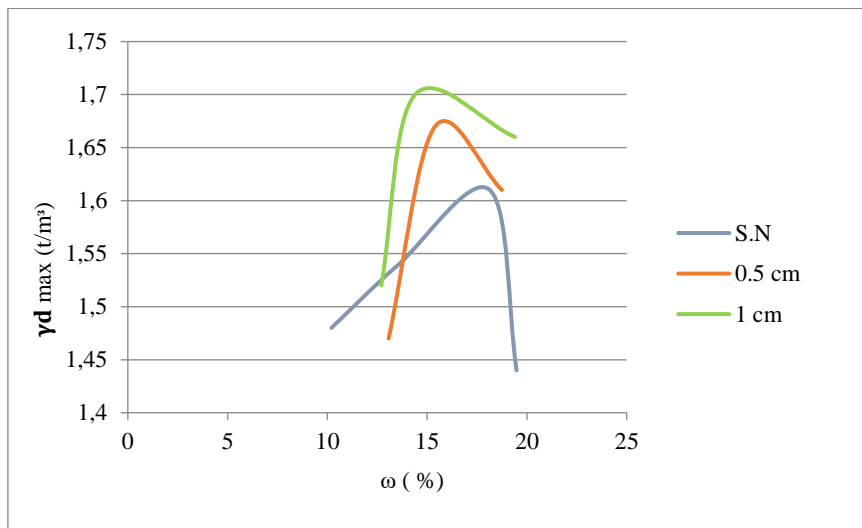


Figure IV.7 Essai Proctor (argile +0.3% d'EPV) pour différentes longueurs.

Les figures (IV.7,8) indiquent que l'augmentation de la longueur d'EPV de 0.3% et de 0.5% augmente la valeur de la densité sèche maximale et diminue la teneur en eau optimale par rapport au sol naturel. Sauf dans le cas de l'ajout de 0,5 cm d'EPV, la teneur en eau a légèrement augmenté.

### B. Sol+0.5% d'EPV

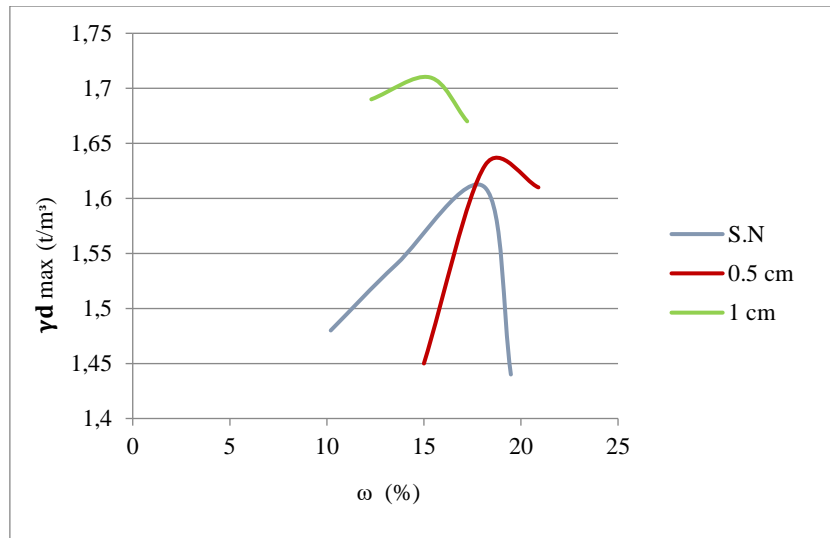


Figure IV.8 Essai Proctor (argile + 0.5% d'EPV) pour différentes longueurs.

### C. Sol+1% d'EPV

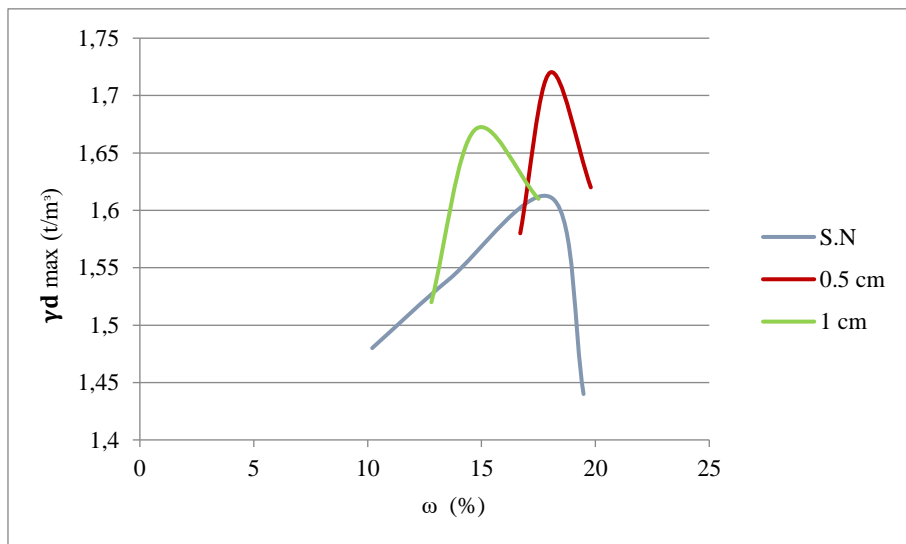


Figure IV.9 Essai Proctor (argile +1% d'EPV) pour différentes longueurs.

D'après la figure IV.9, l'ajout de 1% d'EPV de 1cm présente des valeurs maximales de la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale.

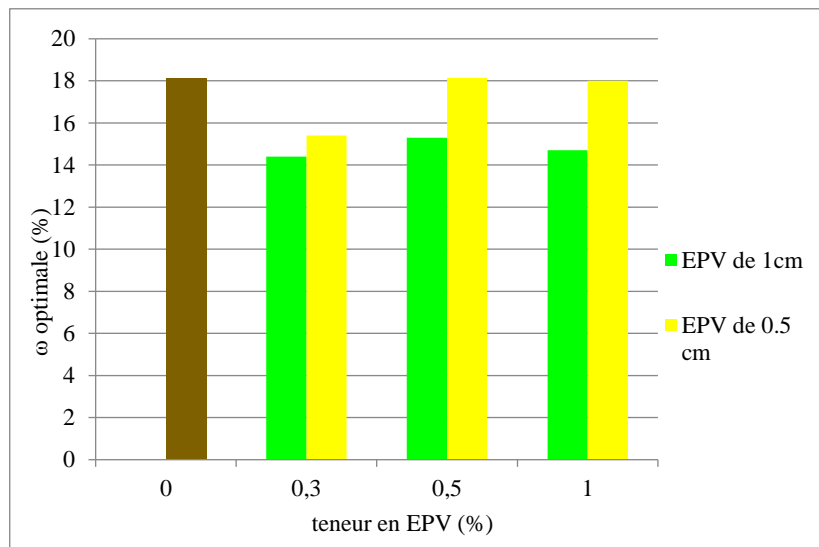
#### IV.3.3 Comparaison des résultats

D'après le tableau IV.1 ci-dessous, on obtient les histogrammes des figures (IV.10,11) et on discute sur les paramètres de Proctor : la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale.

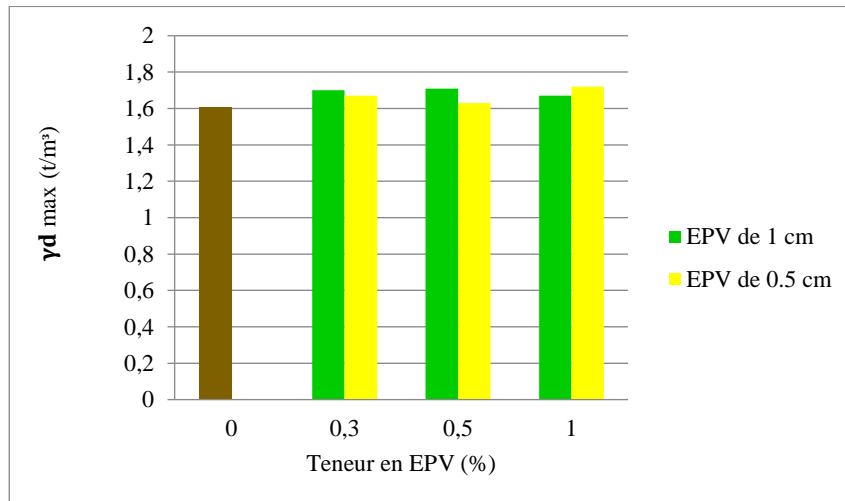
## Chapitre IV : Résultats et interprétations

**Tableau IV.1** Résultats des paramètres de l'ensemble des essais de Proctor.

Pourcentage (%)	Longueur (cm)	Teneur en eau (%)	Densité sèche max (t/m <sup>3</sup> )
0		18.14	1.61
0.3	0.5	15.40	1.67
	1	14.40	1.70
0.5	0.5	18.15	1.63
	1	15.30	1.71
1	0.5	18.01	1.72
	1	14.70	1.67



**Figure IV.10** Effet de la longueur et la teneur en EPV sur la teneur en eau optimale.



**Figure IV.11** Effet de la longueur et la teneur en EPV sur la densité sèche.

- D'après les figures (IV.10, 11), l'ajout de différents pourcentages de déchet de différentes longueurs (1 cm ; 0,5 cm) a entraîné des changements dans les caractéristiques de compactage.

- une augmentation de la densité par rapport à l'état naturel. En particulier dans les deux cas suivants :
  - Lors de l'ajout de 0,5% d'EPV d'une longueur de 1 cm.
  - Lors de l'ajout de 1% d'EPV d'une longueur de 0,5 cm.
- On constate que lorsqu'on ajoute 0,3 % d'EPV, avec longueur de 1 cm conduit à une teneur en eau optimale plus faible. Cela explique la diminution du gonflement.
- les résultats de la variation de la densité sèche maximum et la teneur en eau optimum en fonction des différents pourcentages d'EPV et en différents longueurs (0.5 cm ; 1 cm) sont similaires à des résultats été observées par Ikram et al (2020) lors de l'ajout d'un additif sur un sol argileux [73].

### IV.4 Essai CBR

L'essai de CBR est l'un des principaux essais, il permet la détermination de l'indice de CBR immédiat et de l'indice de gonflement.

Les résultats obtenus seront représentés sous forme des tableaux et des courbes sont en fonction des différents pourcentages des emballages pharmaceutiques vides (EPV) (0%, 0.3%, 0.5%, 1%).

#### IV.4.1 Influence des pourcentages de l'ajout d'EPV sur les caractéristiques de CBR

##### A.0.5 cm de longueur

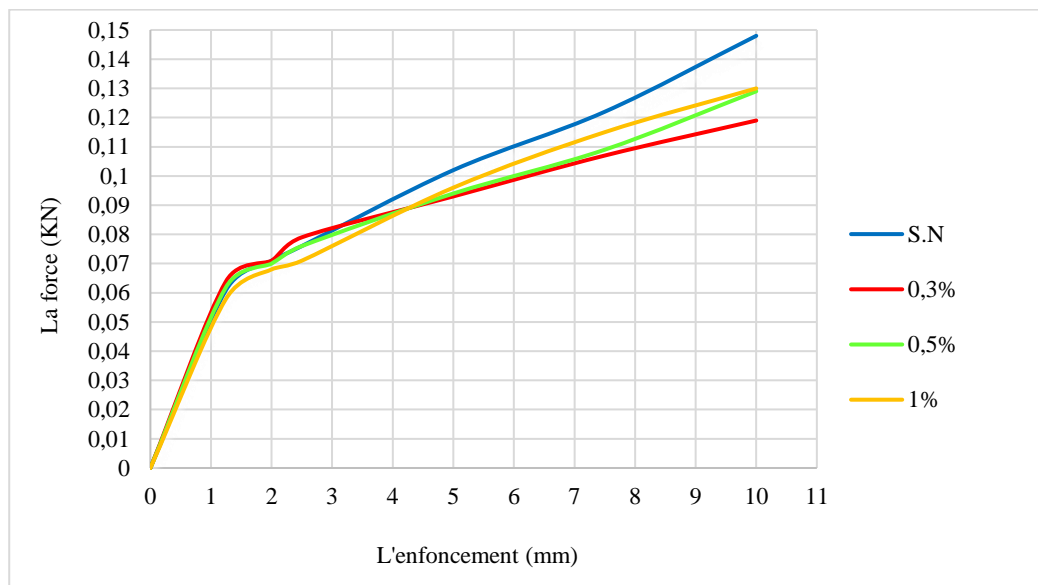


Figure IV.12 Essai CBR pour 0.5 cm de longueur.

Les résultats d'essai de CBR pour le sol non traité et le sol traité avec une longueur de 0.5 cm en fonction des enfoncements sont présentés dans la figure IV.12. Les données indiquent que l'augmentation de l'ajout de 1% de 0.5 cm a eu un impact significatif sur l'indice CBR, avec une augmentation de 3,38 % par rapport au sol non traité. En revanche, l'ajout de 0.3 % de 0.5 cm a donné la valeur maximale de l'indice CBR qui est 0.59.

### B. 1 cm de longueur

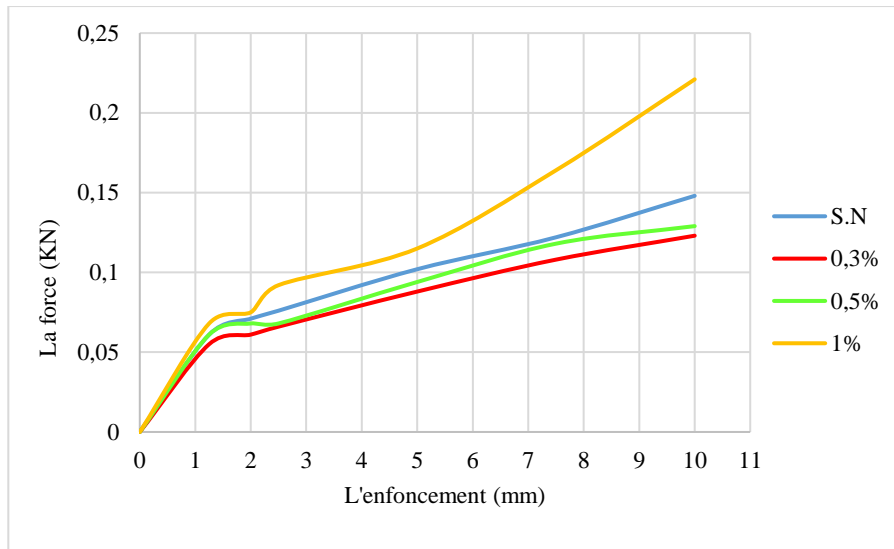


Figure IV.13 Essai CBR pour 1 cm de longueur.

La figure IV.13 présente les résultats d'essai de CBR pour le sol non traité et le sol traité avec une longueur de 1 cm en fonction des enfoncements.

Les résultats montrent que l'ajout de 0,5 % de 1 cm d'EPV n'a pas eu d'impact significatif sur la capacité des sols traités. En comparaison, la valeur maximale de l'indice CBR pour le sol témoin était de 0.69, avec un pourcentage de traitement de 1 % de 1cm. Ces résultats indiquent qu'il est souhaitable d'augmenter le pourcentage d'EPV pour améliorer la capacité portante des sols traités.

### IV.4.2 Influence de longueur d'ajout d'EPV sur les caractéristiques de CBR

#### A. Sol+0.3% d'EPV

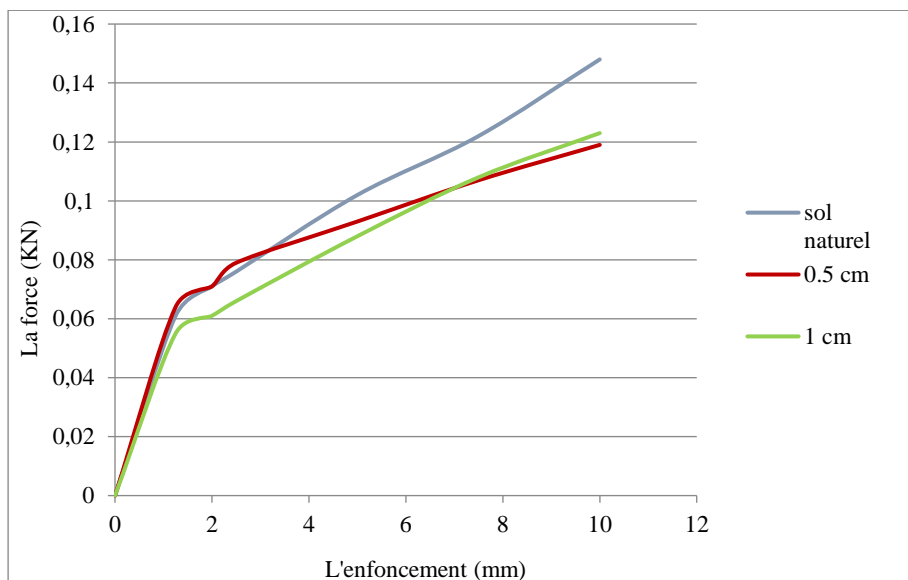


Figure IV.14 Essai CBR (argile +0.3% d'EPV) pour différentes longueurs.

Un ajout de 0.3% de longueur de 0.5 cm d'EPV aboutit à une augmentation significative de 3.38 % de son indice CBR en comparaison au sol non traité, par contre, un ajout de 0.3%

d'EPV de 1 cm donne une valeur minimale de l'indice de CBR de 0.49 dans tous les résultats de l'essai de CBR. (Figure IV.14)

### **B. Sol+0.5% d'EPV**

On constate que le traitement du sol à 0.5% d'EPV de 0.5 cm donne une valeur de l'indice de CBR similaire de la valeur de l'indice CBR du sol non traité, en plus, on observe que l'ajout de 0.5% d'EPV de 1 cm donne valeur minimale de l'indice de CBR qui est 0.51.(Figure IV.15)

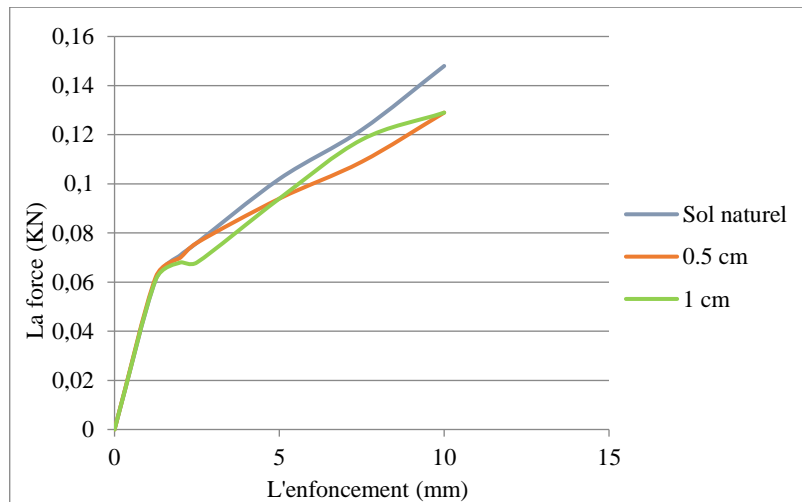


Figure IV.15 Essai CBR (argile + 0.5% d'EPV) pour différentes longueurs.

### **C. Sol+1% d'EPV**

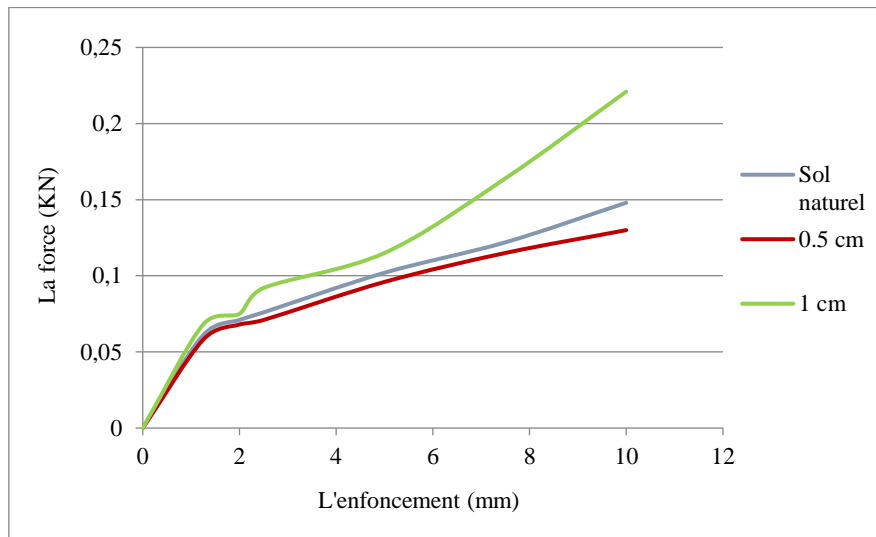


Figure IV.16 Essai CBR (argile +1% d'EPV) pour différentes longueurs.

D'après la figure IV.16, une augmentation de 17.39 % de l'indice CBR est observée avec l'augmentation du pourcentage d'EPV à 1 % de longueur de 1cm, et une diminution de l'indice CBR lors l'ajout d'EPV de 0.5 cm.

### IV.4.3 Comparaison des résultats

Tableau IV.2 Résultats des paramètres de l'essai CBR.

Pourcentage (%)	Longueur (cm)	Densité sèche max (T/m <sup>3</sup> )	Indice de CBR	Indice de gonflement
0		1.61	0.57	4.09
0.3	0.5	1.67	0.59	7.16
	1	1.70	0.49	7.20
0.5	0.5	1.63	0.57	6.10
	1	1.71	0.51	4.69
1	0.5	1.72	0.53	5.36
	1	1.67	0.69	4.50

➤ A partir des données contenues dans le tableau IV.2 on obtient les figures suivantes :

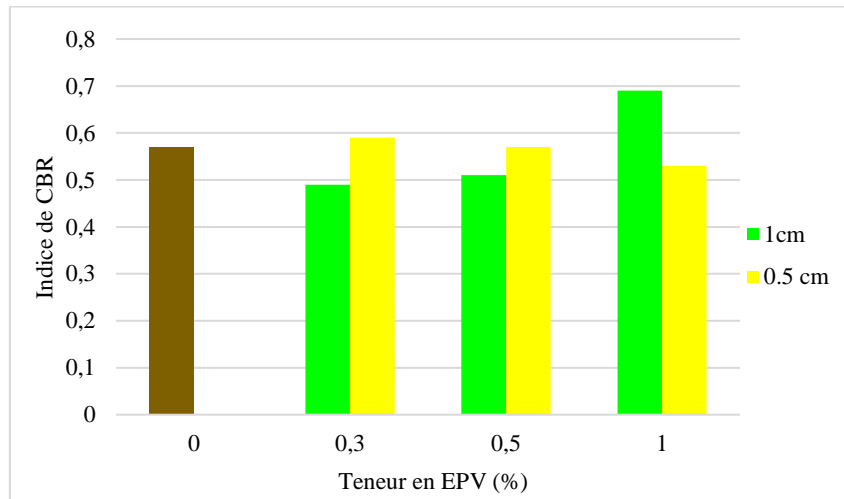


Figure IV.17 Histogramme de la variation des pourcentages d'ajout d'EPV en fonction de l'indice de CBR.

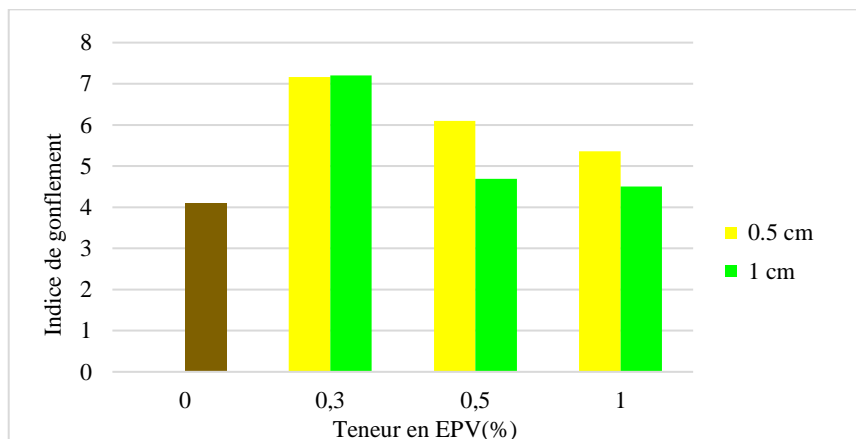


Figure IV.18 Histogramme de la variation des pourcentages d'ajout d'EPV en fonction de l'indice de gonflement.

- D'après la figure IV.17 l'ajout de 1% de longueur de 1cm d'EPV aboutit à une augmentation significative de 0.69 de son indice CBR, en comparaison au sol non traité, qui est de 0.57. Par contre, un ajout de 0.3% de longueur de 1cm d'emballage pharmaceutique vide donne une valeur minimale de l'indice de CBR de 0.49. On constate aussi que le traitement du sol à 0.5% de longueur de 0.5 cm d'emballage pharmaceutique vide donne une valeur de l'indice de CBR même de la valeur de l'indice CBR du sol non traité.
- La figure IV.18 montre une augmentation de l'indice de gonflement lors de l'ajout de différents pourcentages d'EPV par rapport au sol naturel. surtout l'ajout de 0.3% dans les différents longueurs (0.5cm ; 1cm).
- L'augmentation des paramètres CBR représentée par l'effet des bandes d'emballage pharmaceutique vides (EPV) dans notre étude est similaire à l'effet des bandes plastiques sur les sols argileux étudiés par Neopaney et al (2012) [69], les fibres de verre étudié par Ayininuola et Balogun (2018) et les fibres de bambou étudié par Brahmachary et al (2018) où l'effet était lié à une augmentation du pourcentage d'ajout ou à un changement de longueur [74].

### IV.5 Essai œdomètre

Les essais œdométriques sont réalisés dans les conditions de l'optimum (les teneurs en eau de Proctor Normal) et des pourcentages d'ajout (les emballages pharmaceutiques vides).

Les éprouvettes soumises aux essais effectués pour chaque pourcentage des emballages pharmaceutiques vides (0%, 0.3%, 0.5% et 1%).

#### IV.5.1 Influence de pourcentage et longueur d'EPV sur les caractéristiques œdométriques

##### A. Sol +0.3% d'ajout d'EPV

D'après la figure IV.19 l'essai œdométrique sur l'argile traitée à 0.5 cm d'emballage pharmaceutique vide (EPV), présente une augmentation des valeurs de coefficient de gonflement  $C_g$  de 3.30% et de coefficient de compressibilité de 21.30%.

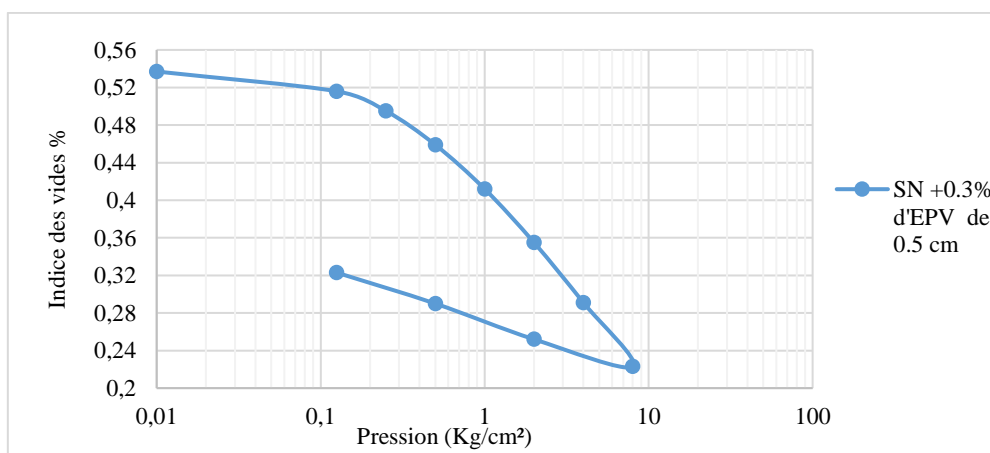


Figure IV.19 Essai œdométrique d'argile traité à 0.3% et 0.5 cm de longueur d'EPV.

L'essai œdométrique sur l'argile traitée à 1cm d'emballage pharmaceutique vide a permis de tracer la courbe de la figure IV.20 qui montre une valeur de coefficient de gonflement  $C_g$  de 3.30%, et une valeur de coefficient de compressibilité  $C_c$  de 19.50%

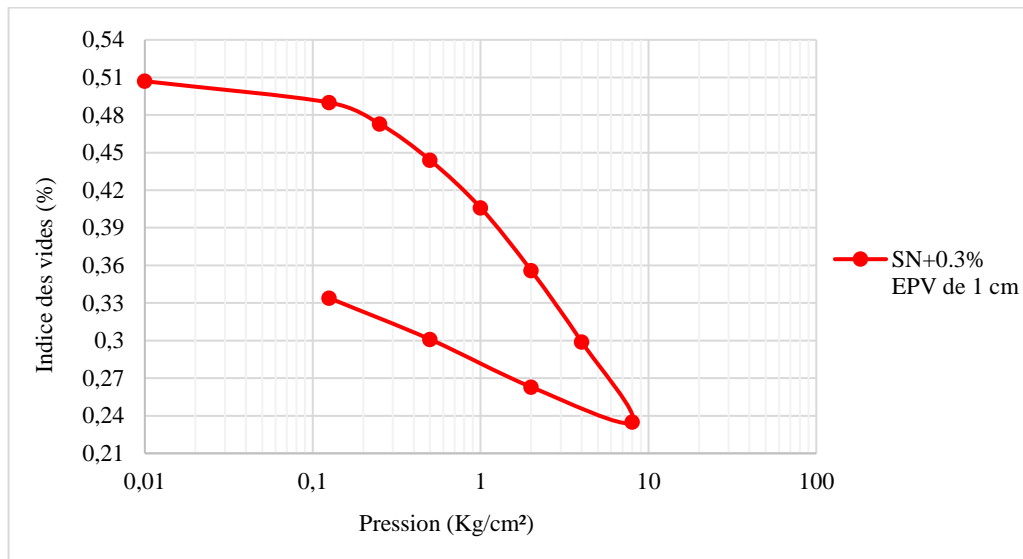


Figure IV.20 Essai œdométrique d'argile traitée à 0.3% et 1 cm de longueur d'EPV.

### **B. Sol +0.5% d'ajout d'EPV**

La figure IV.21 montre une diminution de coefficient de gonflement  $C_g=03\%$  et une augmentation de coefficient de compressibilité  $C_c=18.80\%$  par rapport au sol naturel traité.

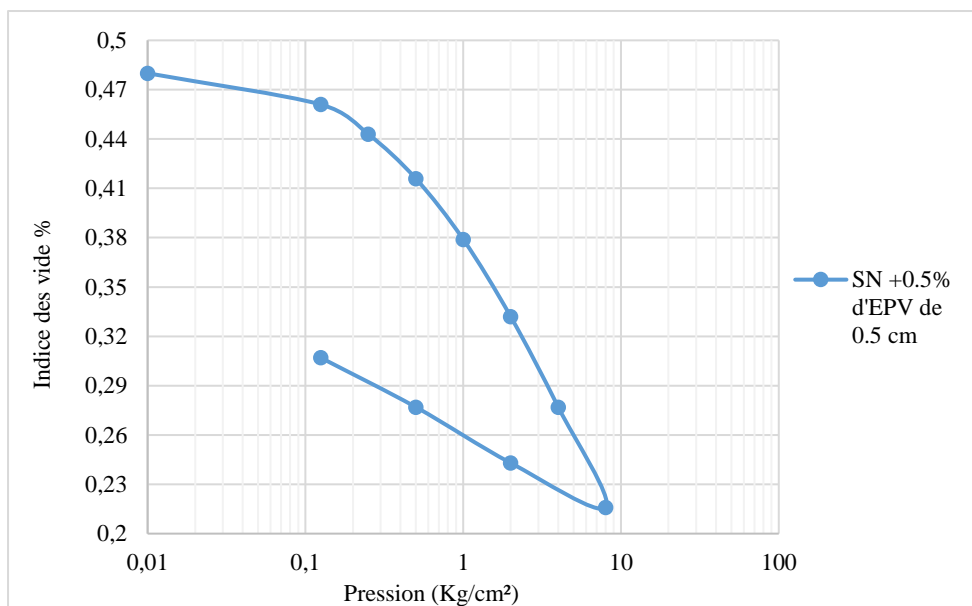


Figure IV.21 Essai œdométrique d'argile traitée à 0.5% et 0.5 cm de longueur d'EPV.

L'essai œdométrique sur l'argile traitée à 1cm d'EPV a permis de tracer la courbe de La Figure IV.22 qui montre une valeur de coefficient de gonflement  $C_g$  de 3.30%, et une valeur de coefficient de compressibilité de 17.80%.

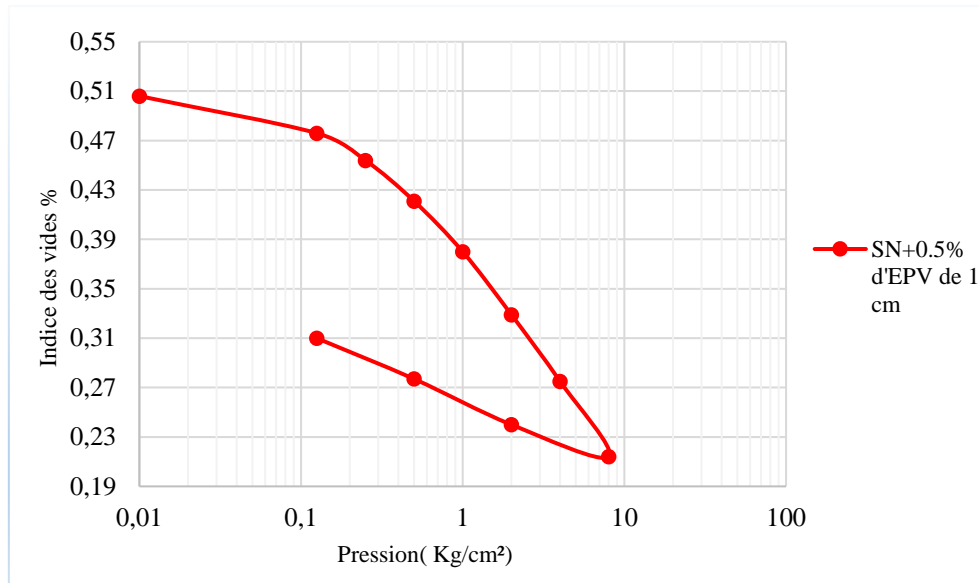


Figure IV.22 Essai œdométrique d'argile traitée à 0.5% et 1 cm d'EPV.

### C. Sol +1% d'ajout d'EPV

La figure IV.23 ci-dessous montre une diminution de coefficient de gonflement  $C_g=03.10\%$  et une augmentation de coefficient de compressibilité  $C_c=19.00\%$  par rapport au sol naturel traité.

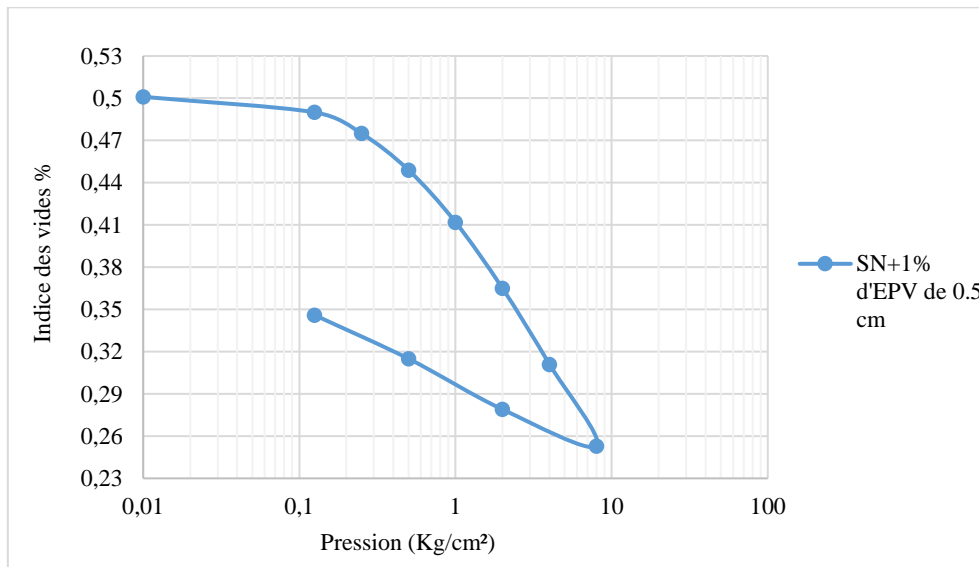
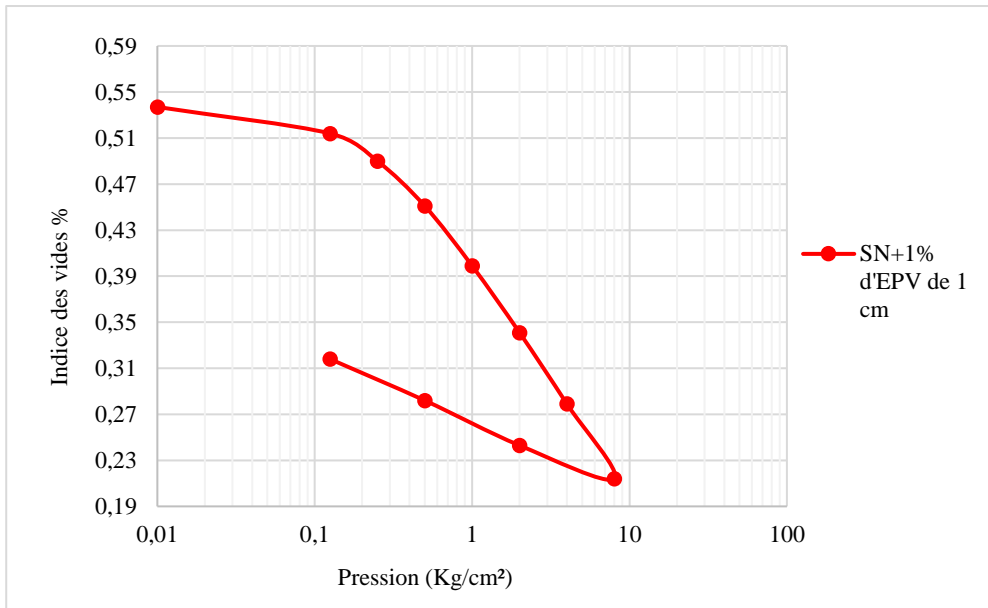


Figure IV.23 Essai œdométrique d'argile traitée à 1% et 0.5 cm de longueur d'EPV.

L'essai œdométrique sur l'argile traitée à 1cm d'EPV a permis de tracer la courbe de la figure IV.24 qui montre une valeur maximale de coefficient de gonflement  $C_g$  de 3.60%, et une valeur de coefficient de compressibilité de 20.20%.



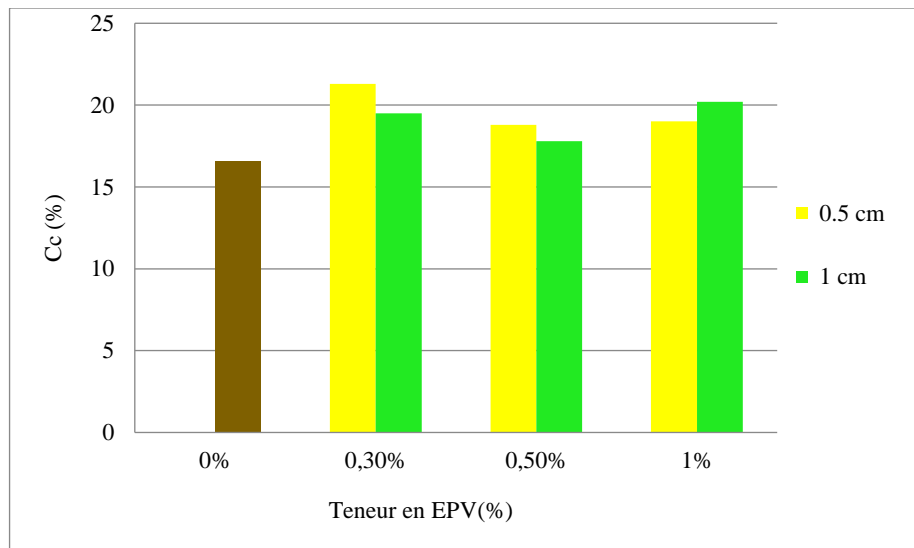
**Figure IV.24** Essai œdométrique d'argile traité à 1% et 1 cm de longueur d'EPV.

### IV.5.3 Comparaison des résultats

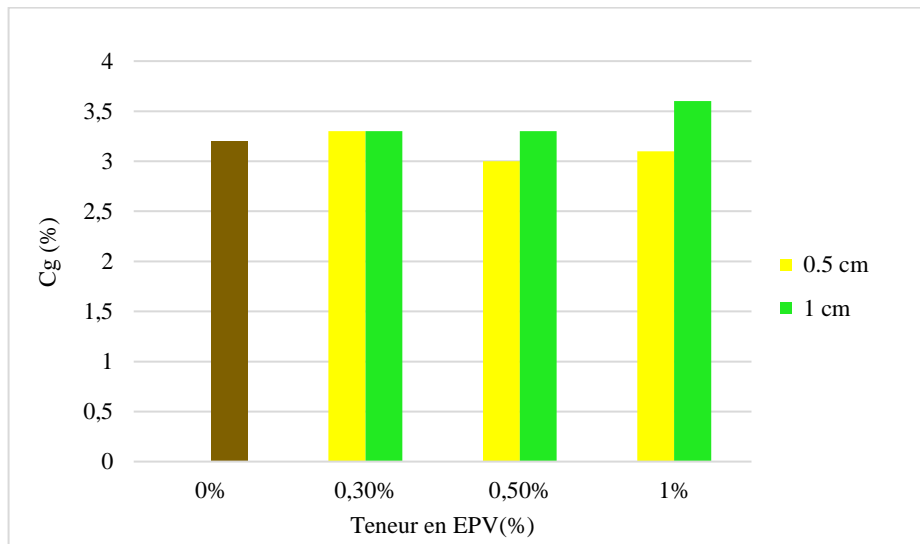
**Tableau IV.3** Résultats des paramètres oedométriques du sol traité.

Pourcentage (%)	Longueur (cm)	Coefficient de compressibilité (%)	Coefficient de gonflement (%)
0		16.60	03.20
0.3	0.5	21.30	03.30
0.3	1	19.50	03.30
0.5	0.5	18.80	03.00
0.5	1	17.80	03.30
1	0.5	19.00	03.10
1	1	20.20	03.60

➤ A partir des données contenues dans le tableau IV.3 on obtient les figures ci-dessous :



**Figure IV.25** Variation du coefficient de compressibilité  $C_c$



**Figure IV.26** Variation du coefficient de gonflement  $C_g$

D'après les histogrammes des figures (IV.25, 26) les modifications du comportement œdométrique présentent l'effet d'ajout des emballages pharmaceutiques vides (EPV) en différents pourcentages et longueurs sur l'argile d'OUM ETOUB.

- D'une part, l'augmentation de différents pourcentages de l'ajout d'EPV en différentes longueurs montre une augmentation significative du coefficient de compressibilité  $C_c$  à 16.60% du sol naturel jusqu'à 21.30% dans le sol traité par 0.3% d'EPV de 0.5 cm de longueur. Le sol traité avec 0.3% de 0.5 cm de longueur d'emballage pharmaceutique vide est classé comme sol assez fortement compressible.
- D'autre part, le sol traité avec l'ajout d'EPV en différents pourcentages et longueurs présente une augmentation du coefficient de gonflement contenue dans la zone  $2\% < C_g < 4\%$  qui déduit que le sol traité est un sol à faible gonflement. Et en

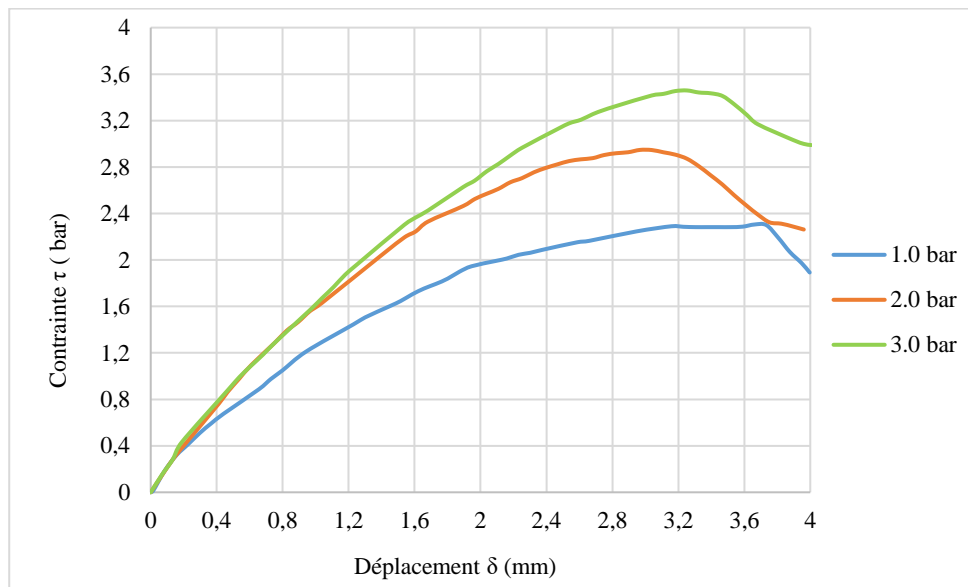
remarquant qu'une addition de 1% de longueur de 1 cm d'emballage pharmaceutique vide donne la plus grande valeur du coefficient de gonflement (3.60%).

- L'augmentation des résultats de coefficient de compressibilité et de coefficient de gonflement d'essai œdométrique obtenue par l'ajout d'EPV en différents pourcentages et longueurs sont similaires à des résultats obtenus par des mélanges d'argile avec la poudre de verre réaliser par MOHAMMED et al (2023). [75]

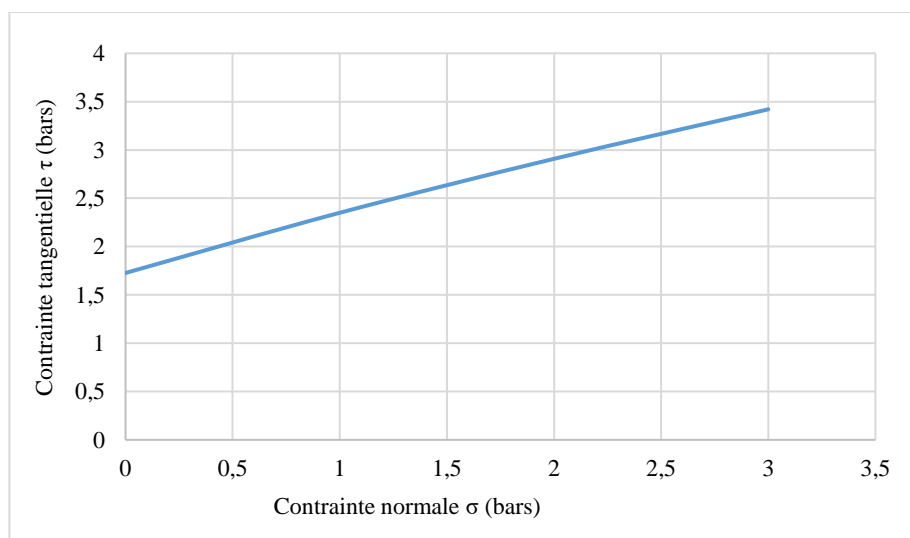
### IV.6 Essais de cisaillement

#### IV.6.1 Sol avec ajout de 0.3% d'EPV

##### A. 0.5 cm de longueur



**Figure IV.27** Contrainte de cisaillement en fonction de déplacement pour argile traitée à 0.3% d'EPV de 0.5 cm de longueur.

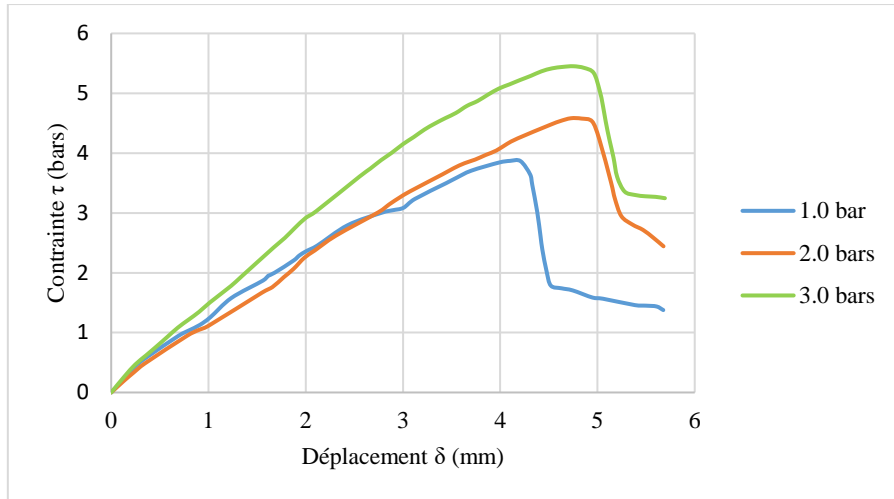


**Figure IV.28** Courbe intrinsèque d'argile traitée à 0.3% d'EPV de 0.5 cm de longueur.

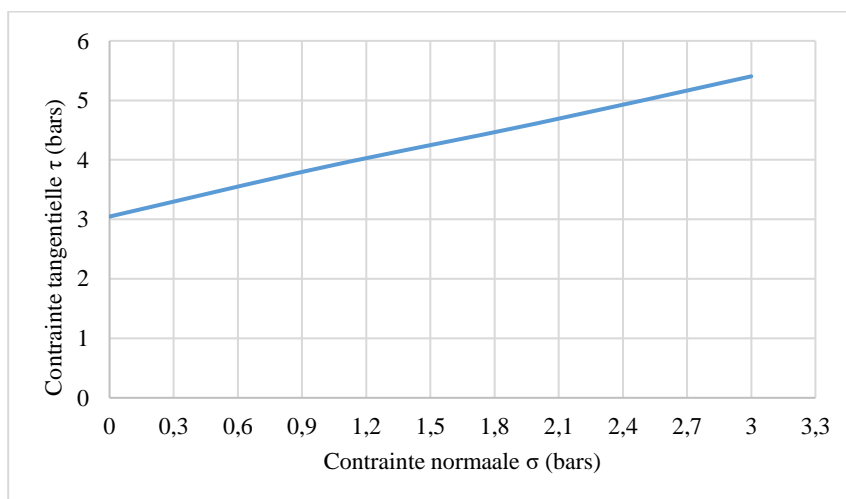
Les résultats obtenus d'après la courbe représentée sur la figure IV.28 sont :

- la cohésion = 172.7 kPa
- l'angle de frottement interne = 29°

### B.1cm de longueur



**Figure IV.29** Contrainte de cisaillement en fonction de déplacement pour argile traitée à 0.3% d'EPV de 1 cm de longueur.



**Figure IV.30** Courbe intrinsèque d'argile traitée à 0.3% d'EPV de 1 cm de longueur.

Les résultats obtenus d'après la courbe représentée sur la figure IV.30 sont :

- la cohésion = 304.7 kPa
- l'angle de frottement interne = 38°

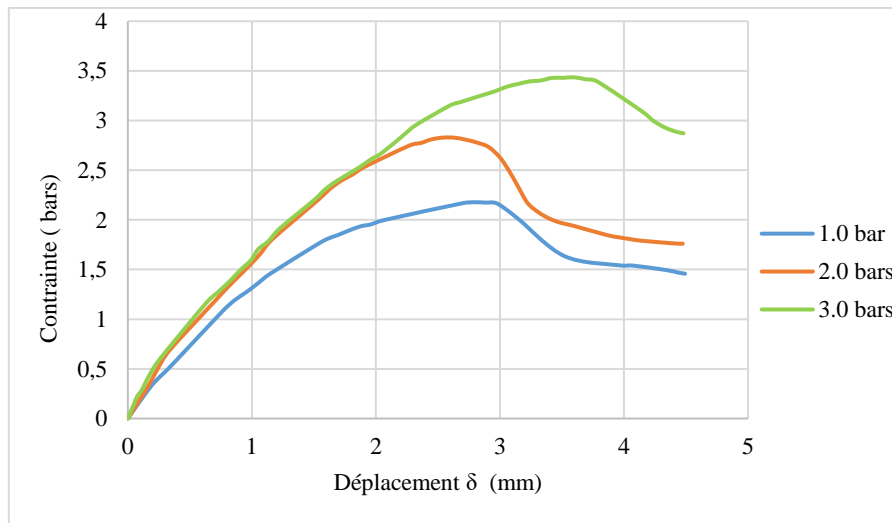
Les résultats de l'essai de cisaillement sur le sol avec ajout de 0.3%, montrent une augmentation de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal, après chaque chargement comme représenté sur les figures (IV.27, 29). La contrainte tangentielle maximale à 3 bars est : 344.6 kPa pour l'ajout de longueur de 0.5 cm et 548.4 kPa pour l'ajout de longueur de 1 cm. Ces contraintes tangentielles sont supérieures à celle trouvée dans le sol sans ajout.

**Tableau IV.4** Résultats d'essai cisaillement (sol+0.3% d'ajout)

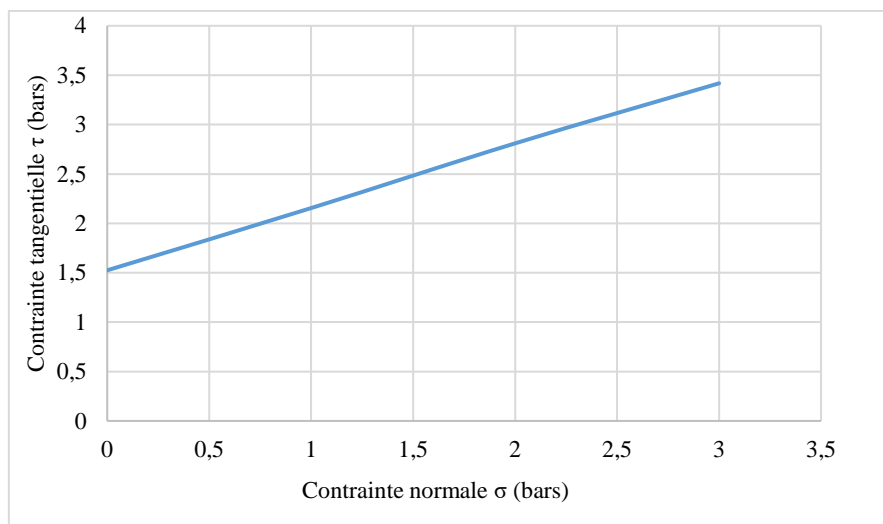
Contrainte normale (kPa)	contrainte de cisaillement (kPa)	
	0.5 cm	1 cm
100	229.2	387.6
200	290.5	460.6
300	344.6	548.4

### IV.6.2 Sol avec ajout de 0.5% d'EPV

#### A. 0.5 cm de longueur



**Figure IV.31** Contrainte de cisaillement en fonction de déplacement pour argile traitée à 0.5% d'EPV de 0.5 cm de longueur.

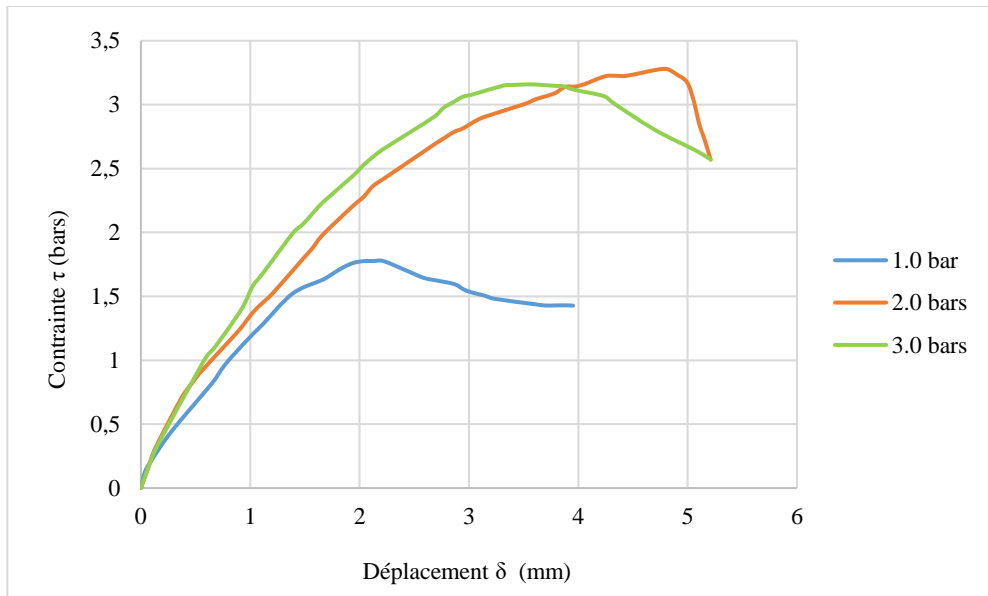


**Figure IV.32** Courbe intrinsèque d'argile traitée à 0.5 % d'EPV de 0.5 cm de longueur.

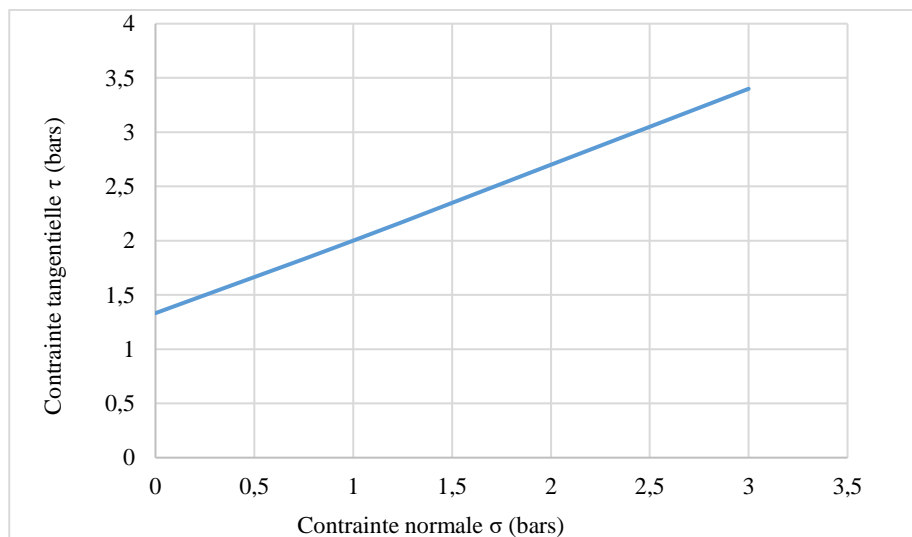
Les résultats obtenus d'après la courbe représentée sur la figure IV.32 sont :

- la cohésion = 152.8 kPa
- l'angle de frottement interne = 32°

### B.1cm de longueur



**Figure IV.33** Contrainte de cisaillement en fonction de déplacement pour argile traitée à 0.5% d'EPV de 1 cm de longueur.



**Figure IV.34** Courbe intrinsèque d'argile traitée à 0.5% d'EPV de 1 cm de longueur.

Les résultats obtenus d'après la courbe représentée sur la figure IV.34 sont :

- la cohésion = 133.2 kPa
- l'angle de frottement interne =  $35^\circ$

Les résultats de l'essai de cisaillement sur le sol avec ajout de 0.5%, montrent une augmentation de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal, comme représenté sur les Figure (IV.31, 33). Les contraintes tangentielles maximales sont :

- 343.8 kPa pour le sol avec 0.5% d'EPV de 0.5 cm.
- 327.5 kPa pour le sol avec 0.5% d'EPV de 1 cm.

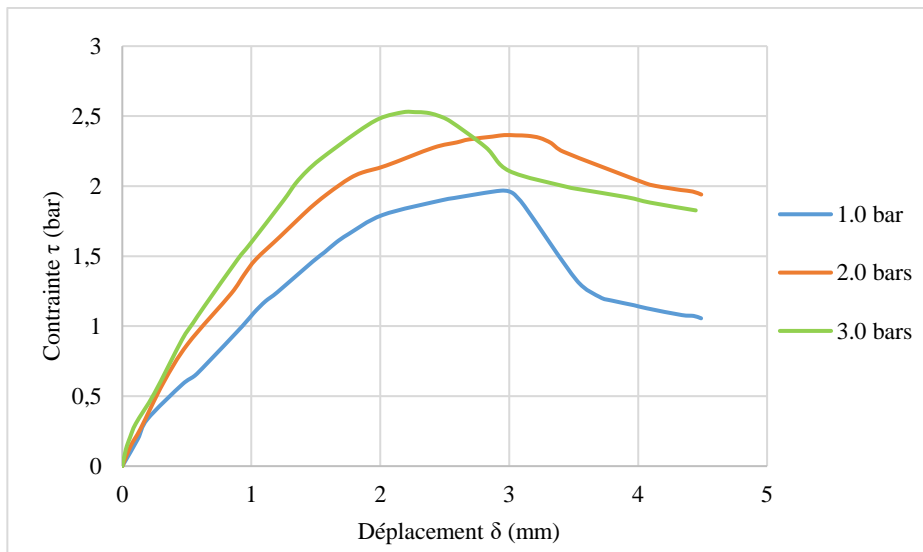
Ces contraintes tangentielles sont supérieures à celle trouvé dans le sol sans ajout.

**Tableau IV.5** Résultats d'essai cisaillement (sol+0.5% d'ajout)

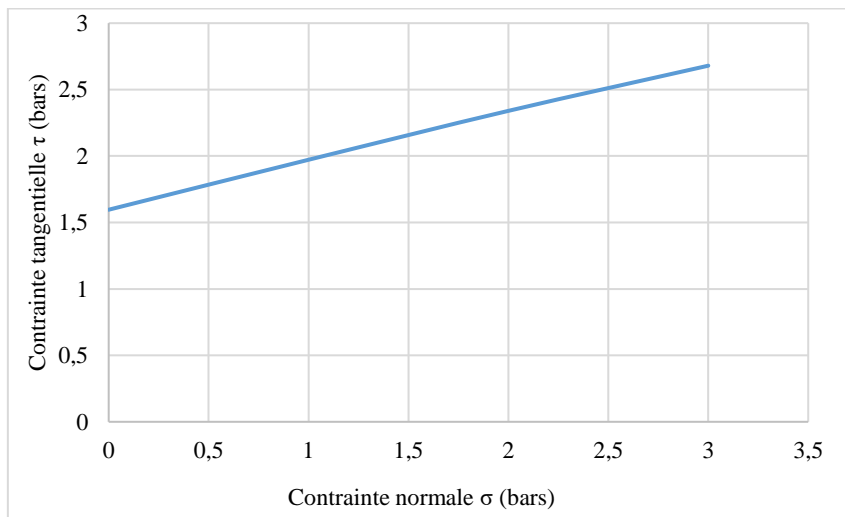
Contrainte normale (kPa)	contrainte de cisaillement (kPa)	
	0.5 cm	1 cm
100	215.3	176.4
200	284.8	327.5
300	343.8	316.8

### IV.6.3 Sol avec ajout de 1% d'EPV

#### A. 0.5 cm de longueur



**Figure IV.35** Contrainte de cisaillement en fonction de déplacement pour argile traitée à 1% d'EPV de 0.5 cm de longueur.

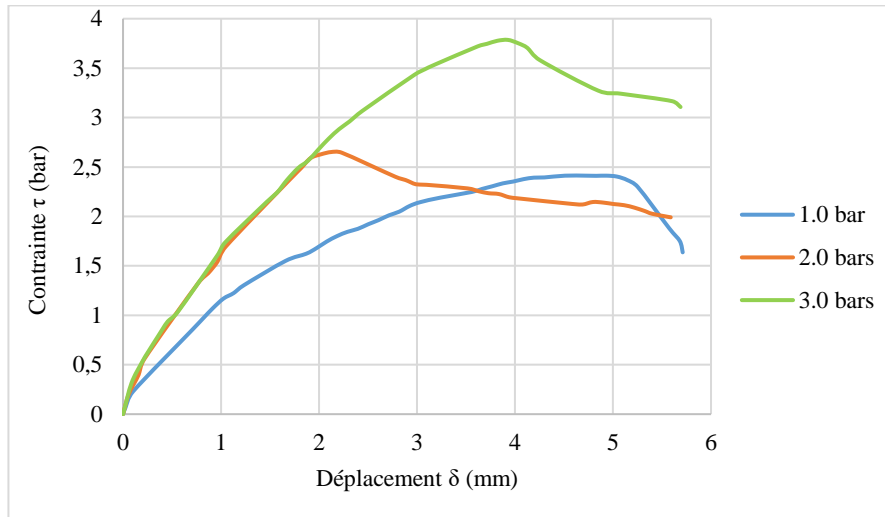


**Figure IV.36** Courbe intrinsèque d'argile traitée à 1% d'EPV de 0.5 cm de longueur.

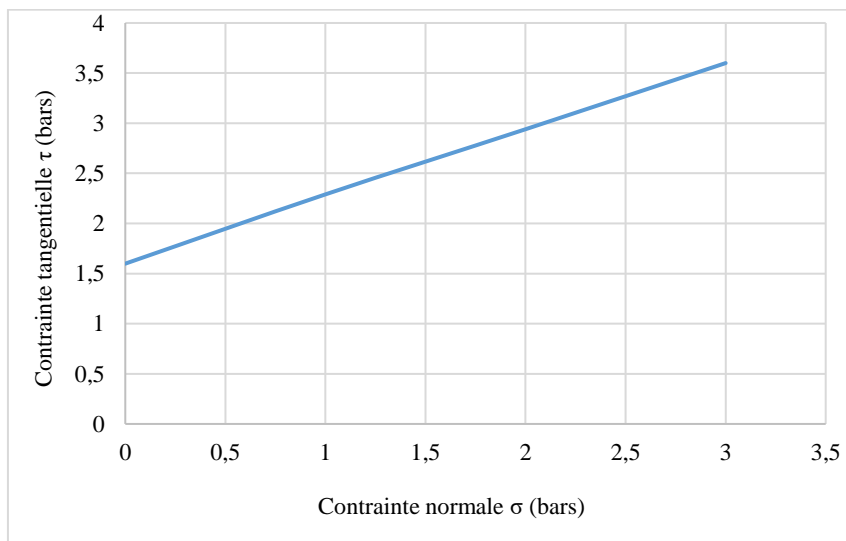
Les résultats obtenus d'après la courbe représentée sur la figure IV.36 sont :

- la cohésion = 159.6 kPa
- l'angle de frottement interne = 20°

### B.1cm de longueur



**Figure IV.37** Contrainte de cisaillement en fonction de déplacement pour argile traitée à 1 % d'EPV de 1 cm de longueur.



**Figure IV.38** Courbe intrinsèque d'argile traitée à 1% d'EPV de 1 cm de longueur.

Les résultats obtenus d'après la courbe représentée sur la figure IV.38 sont :

- la cohésion = 159.9 kPa
- l'angle de frottement interne = 33°

Les résultats de l'essai de cisaillement sur le sol avec ajout de 1%, montrent une augmentation de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal, après chaque chargement comme représenté sur les figures (IV.35, 37). La contrainte tangentielle maximale à 3 bars est 252.7 kPa pour l'ajout de longueur de 0.5 cm et 373.3 kPa pour l'ajout de longueur de 1 cm. Cette dernière est inférieure à celle trouvée dans le sol sans ajout.

**Tableau IV.6** Résultats d'essai cisaillement (sol+1% d'ajout).

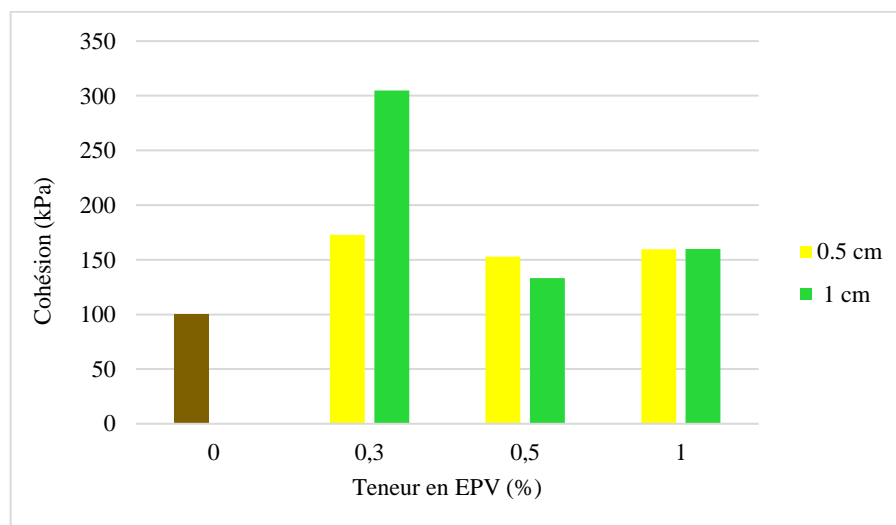
Contrainte normale (kPa)	Contrainte de cisaillement (kPa)	
	0.5 cm	1 cm
100	197.2	239.3
200	234.8	269.2
300	252.7	373.3

### IV.6.4 Comparaison des résultats

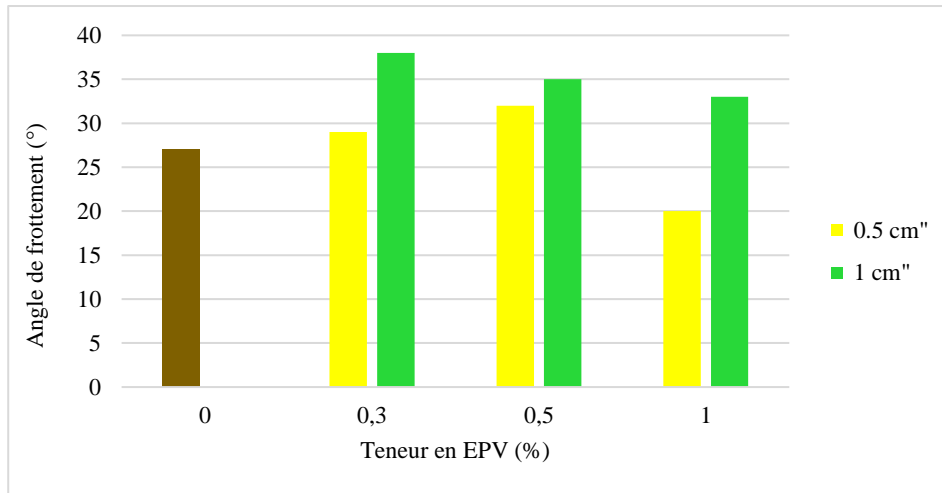
**Tableau IV.7** Résultats des paramètres de cisaillement du sol traité.

Pourcentage (%)	Longueur (cm)	Cohésion (kPa)	Angle de frottement (°)
0		99.90	27
	0.5	172.70	29
0.3	0.5	172.70	29
	1	304.70	38
0.5	0.5	152.80	32
	1	133.20	35
1	0.5	159.60	20
	1	159.90	33

➤ A partir des données contenues dans le tableau IV.2 on obtient les figures suivantes :



**Figure IV.39** Variation de la cohésion du sol traité.



**Figure IV.40** Variation d'angle de frottement du sol traité.

- ✓ Les résultats obtenus montrent que la résistance au cisaillement augmente de plus en plus avec l'augmentation de la contrainte normale appliquée. En effet, les bandes d'emballages pharmaceutiques vides se resserrent entre eux et avec les particules d'argile, donc le frottement va augmenter, ce qui fait accroître leur résistance au cisaillement après chaque essai.
- ✓ En outre, la résistance au cisaillement est liée également à la quantité des bandes d'EPV ajoutées au sol et leur longueur. En effet, sous les différentes contraintes normales, les résultats obtenus montrent une amélioration de la résistance au cisaillement en fonction du pourcentage d'ajout de ces granulats ou en fonction de la longueur ajoutée et une augmentation de cohésion et l'angle de frottement. (Figure IV.39, 40)

Cette résistance est liée directement au frottement interne qui se manifeste entre les grains au cours du cisaillement. Ces résultats de l'augmentation de la résistance au cisaillement sont conformes à ce qui a été réalisé par Yamoun (2021).

### IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, en premier temps, nous avons étudiés l'effet des emballages pharmaceutiques vides sur la stabilisation du sol argileux et la possibilité d'utiliser d'EPV pour réduire leur influence sur l'environnement. En second temps, Les échantillons de sol d'OUM ETOUB wilaya de SKIKDA ont été préparés en laboratoire des travaux publics de l'est de SKIKDA et ANNABA en mélangeant le sol avec l'EPV à différents pourcentages (0.3%, 0.5% et 1%) et différentes longueurs (0.5 ; 1cm). On a fait une étude expérimentale basée sur quelques essais géotechniques tels que l'essai œdométrique, le compactage (Proctor normal), l'essai de CBR et le cisaillement rectiligne.

D'après les essais réalisés et les résultats obtenus on trouve une augmentation de la densité sèche maximale avec une diminution de la teneur en eau dans l'essai de Proctor dans la plupart des pourcentages ajoutés en différentes longueurs. Dans l'essai de CBR, on remarque que le grand pourcentage d'EPV de 1% de longueur de 1 cm donne une valeur maximale de l'indice de CBR par rapport au sol naturel. En ce qui concerne l'essai œdométrique, on constate une augmentation sur les paramètres œdométriques  $C_c$  et  $C_g$ . Enfin, les essais de

## **Chapitre IV : Résultats et interprétations**

---

cisaillements rectilignes montrent une augmentation de la résistance au cisaillement et une augmentation de l'angle de frottement et la cohésion.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

La stabilité des sols argileux a été étudiée par de nombreux chercheurs, qui ont développé de nombreuses méthodes et dispositifs pour minimiser les problèmes associés à ces sols. Les techniques de traitement les plus couramment utilisées dépendent de divers paramètres, tels que les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la disponibilité des matériaux à utiliser et les conditions environnementales.

Le traitement des sols argileux avec des déchets industriels présente de nombreux avantages en géotechnique, offrant une solution aux problèmes caractéristiques de ces sols, tels que leur faible stabilité, leur sensibilité à l'eau et leurs variations de volume.

Dans cette étude, nous avons donné dans un premier temps un aperçu détaillé sur l'état de connaissance des sols, essentiellement les sols argileux. Ces derniers étaient reconstitués à partir d'un mélange traité avec des emballages pharmaceutiques vides (EPV). En second temps on a fait une étude expérimentale a été menée est basée sur l'effet d'EPV à trois pourcentages (0.3% ; 0.5% et 1%) et deux dimensions (0.5 ; 1 cm) sur un sol argileux d'OUM ETOUB et basée sur quelques essais géotechniques tels que l'essai Proctor, l'essai de cisaillement, l'essai de CBR et l'essai œdométrique sont réalisés en laboratoire des travaux publics de l'est de SKIKDA et ANNABA.

L'objectif de ce travail était de rechercher l'influence du traitement utilisé sur les caractéristiques physiques et mécaniques du sol traité.

On conclusion générale les emballages pharmaceutiques vides, un déchet non utilisé, peuvent être considérés comme une alternative aux matériaux de traitement traditionnels qui sont parfois coûteux et non écologique.

Sur la base des résultats obtenus dans cette étude et à la lumière des interprétations de ces résultats nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- Selon les résultats des essais Proctor, une légère augmentation de la densité sèche maximale (de 1,60 à 1,72  $t/m^3$ ) dans tous les pourcentages d'EPV, Cela s'explique que l'EPV a une densité élevée, d'une part et que le mélange se prête bien pour être compacté. Cela est interprété par Ikram et al (2020).
- On constate également qu'en ajoutant d'EPV, la teneur en eau optimale diminue par rapport à celle de l'argile naturelle. Cela est dû au caractère hydrophobe d'EPV qui rend l'argile traité absorbe moins de quantité d'eau.
- Les paramètres de l'indice de CBR obtenus montrent que l'ajout de 1% d'EPV de longueur de 1 cm donne une valeur maximale de l'indice de CBR (0.69). Ces résultats indiquent qu'il est souhaitable d'augmenter le pourcentage d'EPV pour améliorer la capacité portante de sol traité.
- D'après les résultats œdométriques, on remarque que la diminution de coefficient de gonflement d'EPV de 0.5% de 0.5 cm de longueur montre que l'ajout d'EPV a un caractère hydrophobe au contraire l'augmentation léger de coefficient de gonflement dans les autres pourcentages ajouté, indique que l'ajout d'EPV créer des vides dans le sol traité. On observe aussi que la valeur 17.80% est la valeur minimale de coefficient de compressibilité par rapport les autres pourcentages ajoutés avec le sol étudié.
- Les essais de cisaillement ont montré une augmentation de la résistance au cisaillement et une augmentation de l'angle de frottement interne et la cohésion. Le meilleur résultat a été obtenu à 0.3% d'ajout d'EPV de longueur de 0.5 cm avec une cohésion de 304.7 KPa et un angle de frottement interne de 38°. Cette augmentation d'angle de frottement permet le passage de sol traité d'un état cohérent vers un état granulaire.

En résumé, le traitement des argiles par des renforts d'origine des déchets industriels (EPV), permet non seulement de créer une source supplémentaire pour absorber certaines quantités de ces déchets industriels, mais également d'améliorer les propriétés mécaniques et physiques de l'argile étudiée. Cela peut être la solution pour stabiliser ces types de sols pour des raisons économiques, environnementaux et techniques. Mais nous ne pouvons pas être certains qu'en procédant à de nombreux essais pour confirmer leur utilisation en pratique.

Nos recherches ouvrent plusieurs pistes en termes de perspectives. Dans le but de poursuivre cette recherche, nous proposons quelques axes à développer dans les futures recherches :

- Étudier l'effet d'augmentation des dimensions des bandes d'EPV sur l'évolution de la portance des argiles, et le comportement à long terme.
- Étudier les paramètres de cisaillement et de perméabilité par les essais triaxiaux.
- Valider des résultats trouvés par la modélisation numérique du sol traité.

### Référence bibliographique

- [1] A. M. Bacha et Abou-Bakr.N, «stabilisation of swelling soils salt» Conférence internationale de géotechnique, Beyrouth, Lebanon, 2004.
- [2] a. scolaire, «le sol nun milieu particulier» assistance scolaire, 2000.
- [3] scribd, «Introduction à la mécanique des sols» *scribd*.
- [4] J. C. B. A. A. Natacha Sertier, «Amélioration des sols» Université de Ika réunion , 2006.
- [5] B. N. & B. M. NOUREDDINE, «mémoire de Master -Amélioration d'un sol argileux par le laitier de haut fourneau activé par la poudre de dolomie» Université 08 Mai 1945, Guelma, Juillet 2019.
- [6] M. H. Douakha Haroun, «Mémoire de master- Amélioration des sols» Université 8 mai 1945, Guelma , juin 2018.
- [7] N. ELyaakoubi, «Thèse de Doctorat ,Pontentialités d'utilisation des argiles marocaines: cas des gisements de Jbel Kharrou et de Benhmed» Faculté des sciences Rabat,, Rabat, Maroc , 2006.
- [8] «Génie civil et géotechnique,» [En ligne]. Available: <https://geotechnicien186.blog4ever.com/ch1les-argiles>. [Accès le 13 mars 2023].
- [9] Mireille Christophe Michel-Lévy, Minéralogie des argiles, 1983.
- [10] G. M. HERNANDEZ, «Thèse de doctorat -Etude Expérimentale de la sorption d'eau et du gonflement des argiles par Microscopie à Balayage Environnementale (ESEM) Et l'analyse digitale d'images» Université Louis-Paster , 2002.
- [11] «Associaton Internationale pour l'étude des argiles» Newsletter n°32, février 1996.
- [12] Boussak, «Thèse de Doctorat -Effet de la température sur les performances des céramiques contenant la bentonite de Maghnia» Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, 2015.
- [13] C. Kulkarni, «Céramique blogué» 30 janvier 2020. [En ligne]. Available: <https://ckceramiks.fr>. [Accès le 14 mars 2023].
- [14] «Argile- Définition,» Techno-Science.net, [En ligne]. Available: <https://www.techno-science.net>. [Accès le 14 mars 2023].
- [15] H. Mohamed, «Mémoire de Mgister -Contribution à l'amélioration du procédé de fabrication de la céramique» Université Kasdi Merbah , Ouaregla , 2007.
- [16] M. R, «Les sols cultivés» Edition technique et documentation Lavoisier , Paris, France , 1989.

- [17] G. H. Holtz W.G, Introduction à la géotechnique traduit par Lafleur, J, Canada: Edition de l'école de polytechnique de Montréal, 1991.
- [18] H. A, «Théorie de la double couche et gonflement des argiles non saturées,» Euromech Colloquium N°209: Mechanics of swelling , p. 1993, Aout.
- [19] M. Mohamed, «Modélisation de comportement hydromécaniques des sols gonflements non saturés» Institut national polytechnique de LORRAINE , LORRAINE , 2005.
- [20] M. Lakhdar, «Méthodologie d'étude et technique d'identification des paramètres de comportement des sols fins soumis à des cycles de sécheresse prolongée (Application aux argiles expansives de M'sila)» Université Mohamed Boudiaf, M'sila , 2006.
- [21] B. Mokhtaria, «Recyclage des huiles usagées par une argile locale locale activée» Université IBN KHALDOUN , Tiaret, 2023.
- [22] Duchaufour. PH, Abrégé de pédologie, Edition Masson, 1988, p. 232.
- [23] F. S. L. B. Chevalier.S, «Al-Pillard Saponites Partie 1 -IR Studies» Journal of Chemistry Society Farady Transactions , 1994.
- [24] Abdelhadi El Hachmi, «Argile et minéraux argileux :propriétés physico-chimiques et propriétés collaides» Université Abdelmalek Essaadi, Tetouan- Maroc , 2013.
- [25] B. M, «Thèse de Magister -Etude de la cristallisation et des propriétés mécaniques et diélectrique de céramiques préparés à partir de kaolin- dolomite» Université EL-Hadj Lakhder, Batna, 2010.
- [26] D. A, «Matériaux argileux, structure, propriétés et applications» Paris, France , Edition Masson,, 1990.
- [27] N.S.SORO, «Thèse de Doctorat-Influence des ions fer sur les transformations thermiques de la Kaolinite» Université de Limoges, 12 Juin 2003.
- [28] M. H. E. P. R. Etienne Rakotomaria, «Valorisation chimique du kaolin dans le traitement des eaux : Préparation des nouveaux Coagulants minéraux» Université d'Antananarivo, école supérieure polytechnique, Antananarivo, 2001.
- [29] L. DJEFFAL, «Mémoire de Magister- Elimination par adsorption sur argile local des ions métalliques contenus dans les eaux de rejet industriel de la région Annaba» Université Badji Mokhtar , Annaba, 2008.
- [30] S. C. T. G. G. L. 2. N. Charles, «Mémento kaolin et argiles kaoliniques» 2018.
- [31] Chen.F.H, «Foundations on expansive soils» Elsevier publishing Co, Amesterdam, 1988.
- [32] B. Dadda.N, «Mémoire de Master-Valorisation de la bentonite Algérienne dans la formulation de boue de forage à base d'huile (Cas de Maghnia)» Université de Béjaia , Béjaia, 2017-2018.

- [33] Benchikh.S, «Mémoire d'Ingénieur-Synthèse caractérisation et propriétés catalytiques dans la réaction de fermage du méthane des matériaux à base de montmorillonite supporte sur le nickel et cobalt» Université de Jijel, Jijel, 2010.
- [34] L. E.C, «Non-grouting techniques» Practical foundation engineering handbook, p. 340, 2004.
- [35] F. Bell, «Méthodes de traitements des sols instables» 1978. [En ligne]. Available: <http://www.editions-eyrolles.com>. [Accès le 2023].
- [36] V. Q. N. A. Kanté Seydou, «Mémoire de Master- Utilisation des réseaux de neurones artificiels pour la prédiction des propriétés géotechniques des sols argileux améliorés à la chaux» Université Khemis Meliana, Khemis Meliana, 2020.
- [37] Y. Mourad, «Mémoire de Master-Comportement mécanique d'une argile sous l'effet d'ajout des granulats de pneus usés» Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou , 2021.
- [38] B. J.B, «Dynamiques des filières de récupération-recyclage et écologie territoriale: l'exemple de la filière de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) en Midi-Pyrénées» Université Toulouse le Mirail, Toulouse, 2012.
- [39] C. F, «Le traitement et la gestion des déchets ménagers à la Réunion: approche géographique» Université de la Réunion, Réunion, 2007.
- [40] S. Sabrina, «Comportement des bétons à base de granulats recyclés» Université de Mentouri, Constantine, 2010.
- [41] I. i. s. NIGKAM, «Sotamenou in 1992 Mémoire d'ingénieur à l'ENSP Yaoundé» ENSP Yaoundé, Yaoundé, 2005.
- [42] G. d. d. s. e. A. S. s. l. g. ABDERREZAD S, «Gestion des déchets solides en Algérie» Séminaire sur la gestion Intégrée des déchets solide, Alger , 2000.
- [43] J. Jora, « le contrôle et l'élimination des déchets» journal officiel algérien n°77 : la loi n° 01-19 de 12/12/2001 sur la gestion, , 2001.
- [44] S. H, «Mémoire de Magister- Gestion et impact des déchets solides urbains sur l'environnement, El teref Commune» Université Badji Mokhtar, Annaba, 2011.
- [45] I. s. p. d. l. d. d. d. ., R. F. Légifrance, «Article L.541-1 du code d'environnement» 21 Septembre 2000. [En ligne]. Available: <https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article/Ic/LEGIARTI000006834443/2000-09-21>.
- [46] ALEXANDER, «Déchet recyclable» Les joyeux recycleurs, 2023.
- [47] I. s. p. d. l. d. d. d. ., R. F. Légifrance, «Article .L.2224-13 et 14 du code général des collectivités territoriales, CGCT» 10 Février 2020. [En ligne]. Available: <https://www.legifrance.gouv.fr>.
- [48] A. Damien, «Guide régional des déchets dangereux» Dunod, Paris, 2007.

- [49] R. GOURDEN, «AIDE A LA DEFINITION DES DECHETS DITS BIODEGRADABLES» Record.org, LYON, France, 2002.
- [50] «Cours de gestion de déchets- "755319840"».
- [51] L. r. d. l. p. d. r. e. d. l. p. d. l'environnement, «Décret n°540-Relatif à la classification des déchets» Aida, Ineris, 18 Avril 2002.
- [52] A. Damien, «Gide du traitement des déchets» *DUNOD*, 2004.
- [53] E. Koller, Traitement des pollutions industrielles "Eau, Air, Déchets, Sols, Boues", 2éme édition éd, Dunod, Éd, Paris, France , 2001, p. 576.
- [54] Djemaci, «La gestion des déchets municipaux en Algérie, analyse perspective et éléments d'efficacite» Université de Rouen, Rouen , 2012.
- [55] Z. L. YASRI Meriem Feriel, «Mémoire d'ingénieur d'état- Diagnostique pour un plan de gestion des déchets solides idustriels de SONATRACH dans la base de Hassi R'mel» Université de Béjaia , Béjaia, 2009-2010.
- [56] V. Julia, «04146528 (écologie industrielle et valorisation des déchets)» MBA gestion internationale déposé à la session d'hiver, 2006..
- [57] B. Ahlem, «étude de la gestion et de valorisation par compostage» Université Mentouri, Constantine, 2011-2012.
- [58] Alufoil.org, «European Aluminium Foil Association» Alufoil.org, 30 Novembre 2020. [En ligne]. Available: <https://www.alufoil.org/files/alufoil/infoil/infoil4French.pdf>. [Accès le 2024].
- [59] plastinov, «plastinov» Pastinov.fr, 28 Novembre 2020. [En ligne]. Available: <https://www.plastinov.fr/presentation-les-matrices-thermoplastiques-etthermodurcissables>. [Accès le 2024].
- [60] S. MD, «Joren Machinery Co, Ltd» POLYCHLORURE DE VINYLE (PVC):1, [En ligne]. Available: <https://www.jornen.com/>. [Accès le Mars 2024].
- [61] Alfipa, «Aluminium Film Paper» Alfipa , 2020. [En ligne]. Available: <https://alfipa.fr/applications/feuille-aluminuim-industrie-pharmaceutique>.
- [62] packaging, «Blisters pharmaceutiques: de l'avantage de l'aluminuim sur plastique- Packaging France» Packaging , 2020. [En ligne]. Available: <https://www.packagingfrance.com>.
- [63] P. G. C. S. J. C. Z.HRUSKA, «Polychlorure de vinyle ou PVC» Technique de l'ingénieur, AM3325, V2, 207.
- [64] S.GIROIS, «Stabilisation du PVC» Techniques de l'ingénieur, AM 3233, PP(1-9), 2004.
- [65] B.BITSCH, «Amélioration des thermoplastiques, Role du compounder» Techniques de

l'ingénieur AM 3238, 2005.

- [66] D.WYART, «Colorants et pigments» Techniques de l'ingénieur, AM3234 V2, 2010.
- [67] A.Lachi, «Container-Content Compatibility Studies: A Pharmaceutical Team's Inegrated Approach. PDA» Journal of Pharmaceutical Science and Technologie, 2009.
- [68] «Tigers» Tigersalu, 18 Mars 2023. [En ligne]. Available:  
[https://www.tigersalu.com/fr/product/pharmaceutical-foil/#google\\_vignette](https://www.tigersalu.com/fr/product/pharmaceutical-foil/#google_vignette).
- [69] U. K. W. S. T. Megnath Neopaney, «Stabilisation of soil by using plastic wastes» International Journal of Emerging trends in Engineering and Development, 2012.
- [70] L. O. Gbenga Matthew Ayininuola, «Investigation of glass fiber potential in soil stabilization» 2018, International Journal of Engineering and AdvencedTechnology (IJEAT).
- [71] M. B. M. S. A. -M. B. Houaria, «Polycopié manuel de travaux pratiques de mécanique des sols et de géotechnique routière» Université des Sciences et de la Technologie Mohamed BOUDIAF, Oran, 2021-2022.
- [72] M. Fatima, «Mémoire de magister -2tude du comportement physico-chimique et mécanique d'un remblai routier marneux amélioré par la chaux éteinte cas de l'autoroute Est-Ouest tronçon Oued Fodda, Khemis Meliana» Université Hassiba Ben-Bouali, Chlef, 2009.
- [73] B. F. Z. K. GUEZOUL Ikram, «Mémoire de master-Stabilisation des argiles par ajout de verre recyclé avec un prétraitement à la chaux» Université IBN Khaldoun , Tiaret, 2020.
- [74] M. R. Tonmoy Kumar Brahmachary, «Investigation of randon inclusion of bamboo fiber on ordinary soil and its effect CBR value» International Journal of Geo-Engineering, 2018.