

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN – TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER EN GÉNIE CIVIL

OPTION : GÉOTECHNIQUE

Présenté par :

MEKKI Sara
MEKKAOUI Halima

**Influence de l'ajout des fibres de déchets plastiques sur la
résistance d'un sable limoneux**

Soutenu publiquement le 21/06/2025, devant le jury composé de :

M^{me} DRAOUI Aicha

Présidente

M. BEKKI Hadj

Encadrant

M. SARBAH Boumediene

Examineur

M^{me} RENNAK Zohra

Examinatrice

Année Universitaire : 2024–2025

Remerciements

A l'issue de ce travail, je rends grâce à dieu tout-puissant, qui m'a guidé, facilité le chemin du savoir et m'a inspiré la patience et la détermination pour mener à bien ce mémoire.

*J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à mon encadrant, **M. Bekki Hadj**, pour son soutien constant, ses orientations précieuses et sa grande patience. Ses remarques scientifiques rigoureuses et ses encouragements ont grandement enrichi ce travail.*

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance aux membres du jury, qui ont bien voulu accepter d'évaluer ce travail, et tout particulièrement à mes enseignants pour les connaissances qu'ils m'ont transmises tout au long de mon parcours académique.

*Je n'oublie pas de remercier chaleureusement les ingénieurs et techniciens du **Laboratoire des travaux publics-Unité Ouest de Tiaret**, pour les conditions favorables et l'assistance technique qu'ils ont mises à ma disposition, contribuant ainsi à la réalisation de la partie pratique de ce travail.*

Merci à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail.

Dédicace

Tout d'abord, je remercie le dieu, notre créateur de m'avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.

Je dédie ce travail

A ma mère, la source de tendresse et la lumière qui guide mes routes et qui m'emmène aux chemins de la réussite, pour tous ses sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.

A mon père que je le remercie énormément pour ses efforts, ses conseils et sa surveillance.

Qui m'ont toujours soutenu et guidé avec amour et sagesse, je leur dédie ce travail. Grace à leur présence constante et leur soutien infaillible, je suis devenu la personne que je suis aujourd'hui.

A mes frères et sœurs,

Pour leur amour, leur amitié et leur encouragement à chaque étape de ma vie, vous êtes ma source de force et d'inspiration.

Ce travail vous est dédié, avec toute ma reconnaissance et mon affection.

Sara

Dédicace

À celle qui mon paradis sur terre, source de tendresse et lumière inépuisable sur

Mon chemin...

À mon mère, mon pilier éternel, le battement de mon cœur, à toi, tout mon

Amour et ma reconnaissance, car tu es le début, la force et la paix intérieure.

À mon cher père, mon exemple et ma source de courage, merci pour ton soutien

Silencieux, tes précieux conseils, et ta foi en moi-même dans mes silences.

À mes frères et sœurs, vous êtes mon refuge lorsque la sérénité me manque, la

Chaleur au milieu du tumulte... Merci pour votre présence irremplaçable.

À mon amie fidèle, lumière dans l'obscurité, sourire sincère dans les moments

Dues... aucun mot ne pourra exprimer toute ma gratitude pour ton soutien et ta

Présence sincère.

À mon honorable encadrant, m. (), je vous adresse mes plus profonds

Remerciements pour votre patience, votre accompagnement constant, vos

Conciles avisés et vos remarques pertinents qui ont largement contribué à la

Qualité de ce travail, votre suivi bienveillant et rigoureux a été un véritable guide

Tout au long de ce projet.

Et à toutes les personnes qui m'ont tendu la main, par un mot, une prière ou un

Simple sourire...

Je vous dédie le fruit de ce parcours, car ce succès n'est pas la main seul, mais le

Reflet de vos cœurs généreux

Halima

Abstract

Silty sands are weakly cohesive soils with limited bearing capacity, which restricts their use in construction and public works projects. Due to their unfavorable mechanical properties, improving their behavior is often necessary. At the same time, plastic waste—particularly PVC—poses serious environmental challenges, mainly because of its extremely long degradation time, which can extend over several hundred years. Its valorization in construction applications therefore offers both technical and ecological benefits. In this study, we investigated the short- and long-term behavior of silty sand reinforced with PVC plastic fibers. These fibers, sourced from carpentry aluminum waste, range in size from 1 to 3.15 mm and were added to the soil at various dosages ranging from 1.5% to 4.5% by weight. The experimental program included direct shear tests conducted under drained (CD) and undrained (UU) conditions. The results indicated that in the long term, the addition of fibers significantly enhanced the shear strength of the silty sand. This improvement is attributed to the mechanical reinforcement effect of the fibers, which help to limit internal displacements within the soil matrix. In the short term, however, the reinforcement did not produce a significant improvement in the shear behavior of the silty sand.

Keywords:

Silty soil, stabilization, reinforcement, strength, PVC plastic waste, shear tests.

Résumé

Les sables limoneux sont des sols faiblement cohésifs et à capacité portante limitée, ce qui restreint leur utilisation dans les projets de construction et de travaux publics. En raison de leurs propriétés mécaniques peu favorables, une amélioration de leur comportement est souvent nécessaire. Par ailleurs, les déchets plastiques, en particulier ceux issus du PVC, posent de sérieux problèmes environnementaux, notamment en raison de leur très longue durée de dégradation, pouvant atteindre plusieurs centaines d'années. Leur valorisation dans le domaine de la construction apparaît ainsi comme une solution à la fois technique et écologique. Dans ce travail, nous avons étudié le comportement à court et à long terme d'un sable limoneux renforcé par des fibres plastiques de type PVC. Ces fibres, issues de déchets de menuiserie aluminium, présentent des dimensions comprises entre 1 et 3,15 mm, et ont été incorporées au sol à différents taux (de 1,5 % à 4,5 % en poids). Les essais réalisés comprennent principalement des essais de cisaillement direct, en conditions drainées (CD) et non drainées (UU). Les résultats ont montré qu'à long terme, l'ajout de fibres entraîne une amélioration sensible de la résistance au cisaillement, attribuée à l'effet de renforcement mécanique des fibres qui limitent les déplacements internes du sol. En revanche, à court terme, le renforcement n'a pas permis une amélioration significative du comportement du sable limoneux.

Mots clés :

Sol limoneux, stabilisation, renforcement, résistance, déchets plastiques PVC, essais à la boîte.

ملخص:

الرمال الطميية هي تربة ضعيفة التماسك ذات قدرة تحمل محدودة، مما يحد من استخدامها في مشاريع البناء و الأشغال العامة. و نظرا لخصائصها الميكانيكية غير الملائمة، فإن تحسين سلوكها غالبا ما يكون ضروريا. من جهة أخرى تطرح النفايات البلاستيكية و خاصة نفايات البولي فينيل كلوريد (PVC)، مشاكل بيئية خطيرة، لا سيما بسبب فترة تحللها الطويلة جدا، والتي يمكن ان تصل الى عدة مئات من السنين. و بالتالي، يبدو ان استعادتها مجال البناء حل تقني و بيئي.

في هذا العمل قمنا بدراسة سلوك الرمال الطميية المدعمة بألياف البلاستيكية من نوع PVC على المدى القصير و الطويل تتراوح ابعاد هذه الاليف المشتقة من نفايات نجارة الالمنيوم بين 1 و 3.15 مم، و تم دمجها في التربة بنسب مختلفة من (1,5% الى 4,5 % من الوزن). تشمل هذه الاختبارات التي أجريت بشكل أساسي اختبارات القص المباشر في ظل ظروف الموحدة و مصرفة CD وغير موحدة دون تصريف UU و أظهرت النتائج ان إضافة الاليف تحسن بشكل ملحوظ مقاومة القص على المدى الطويل و يرجع ذلك الى تأثير التعزيز الميكانيكي للاليف التي تحد من الحركات الداخلي للتربة اما على المدى القصير فان هذا التدعيم لم يحدث تحسنا كبيرا على المدى القصير في سلوك الرمال الطميية.

الكلمات المفتاحية

تربة طمية، تثبيت، تدعيم، مقاومة، نفايات بلاستيكية، اختبارات على صندوق.

Sommaire

Résumé	i
Sommaire.....	iii
Liste de figures.....	vii
Liste de tableaux.....	viii
Introduction Générale.....	01

Chapitre I : Recyclage des déchets plastiques

I.1 Introduction	04
I.2 Historique	04
I.3 Définition de plastique	05
I.4 Composition et origine du plastique	05
I.5 Types de plastiques	06
I.6 Avantage des matières plastiques	09
I.7 Inconvénients des matières plastiques	09
I.8 Domaines d'Applications et utilisation de polychlorure de vinyle	09
I.8.1 Bâtiment	10
I.9 Impact du PVC sur l'environnement et la santé de l'être humain	11
I.10 Recyclage de plastique	11
I.11 Le principe du recyclage	12
I.12 Les étapes de recyclage des déchets plastiques	12
I.13 Présentation de matériaux PVC	12
I.13.1 Définition de PVC	13
I.13.2 Fabrication de PVC	14
I.13.3 Propriétés du PVC	15
I.13.4 Stabilisants du PVC	15
I.13.5. Dégradation du PVC	16
I.13.6 Recyclage et valorisation de PVC	16
I.13.5. Gestion des déchets de polychlorure de vinyle (PVC.....	16

I. 14 Conclusion.....	19
-----------------------	----

Chapitre II : Comportement des sols limoneux et techniques de stabilisation

II.1 Introduction	21
II.2 comportement mécaniques des sols limoneux	21
II.2.1 Résistance et rupture des sols	21
II.2.2 Comportement drainé du sol.....	22
II.2.3 Comportement non drainé du sol	24
II.3. Influence de quelques paramètres sur le comportement mécanique	26
II.3.1 : Influence de la pression confinement	26
II.3.2. Influence de la teneur en eau	26
II.3.3 : Influence de la présence des fines	28
II.3.4 : influence de la granulométrie	29
II.3.5 : Influence de la forme des grains.....	30
II.4 : Techniques des stabilisations de sols limoneux	31
II.4.1 : Méthode mécanique.....	31
II.4.1.1 : Compactage dynamique	31
II.4.1.2 : Vibro-compactage	32
II.4.1.3 Colonnes ballastées	34
II.4.2 Méthode physique.....	35
II.4.2.1 Pré-chargement.....	35
II.4.2.2 : Drainage	36
II.4.2.3 Renforcement par des fibres.....	37
II.4.3 Méthode thermique	38
II.4.3.1 Déshydratation.....	38
II.4.3.2 Congélation	39
II.4.4 Méthode chimique	40
II.4.4.1 Utilisation de la chaux.....	40
II.4.4.2 Utilisation du ciment	42
II.5 Stabilisation des sols limoneux avec la technique d'Electro-osmose	43
II.6 Conclusion.....	44

Chapitre III : Présentation des essais

III.1 Introduction	46
III.2 Etude expérimentale	46
III.2.1 Sable limoneux.....	46
III.2.2 Sable limoneux renforcé par des fibres PVC.....	46
III.3. Analyse de sable limoneux et des déchets plastiques.....	46
III.3.1. Essai de d'identification	46
III.3.1.1. Analyse chimique	46
III.3.1.2. Analyse granulométrique.....	51
III.3.1.3 Masse volumique absolue.....	53
III.3.1.4 Essai de Diffraction des Rayons X (DRX).....	55
III.3.1.5 limites d'Atterberg (NF P 94-051)	56
III.3.2. Essai Proctor normal (NF P 94-093).....	58
III.3.3. Essai de cisaillement à la boîte (NF 94-071-1).....	60
III.4 Renforcement du sol par l'ajout des déchets plastiques PVC.....	66
III.5 Conclusion	67

Chapitre IV : Interprétation des résultats

IV.1 Introduction	69
IV.2 Limites d'Atterberg.....	69
VI.3 Analyse des résultats des essais Proctor.....	70
VI.3.1 Mélanges de sable limoneux avec 1.5% PVC.....	70
VI.3.2 Mélanges de sable limoneux et 3% PVC.....	71
VI.3.3 Mélange de sable limoneux et 4.5 % PVC	71
IV.4 Résultats des essais de cisaillement à la boîte	73
IV.4.1 Essais de cisaillement UU.....	73
IV.4.2 Essais de cisaillement en conditions consolidé drainé (CD).....	81
IV.5 Conclusions	86
Conclusion Générales	88
Références.....	91
Annexes	

Liste de figures

Figure I.1 : Produits plastiques (Abdoune, 2019).....	05
Figure I.2 : Déchets de bouteilles en PET.....	06
Figure I.3 : Tubes en PEHD utilisée dans les réseaux d'évacuation.....	06
Figure I.4 : Le PVC.....	07
Figure I.5 : Les déchets des sacs plastiques.....	07
Figure I. 6: Seringue médicale fabrique en PP.....	08
Figure I.7: Boites en plastique PS.....	08
Figure II.8 : recyclage du plastique.....	11
Figure I. 9 : schématise les différentes étapes du processus de recyclage du plastique.....	12
Figure I.10: Polymérisation du PVC.....	13
Figure II.1 : Courbe effort - déformation dans un essai de cisaillement.....	22
Figure II.2 : comportement typique des sols sollicitation triaxiale drainé (Canou et al.	23
Figure II.3 : Variation de volume sous l'effet de la charge uniaxiale (Luong et Habib,	24
Figure II.4 : Comportement typiques des sols sous sollicitation non drainée (J. Canou	25
Figure II.5 : Essais non drainée sur un sable dense : (a) courbe de cisaillement.....	26
Figure II.6 : Effet de la teneur en eau sur la cohésion et l'angle de frottement.....	27
Figure II.7 : effet de l'humidité sur le chargement de volume en fonction de.....	28
Figure II.8 : effet de la teneur en fines sur le comportement non drainé d'un mélange sable-limon soumis à une pression confinée de 100 Kpa (Arab, 2009).....	29
Figure II.9 : Effet de la proportion de fines sur le comportement drainé d'un mélange sable-limon (Arab, 2009).....	29
Figure II.10 : Chantier de compactage dynamique du sol.....	32
Figure II.11 : Vibro-compactage du sol (Hausmann, M.R 1990).....	33
Figure II.12 : schéma de réalisation de colonnes ballastée (Arab et al, 2012).....	34
Figure II.13 : principe du pré chargement pour e contrôle des tassements (Bell, 1993)	36

Figure II.14 : Technique de drainage (Halbigue, 2022).....	37
Figure II.15 : technique de congélation (Halbigue ,2022).....	39
Figure II.16 : Chantier d'un traitement à la chaux du sol (Rouabhia, 2017).....	41
Figure II.17 : Chantier de traitement au ciment du sol (Boutira, 2021).....	41
Figure II.18 : principe de la technique électro-osmose (Gadouri, 2017).....	43
Figure III.1 : Essai d'évaluation de taux de carbonates.....	47
Figure III.2 : Etapes de l'essai de bleu de méthylène.....	48
Figure III.3 : Vérification des auréoles.....	49
Figure III.4 : dispositif d'essai de détermination de la teneur en sulfates.....	50
Figure III.5 : Analyse granulométrique par tamisage.....	52
Figure III.6 : Appareillage d'analyse granulométrique par sédimentométrie.....	52
Figure III.7 : Courbe granulométrique de sable limoneux.....	53
Figure III.8 : Essai de la masse volumique absolue du sable limoneux.....	54
Figure III.9 : Appareillage de DRX.....	55
Figure III.10 : Courbe résulte de (DRX).....	55
Figure III.11 : Différents états du sol selon les « limites d'Atterberg ».....	56
Figure III.12 : Détermination des limite d'Atterberg.....	57
Figure III.13 : Préparation du mélange.....	59
Figure III.14 : Essai Proctor : (a) Moule Proctor; (b) Dame automatique.....	59
Figure III.15 : Eprouvettes après démoulage.....	60
Figure III.16: Préparation des échantillons pour essais de cisaillement.....	61
Figure III.17 : Accessoires de la boîte de cisaillement.....	61
Figure III.18 : positionnement de l'échantillon dans la boîte.....	62
Figure III.19 : Placement de l'échantillon dans la boîte de cisaillement.....	62
Figure III.20 : Application de la charge dans l'appareil de cisaillement.....	62
Figure III.21 : Ajustement du niveau avant l'essai.....	63
Figure III.22: [a] Réglage du temps d'acquisition, [b] Réglage de la vitesse de l'essai.....	64
Figure III.23 : Remplissage de la boîte de cisaillement avec l'eau distillée.....	64
Figure III. 24: Réglage de la vitesse de l'essai CD.....	65

Figure III.25 : Echantillons après l'essai de cisaillement : (a) stockage des échantillons.....	66
Figure III.26 : Tamiseuse automatique.....	66
Figure IV.1 : Histogrammes représentant les limites d'Atterberg des mélanges (sable limoneux/ fibres PVC).....	69
Figure VI.2 : Résultats de l'essai de Proctor des mélanges de sable limoneux avec 1.5 % de fibres de PVC.....	70
Figure IV.3 : Résultats de l'essai de Proctor du sable limoneux avec 3 % de fibre de PVC.....	71
Figure IV.4 : Résultats de l'essai de Proctor des mélanges de sable limoneux avec 4.5 % de fibres PVC.....	72
Figure IV.5 : Histogramme représentant la densité sèche maximale pour les différents mélanges.....	72
Figure IV.6 : courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux.....	73
Figure IV. 7: courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 1.5% PVC0.....	74
Figure IV.8 : Courbe de déplacement vertical lors du cisaillement des éprouvettes composées de sable limoneux et 1.5% PVC 0.....	74
Figure IV.9 : courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 1.5% PVC1.....	75
Figure IV.10 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 1.5% PVC2.....	75
Figure IV.11 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 1.5% PVC3.....	76
Figure IV.12 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 3% PVC0.....	76
Figure IV.13 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 3% PVC1.....	77
Figure IV.14 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 3% PVC2.....	77
Figure IV.15 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 3% PVC3.....	78
Figure IV.16 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 4.5% PVC0.....	78
Figure IV.17 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 4.5% PVC1.....	79

Figure IV.18 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 4.5% PVC2.....	79
Figure IV.19 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisée sur sable limoneux + 4.5% PVC3.....	80
Figure IV.20 : Valeurs des cohésions non drainées pour les différents mélanges.....	80
Figure IV.21 : Courbes de cisaillement direct (CD) réalisé sur le sable limoneux.....	81
Figure IV.22 : Courbes de cisaillement direct (CD) réalisée sur le sable limoneux + 1.5 % PVC1.....	81
Figure IV.23 : Courbes de cisaillement direct (CD) réalisé sur le sable limoneux + 3 % PVC1.....	82
Figure IV.24 : Courbes de cisaillement direct (CD) réalisé sur le sable limoneux + 4.5 % PVC1.....	82
Figure IV.25: Courbes de cisaillement direct (CD) réalisée sur le sable limoneux + 1.5 % PVC2.....	83
Figure IV.25: Courbes de cisaillement direct (CD) réalisée sur le sable limoneux + 1.5 % PVC3.....	83
Figure IV.26 : Courbes de cisaillement direct (CD) réalisé sur le sable limoneux + 3 % PVC2.....	84
Figure IV.27 : Courbes de cisaillement direct (CD) réalisée sur le sable limoneux + 4.5 % PVC2.....	84
Figure IV.28 : Valeurs des cohésions drainées et des angles de frottement interne pour les différents mélanges.....	85

Liste de tableaux

Tableau III.1 : taux de carbonates présents dans le sable limoneux.....	48
Tableau III.2 : Résultats de l'essai de VBS pour le sable limoneux.....	49
Tableau III.3 : Résultats de l'essai de teneur en sulfates.....	50
Tableau III.4 : Résultats de l'essai de teneur en matières organiques.....	51
Tableau III.5 : La masse volumique absolue du sable limoneux.....	54
Tableau III.6 : Résultats de l'essai de limite de liquidité du sable limoneux naturel	57
Tableau III.7 : Résultats de l'essai de limite de plasticité du sable limoneux.....	58
Tableau III.8 : classification indice de plasticité et degré de plasticité.....	58
Tableau III.9 : Dimensions des fibres plastiques utilisées.....	66

Introduction générale

Introduction générale

Dans le contexte actuel de développement durable, la valorisation des déchets plastiques constitue un enjeu majeur à la fois environnemental, économique et technique, parmi ces déchets, le PVC, largement utilisé dans les secteurs de la construction, de la menuiserie et de l'emballage, présente des caractéristiques physico-chimiques intéressantes telles que la résistance à la dégradation, la flexibilité, et l'imperméabilité. Cependant, sa non-biodégradabilité et sa forte présence dans les décharges et les milieux naturels posent un problème environnemental urgent, face à cette problématique, l'idée d'intégrer les déchets plastiques – notamment le PVC – dans les matériaux de construction, et plus précisément dans l'amélioration des sols, suscite un intérêt croissant.

Le sable limoneux, est un sol à granulométrie mixte composé à la fois de particules sableuses grossières et de fines limoneuses, présente une résistance mécanique modérée et une stabilité variable selon sa teneur en humidité, ce type de sol, souvent rencontré dans de nombreuses régions géographiques, peut poser de défis dans les travaux de terrassements et de fondation, en raison de sa faible cohésion, de son comportement différentiel, dans cette optique, plusieurs recherches ont été menées pour explorer des solutions innovantes de stabilisation, notamment par l'ajout de matériaux recyclés.

L'ajout de plastique de type PVC broyé dans le sable limoneux apparaît comme une alternative prometteuse permettant d'améliorer ses propriétés géotechniques, notamment la résistance au cisaillement, la compressibilité, ainsi que le comportement à long terme face à la variation d'humidité. Sur en effet, le PVC peut agir comme un renfort flexible distribué dans la matrice du sol, limitant le déplacement interne, améliorant la répartition des contraintes et réduisant les déformations.

De plus, les particules plastiques, grâce à leur forme et leur distribution, peuvent modifier la structure des vides dans le sable limoneux, ce qui limite la circulation excessive de l'eau et réduire ainsi les effets néfastes liés à la saturation, tels que la perte de portance ou le gonflement. Plusieurs études expérimentales ont mis en évidence une augmentation significative de la résistance au cisaillement et une amélioration de la stabilité volumétrique du sol modifié, en fonction du type, de la taille et du pourcentage d'ajout des plastiques recyclés.

L'intégration de PVC dans les sols n'offre pas seulement des bénéfices techniques, elle représente également un choix écologiquement responsable en réduisant la quantité de déchets plastiques mis en décharge, tout en réduisant les coûts liés à l'utilisation de liants traditionnels comme la chaux ou le ciment, toutefois, la performance de cette technique reste tributaire de

Introduction générale

nombreux paramètres, notamment les propriétés du sol à traiter, les conditions environnementales et les caractéristiques des déchets ajoutés.

Dans ce contexte, cette étude soulève la problématique suivante :

Comment l'incorporation de déchets plastiques (PVC) selon différentes proportions et méthodes de mélange, influence – t-elle la résistance au cisaillement et le comportement global des sols limoneux ? Et peut –on considérer ce type de traitement comme une solution écologique et économique pour améliorer les performances de ces sols dans les projets de génie civil ?

Ainsi, cette étude vise à analyser l'impact de l'ajout de déchets plastiques en PVC sur la résistance mécanique du sable limoneux, à travers une série d'essais de laboratoire (cisaillement direct et Proctor), dans le but de proposer une solution de renforcement simple, économique et durable pour les sols à faible portance.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence de ces ajoutes de PVC sur les caractéristiques du sol et à déterminer leur potentiel en tant que solutions durables pour stabiliser les sols limoneux.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres détaillent les aspects théoriques et pratiques de ce travail.

Le premier chapitre : Présente des informations sur le recyclage des déchets plastiques.

Le deuxième chapitre : présente des informations sur le comportement des sols limoneux et techniques de stabilisation.

Le troisième chapitre : est consacré aux procédures expérimentales utilisées ainsi qu'aux matériaux à utiliser dans l'amélioration des sols (chaux et différents pourcentages de PVC), en plus des expériences mécaniques telles que l'essai Proctor et l'essai de cisaillement direct en conditions Consolidé Drainé (CD) et non consolidé non drainé (UU).

Le quatrième chapitre : est consacré à la présentation des résultats et leur interprétation.

Enfin, nous résumons les principales conclusions des résultats obtenus pour l'amélioration des sols à l'aide des déchets plastiques.

Chapitre I

Recyclage des déchets plastiques

I.1 Introduction :

L'augmentation de l'utilisation de plastique s'accompagne d'une augmentation des déchets plastiques dans la nature. Cela soulève des problèmes liés à l'environnement : les plastiques usagés connaissent plusieurs destins : abandonnés dans la nature, mis en décharge, incinérés, et au mieux recyclés, ... Actuellement, la recherche travaille également sur la fabrication de nouveaux plastiques moins problématiques au niveau environnemental : « les bioplastiques ». Le recyclage, des déchets ménagers comme des déchets industriels, est une pratique de plus en plus intensive que les autorités publiques cherchent à promouvoir. Ce qui incite les entreprises à valoriser leurs déchets de production dans des voies de recyclage, afin de diminuer les coûts (coûts d'élimination, coût d'achat de matières premières, prix de revente des matières) tout en développant une image verte et en prévenant les évolutions législatives, toujours plus exigeantes dans ce domaine. On présente dans la suite de ce chapitre les différents types de plastiques et les diverses méthodes de recyclage.

I.2 Historique :

Au cours du dernier siècle et demi, les humains ont appris à fabriquer des polymères synthétiques en utilisant des matériaux naturels tel que la cellulose ou des atomes de carbone qui fournissent du pétrole et d'autres combustibles fossiles. Ces polymères synthétiques sont constitués de longues chaînes d'atomes liés, ce qui les rend solide, légers et flexibles en d'autres termes, les rends plastiques.

En 1869, le premier plastique artificiel a été inventé par l'inventeur John Wesley Hyatt connu sans le nom de celluloïd, dont le but était de réduire la dépendance à l'ivoire dans les industries.

En 1907, le plastique a été développé par l'inventeur Leo Baekeland, le premier plastique entièrement synthétique appelé bakélite.

Pendant la seconde guerre mondiale (1939-1950) le besoin de plastique a augmenté à mesure qu'il était utilisé dans l'équipement militaire, et après la guerre le plastique est devenu largement disponible.

Dans les années 1960, l'accumulation de déchets plastiques a commencé à poser des problèmes environnementaux et des crises en raison de sa résistance à la décomposition naturelle.

Au cours de dernières décennies, la prise de conscience des risques environnementaux des déchets plastique s'est accrue et de nouvelles technologies de recyclage et de conversion des déchets plastique ont vu le jour.

I.3 Définition de plastique :

Le plastique ou ce que l'on appelle les matières plastiques (Figure I.1) est un matériau facile à former composé principalement de polymères, qui sont des composés organiques contenant de grosses molécules obtenues par polymérisation de monomères. Les plastiques sont fabriqués à partir de matière première tels que le pétrole ou le gaz naturel.



Figure I.1 : Produits plastiques (Abdoune, 2019)

I.4 Composition et origine du plastique :

Les plastiques se divisent en deux grandes catégories :

- Les thermodurcissables, qui une fois durcis par la chaleur, ne peuvent plus être ramollis. Leur structure devient irréversible après le moulage.
- Les thermoplastiques, en revanche peuvent être fondus puis solidifiés à plusieurs reprises. Ils se ramollissent à chaud et durcissent à froid de manière réversible.

Aujourd'hui, les matières plastiques occupent une place essentielle dans la fabrication des produits de consommation, grâce à leur légèreté, leur résistance et leur faible coût.

Ces matériaux sont généralement composés de trios éléments principaux :

- ✓ La résine de base (polymère), qui constitue la structure fondamentale du plastique.
- ✓ Les adjuvants, qui facilitent la mise en forme ou améliorent certaines propriétés mécaniques ou physiques.
- ✓ Les additifs, qui apportent des caractéristiques spécifiques comme la couleur, ou la souplesse (**Saadi, 2022**).

I.5 Types de plastiques :

Il y a une grande variété de plastiques :

a. Les thermoplastiques :

L'usage prévaut de réserver le terme de matière plastique à trois grandes familles de matériaux, les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères, dont la structure, les propriétés physico-chimiques et de mise en œuvre (comportement sous l'action de la chaleur et de la pression) diffèrent totalement.

➤ **Le polyéthylène téréphtalate PET :**

Bouteilles pour boissons gazeuses (Figure I.2).



Figure I.2 : Déchets de bouteilles en PET

➤ **Le polyéthylène haute densité PEHD :**

Flacons, bouchons, articles ménagers, jouets, flacons tuyaux d'évacuation (Figure I.2), réservoirs à carburant.



Figure I.3 : Tubes en PEHD utilisée dans les réseaux d'évacuation

➤ **Le polychlorure de vinyle PVC :**

Châssis de fenêtres, tuyaux d'évacuation (Figure I.4), cartes de crédits, revêtement divers, blisters, revêtements des sols.



Figure I.4 : Le PVC (<https://arapack.fr/quest-ce-que-le-polychlorure-de-vinyle/>)

➤ **Le polyéthylène à basse densité PEBD :**

Feuilles d'emballage, tuyaux d'irrigation, sacs pour fruits et légumes (figure I.4), joutes, revêtements.



Figure I.5 : Les déchets des sacs plastiques (<https://www.mon-emballage.com>)

➤ **Polypropylène PP :**

Pots à yaourt, barquettes pour margarine, tapis et fibres, caisses à claire-voie, emballages médicaux (figure I.6).



Figure I. 6: Seringue médicale fabrique en PP (<https://www.123rf.com/>)

➤ **Polystyrène PS :**

Emballages à usage unique pour viande et charcuterie, glaces, appareils électriques, vaisselle jetable (Figure I.7).



Figure I.7: Boites en plastique PS (<https://www.123rf.com/>)

b. Les thermodurcissables :

Ce sont des plastiques qui prennent une forme définitive au premier refroidissement.

La réversibilité de forme est impossible car ils ne se ramollissent plus une fois moulés. A l'inverse des thermoplastiques, la mobilité thermique est réduite. Des matières plastiques qui sous l'action de la chaleur, se durcissent progressivement pour atteindre un état solide irréversible. Ces matières ne peuvent être recyclées. Exemples : Polyuréthane (PUR), silicone.

➤ **Polyuréthane PUR :**

Mousse de confort pour coussins et matelas, appuie-têtes et accoudoirs, éponges.

I.6 Avantage des matières plastiques :

L'utilisation croissante des matières plastiques s'explique par un ensemble de propriétés avantageuses, parmi lesquelles :

- ❖ Une grande flexibilité et une capacité d'adaptation permettant de répondre à divers besoins techniques.
- ❖ Une légèreté remarquable comparée à d'autres matériaux, ce qui permet de réduire la consommation de carburant lors du transport.
- ❖ Une longue durée de vie et une résistance élevée, qui assurent une utilisation prolongée.
- ❖ Une forte résistance aux produits chimiques, à l'humidité et aux chocs, ce qui les rend adaptés à de nombreuses applications.

D'excellentes propriétés d'isolation thermique et électrique, utiles dans les secteurs industriel et électronique.

I.7 Inconvénients des matières plastiques :

Malgré leurs nombreux atouts, la fabrication des plastiques fait appel à des substances chimiques qui peuvent présenter des risques. Ces produits, souvent utilisés comme stabilisants ou colorants, ne font pas toujours l'objet d'évaluations environnementales rigoureuses. Leurs effets potentiels sur la santé humaine et l'environnement demeurent incertains. Un exemple notable est celui des plastifiants, utilisés dans la production de PVC, et qui soulèvent de nombreuses préoccupations sanitaires et écologiques.

I.8 Domaines d'Applications et utilisation de polychlorure de vinyle (PVC) :

C'est le plus utilisé des plastiques, on le retrouve aussi bien en matériel chaudronné pour l'industrie chimique qu'en construction mécanique, dans l'industrie électrique et dans les panneaux d'enseignes publicitaires (**site 1**).

I.8.1 Bâtiment :

Dans la construction, le PVC est apprécié pour sa durabilité, son imperméabilité, et sa facilité d'entretien, il joue aussi un rôle dans l'isolation thermique et sonore, tout en offrant un bon rapport qualité /prix, ce qui améliore la qualité des bâtiments sur plusieurs plans :

✓ Durabilité :

Le PVC ne laisse pas passer l'eau, ne se corrode pas, ne pourrait pas et résiste très bien aux rayons UV, il est donc fait pour durer.

✓ Hygiène :

Sa surface est lisse et dense comprendre qu'elle n'autorise pas la prolifération de germes.

✓ Isolation thermique et performance énergétique :

Comme tous les autres plastiques, le PVC est un très mauvais conducteur de chaleur il est donc un très bon isolant.

✓ Confort acoustique :

Les fenêtres en PVC répondent à des normes acoustiques sévères, elles font barrière aux nuisances sonores, telles que celles auxquelles sont exposés les riverains des aéroports.

✓ Performance économique :

Les produits en PVC associent performances d'usage et de prix, ils sont souvent moins chers à l'achat que leurs principaux concurrents, il est facile à mettre en œuvre, surtout, ils ont besoin de très d'entretien, ce qui réduit d'autant les frais inhérents à leur utilisation.

✓ Sécurité incendie :

Le PVC est naturellement ignifuge, ce qui lui confère un avantage de poids face à d'autres matériaux.

I.9 Impact du PVC sur l'environnement et la santé de l'être humain :

Le polychlorure de vinyle (PVC) est une matière plastique composée de plusieurs éléments, dont des résidus de monomère (VCM) et des additifs, ces composants peuvent poser un risque pour la santé humaine, notamment dans les environnements industriels. Bien que la concentration en VCM ait diminué depuis les années 1974, l'impact sanitaire d'une exposition prolongée reste incertain, l'inhalation des poussières de PVC pourrait entraîner des troubles respiratoires, ce qui souligne la nécessité de recherches approfondies sur leurs effets à long terme (**site 2**).

❖ Le plastique est un matériau non durable :

La majorité des plastiques sont issus de ressources fossiles et ne sont pas recyclables, leur production contribue à l'épuisement des ressources naturelles et à pollution environnementale, en plus, leur durée de vie excessive les rend nuisibles à long terme.

❖ Décomposition lente du plastique :

Les déchets plastiques mettent des siècles à se dégrader, libérant des substances toxiques dans l'environnement, ils se fragmentent en microparticules, appelées microparticules, qui s'accumulent dans les milieux naturels et posent un défi majeur à la biodiversité.

❖ Le plastique est dangereux pour la faune :

Les déchets plastiques ont un effet dévastateur sur la faune marine, de nombreux animaux ingèrent ces matériaux ou s'y retrouvent piégés, ce qui peut conduire à leur disparition, des exemples concrets incluent certaines espèces menacées comme les phoques moines d'Hawaï ou les tortues caouannes du pacifique ([site 3](#)).

I.10 Recyclage de plastique :

Le recyclage des plastiques est un processus qui consiste à collecter, traiter et transformer les déchets plastiques en nouveaux produits pour préserver les ressources naturelles et limiter l'impact environnemental de plastique.

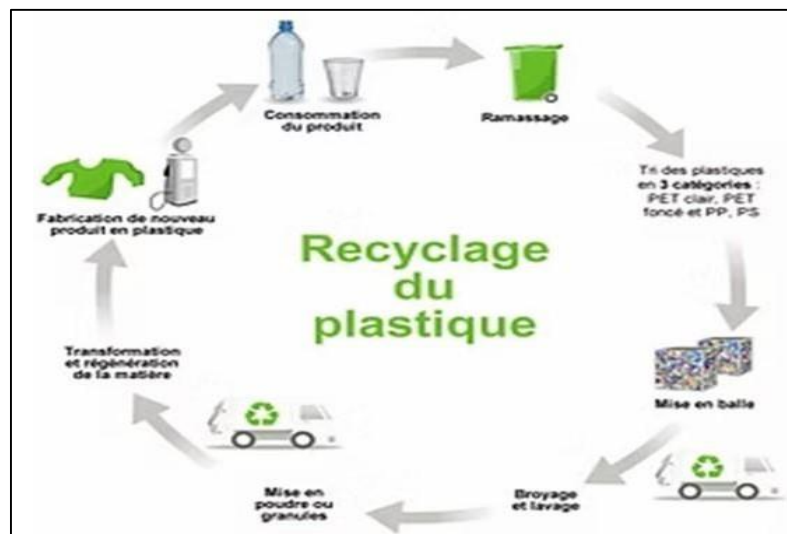


Figure I.8 : recyclage du plastique (Saadi, 2022).

I.11 Le principe du recyclage :

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R c'est-à-dire :

Réduire : réduire la consommation de matériaux et de ressources pour réduire la production de plastiques.

Réutilisation : ce processus permet de donner aux produits ou matériaux usagés une nouvelle utilisation au lieu de les éliminer.

Recyclage : désigne la collecte et le traitement des déchets pour le recyclage.

I.12 Les étapes de recyclage des déchets plastiques :

❖ **Collecte** : Les plastiques sont collectés auprès des ménages et entreprises, souvent via des bacs de tri.

❖ **Tri** : Les déchets sont triés par types de plastique et par couleur dans des centres spécialisés.

❖ **Lavage** : Les plastiques sont déchiquetés à petits morceaux.

❖ **Transformation** : Les paillettes sont ensuite fondues et reformées en nouveaux produits.

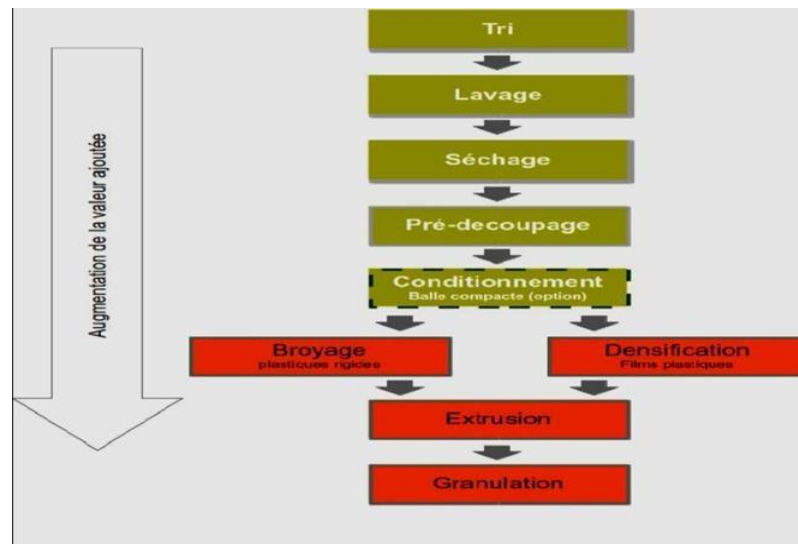


Figure I. 9 : schématise les différentes étapes du processus de recyclage du plastique.

I.13 Présentation de matériaux PVC :

Etant donné que le PVC sera utilisé pour renforcer le sable limoneux, il sera présenté en détails dans la suite du présent chapitre.

I.13.1 Définition de PVC :

Le PVC est l'abréviation de polychlorure de vinyle, est un matériau plastique thermoplastique fabriquée par la polymérisation de chlore de vinyle, il se compose de 57% chlore obtenu à partir de sel et de 43% éthylène (hydrogéné et carbone) obtenu à partir de

pétrole ou gaz naturel le PVC ce. Présente sous diverses formes à tuyaux, câbles, dispositifs médicaux.

Comme tous les polymères, le PVC est une longue série composée d'éléments identiques ou de monomères, pour le PVC, il s'agit d'un monomère de chlorure de vinyle ($\text{CH}_2=\text{CH-Cl}$) (**Figure I.10**).

Le PVC qui représente environ 10 % du marché de l'emballage alimentaire, est mélange, lors de sa production, à des additifs (plastifiants, stabilisants) qui améliorent ses propriétés intrinsèques ou permettent de mieux le travailler (**Senouci, 2015**).

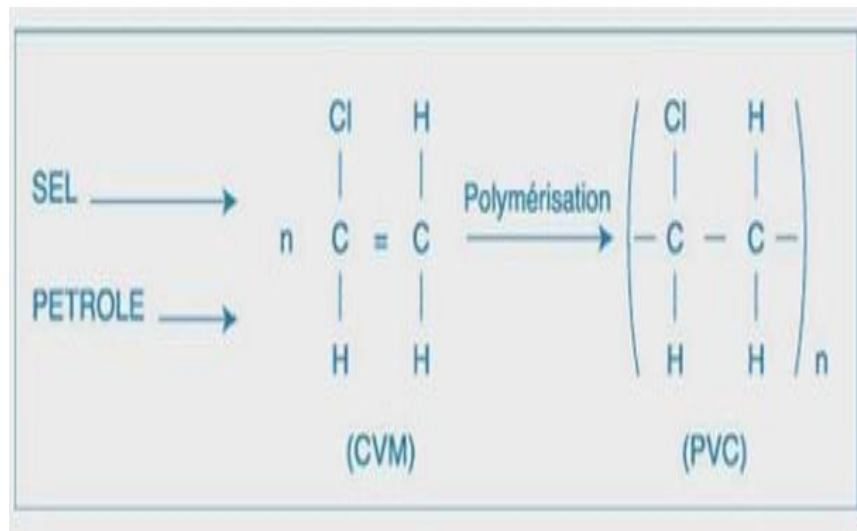


Figure I.10: Polymérisation du PVC

I.13.2 Fabrication de PVC :

Le chlorure de vinyle subit un processus de polymérisation dans un réacteur où des pressions élevées conduisent à la liaison de monomères pour former du PVC, après quoi le PVC est transformé en poudre en ajoutant des plastifiants et des composants pour améliorer ses propriétés (**Moudjeb, 2020**).

La fabrication du PVC peut se faire selon différentes techniques de polymérisation selon les conditions et le résultat souhaité :

a. Polymérisation en masse :

Elle repose sur une réaction à haute température favorisant la condensation, le mélange devient visqueux et peut se solidifier selon le degré de polymérisation (**Mercier, 2009**).

b. Polymérisation en solution :

Cette méthode permet d'obtenir des polymères plus homogènes, le polymère est dissous dans un solvant et récupéré par évaporation ou ajout d'un excès de solvant (**Boukehil, 2012 ; Perrin, 1984**).

c. Polymérisation en émulsion :

Réalisée avec des agents émulsifiants (comme le savon), elle donne une réaction rapide, mais la pureté du polymère est souvent affectée par la présence de ces agents (**Moudjeb, 2020**).

d. Polymérisation en suspension :

Très utilisée pour le PVC, cette technique implique la dispersion du monomère en gouttelettes dans un liquide sous agitation mécanique.

I.13.3 Propriétés du PVC :

Le PVC est reconnu pour ses nombreuses propriétés qui allient résistance, durabilité et facilité de façonnage, ce qui en fait un matériau idéal dans divers domaines, parmi lesquels nous pouvons citer (**site 4**).

a. Propriétés physiques du PVC :

- ✓ Densité environ 1,38 g/cm à 1,45.
- ✓ En générale opaque, il peut être traité é pour devenir partiellement ou totalement transparent.
- ✓ Excellente capacité d'isolation électrique.
- ✓ Résistance à l'eau et à l'humidité.

b. Propriété mécanique du PVC :

- ✓ Le pvc résiste bien aux contraintes mécaniques.
- ✓ Il présente une solidité élevée.
- ✓ La résistance aux chocs est présente, sur tout après traitement. ($< -100^{\circ}\text{C}$).
- ✓ Il peut être facilement moulé par chaleur ou injection (**Boutamine, 2013**).

c. Propriété thermique du PVC :

- ✓ Plage de température d'utilisation de 0 à 60 c.
- ✓ Expansion modérée lorsqu'il est exposé à la chaleur.
- ✓ Résistance à la chaleur se décompose à partir de 140-160c.
- ✓ Décompose sans fondre.

d. Propriété chimique du PVC :

- ✓ Résistant aux acides et aux bases.
- ✓ Non résistant aux solvants comme le benzène.
- ✓ Résistant aux huiles et aux alcools.
- ✓ Produit du chlore gazeux toxique lors de la combustion

I.13.4 Stabilisants du PVC :

Dans le domaine de la transformation des polymères, les stabilisants jouent un rôle clé dans la préservation du pvc face aux agressions extérieures telles que la chaleur, la lumière ou l'oxygène. Ces additifs permettent de limiter, voire empêcher, certaines réactions chimiques susceptibles d'altérer les propriétés du matériau au fil du temps, notamment sa résistance et ses performances

Un bon stabilisant doit idéalement pouvoir neutraliser les sous-produits acides générés lors de la dégradation thermique, agir comme un agent antioxydant, et offrir une protection contre les rayons ultraviolets

Les formules de stabilisants les plus répandues incluent :

- **Les stabilisants au plomb**, historiquement très répandus, tels que les stéarates et les phosphites de plomb
- **Les stabilisants à base d'étain**, notamment les composés organostanniques utilisés pour leurs bonnes performances thermiques.
- **Les stabilisants mixtes**, regroupant des combinaisons comme Ba /Cd, Ba/Zn, ou Ca/Zn.

I.13.5. Dégradation du PVC :

La dégradation du polychlorure de vinyle PVC est un processus chimique organique qui se traduit par une diminution du taux de carbone dans la structure moléculaire. Ce phénomène entraîne généralement une altération des propriétés physiques, électriques ou optiques du matériau.

Ce processus débute souvent à ne partir de points faibles dans la structure du polymère, comme les (**ramifications instauration groupe oxydes**), les doubles liaisons ou certains groupements sensibles à l'oxydation, on distingue principalement deux types de dégradation affectant le PVC.

a. Dégradation thermique :

Le PVC fait partie des polymères sensibles à la chaleur, lorsqu'il est exposé à des températures élevées, il libère du chlorure d'hydrogène (HCL) sous forme gazeuse, cette dégradation est le résultat d'une rupture progressive des liaisons chimiques au sein du polymère

Les conséquences de cette dégradation sont multiples :

- **Déshydrochloruration**, ou le HCL est éliminé du polymère.
- **Oxydation**, qui aggrave les effets de la dégradation.
- **Réticulation**, qui peut modifier la structure tridimensionnelle.
- **Altérations chromatique**, résultant en un changement de couleur.

Ce processus aboutit à la formation de structures insaturées avec des longueurs variables selon les conditions de dégradation (**Khodour, 2000**).

b. Dégradation photolyse :

Sous l'effet de facteurs comme la lumière, le cisaillement mécanique ou une température avoisinante le 160 °C, le PVC commence à se décomposer, cela se manifeste par une libération de HCL, causée par la rupture des liaisons entre les atomes de carbone et de chlore.

Ce mécanisme déclenche une réaction en chaîne, créant des doubles liaisons conjuguées tout au long de la chaîne polymère, la structure du PVC devient alors de plus en plus instable, ce qui se traduit visuellement par un changement de couleur (**Garici, 1997**).

I.13.6. Recyclage et valorisation de PVC :

L'importance du recyclage du PVC ne cesse de croître en raison de :

- Sa nature non biodégradable.
- Son impact environnemental lors de l'incinération ou de l'enfouissement.
- Sa présence abondante dans les déchets plastiques industriels et domestique.

I.13.7. Gestion des déchets de polychlorure de vinyle (PVC) :

Afin de mieux comprendre les différentes approches de gestion des déchets de PVC, la commission européenne a commandé quatre études techniques, ces travaux ont porté sur les principales options suivantes (**site 5**) :

- Le recyclage mécanique.
- Le recyclage chimique.
- L'incinération à des fins énergétiques.
- La mise en décharge contrôlée (**Boutamine, 2013**).

➤ **Recyclage mécanique :**

Le recyclage mécanique désigne les procédés par lesquels les déchets de PVC sont traités uniquement par des moyens physiques, sans transformation chimique, ces étapes incluent généralement le déchiquetage, le tamisage puis le broyage, jusqu'à l'obtention d'une poudre pouvant être utilisée pour fabriquer de nouveaux produits.

Il est important de noter que la qualité du matériau recyclé dépend fortement de plusieurs facteurs, notamment le degré de contamination et la nature des déchets collectés, plus la matière d'origine est propre et homogène, plus le produit recyclé sera de qualité.

La qualité du PVC recyclé détermine dans quelle mesure il peut remplacer le matériau vierge :

- Si le matériau est de **haute qualité**, il peut être réutilisé dans les mêmes applications que le PVC d'origine
- En revanche, si sa qualité est **plus faible**, il est réaffecté à des produits moins exigeants techniquement.

➤ **Recyclage chimique :**

Le recyclage chimique constitue une approche avancée pour la gestion des déchets plastique, il repose sur la décomposition des chaînes polymérique en unités plus petites, telles que des monomères ou d'autres composés pouvant servir de matières premières dans divers processus industriels.

Ce procédé va bien au-delà du simple réemploi de plastique, puis qu'il permet également de récupérer des substances chimiques des bases utiles dans de nombreuses applications.

Dans le cas spécifique du PVC, la présence de chlore dans sa structure moléculaire introduit une étape supplémentaire, lors du traitement chimique, ce chlore est généralement libéré sous forme **d'acide chlorhydrique (HCL)**, un composé nécessitant une gestion soigneuse en raison de sa réactivité.

Selon la technologie mise en œuvre cet acide peut soit être **purifié et réutilisé**, soit **neutralisé chimiquement** afin d'éviter toute nuisance environnementale, les produits issus de cette neutralisation peuvent être valorisés ou éliminés de manière contrôlée.

Il est également important de souligner que les déchets plastiques mélangés ou fortement contaminés sont souvent orientés vers un **recyclage à valeur réduite (down- cycline)**, ce qui signifie qu'ils seront transformés en produits aux exigences techniques moindres par rapport au matériau d'origine.

➤ Incinération :

Comme tous les déchets plastiques ne sont pas recyclables, une partie doit être traitée par incinération afin de réduire considérablement leur volume.

Lorsqu'il est brûlé, le PVC se décompose en dioxyde de carbone (CO_2), en vapeur d'eau, en acide chlorhydrique (HCL) et en divers chlorures métallique, environ la moitié du chlore émis lors de l'incinération provient du PVC, tandis que l'autre moitié résulte de matières organiques comme le bois, le papier, les résidus végétaux et les aliments contenant du sel.

Dioxyde de carbone (CO_2) : en raison de sa composition chimique spécifique, le PVC génère moins de CO_2 par kilogramme que d'autres matériaux comme le pétrole, le charbon, le bois ou certains plastiques, il contribue donc dans une moindre mesure à l'effet de serre.

Acide chlorhydrique (HCL) : l'incinération du PVC libère du HCL dans les fumées, ce gaz doit être récupéré ou neutralisé avant d'être rejeté dans l'atmosphère, des agents basiques comme la chaux sont utilisés pour transformer cet acide en chlorure de calcium ou en chlorure de sodium, plus sûrs pour l'environnement (**Boutamine, 2013**).

➤ Mise en décharge :

La mise en décharge reste le moyen le plus courant pour éliminer les déchets en PVC, bien qu'il n'existe pas de données précises sur les quantités, certaines estimations évoquent environ 2,9 millions de tonnes enfouies chaque année, et plusieurs dizaines de millions de tonnes pourraient avoir été stockées au cours des trente dernières années.

Depuis 2001, les états européens sont tenus d'appliquer la directive européenne, qui impose des normes environnementales aux sites de décharge, comme l'étanchéité du sol, la collecte des lixiviats et le contrôle des émissions de gaz.

Les déchets enfouis, y compris le PVC, subissent divers changements chimiques et biologiques au fil du temps, influencés par des facteurs tels que la température, l'humidité, la présence d'oxygène et l'activité microbienne, le processus suit généralement quatre phases:

- Une phase aérobie initiale courte
- Une phase acide anaérobie
- Une phase méthanogène (pouvant durer plusieurs siècles)
- Puis une phase aérobie finale.

I. 14 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts fondamentaux liés au plastique, en abordant ses différents types, caractéristiques et usages, nous avons également mis en lumière le problème des déchets plastiques et leurs impacts négatifs sur l'environnement et la santé publique. De plus, nous avons exploré le recyclage comme une solution durable et efficace, en détaillant ses types et ses avantages écologiques et économique.

Cette introduction théorique constitue une base solide pour comprendre les aspects pratiques qui seront traités ultérieurement, notamment en ce qui concerne les lignes de recyclage et leurs composants technique.

Chapitre II

*Comportement des sols limoneux et techniques de
stabilisation*

II.1 Introduction :

Les sols limoneux sont des sols à grains fins qui ont une grande capacité de rétention d'eau, ce qui les rend sujets au gonflement et au retrait en fonction des variations de l'humidité. Ce comportement affecte considérablement la stabilité des ouvrages de génie civil, pouvant entraîner un affaissement du sol ou une perte de sa capacité portante. L'étude du comportement de ces sols est donc essentielle pour comprendre leurs propriétés mécaniques et l'influence de facteurs environnementales, permettant ainsi de développer des stratégies efficaces pour améliorer leurs performances. Pour réduire les effets négatifs des sols limoneux, plusieurs techniques de stabilisation sont utilisées pour améliorer leurs performances et d'assurer la stabilité des ouvrages construits dessus.

II.2 comportement mécaniques des sols limoneux :

Lorsqu'un sol est soumis à des charges constantes ou répétées, il présente une variété de comportements et de propriétés mécaniques. Cela est principalement dû aux différents facteurs qui influencent sa déformation sous l'effet des forces extérieures.

De manière générale, les sols peuvent être classés en types homogènes, comme le sable, l'argile et limon, ou en mélanges hétérogènes, comme sable et limon. Cependant, de nombreuses études ont montré que les propriétés physiques d'un mélange de sable et limon diffèrent considérablement de celles d'un sol sableux homogène (**Yamamuro et Lade, 1998 ; Amini et Qi, 2000 ; Naeini, 2001 ; Naeini et Baziar, 2004**). Ces études indiquent que la variation de la taille des particules et la présence de vides plus grande que la taille des fines entraînent l'inactivité de certaines particules d'entre elles lorsqu'elles sont en faible concentration. Ces lorsqu'elles sont en faible particules qu'elles remplissent alors ces vides sans avoir un effet significatif sur la résistance du sol.

II.2.1 Résistance et rupture des sols :

L'effondrement du sol est évalué en analysant sa déformation, sa résistance au cisaillement étant influencée par plusieurs facteurs, notamment la nature du sol, son état physique, l'intensité des charges appliquées et la manière dont elles sont exercées. Selon **M. El Gonnouni (2010)**, un essai de cisaillement permet de tracer une courbe illustrant la relation entre la déformation et la contrainte appliquée sur le sol. Cette courbe peut prendre l'une des deux formes suivantes, en fonction des caractéristiques et des conditions du sol (Figure II.1).

Chapitre II : comportement des sols limoneux et technique de stabilisation

Courbe I : il se caractérise par l'atteinte d'une contrainte maximale ($\tau_{\max}$), représentant l'état de rupture, où le sol continue de se déformer même après une diminution ou une stabilisation de la charge.

Courbe II : il présente une forme asymptotique ; la rupture y est définie de manière arbitraire par une déformation maximale $\tau_{\lim}$ correspondant à la sollicitation σ_{II} . Au-delà de ce seuil, le comportement de la structure devient incompatible avec sa fonction prévue.

La forme de la courbe de déformation dépend du type de sol : un sol dense présente une résistance maximale marquée, comme les argiles à structure intacte lorsqu'elles sont surconsolidées, tandis que les sols lâches et les argiles remaniées ont habituellement un comportement de type asymptotique.

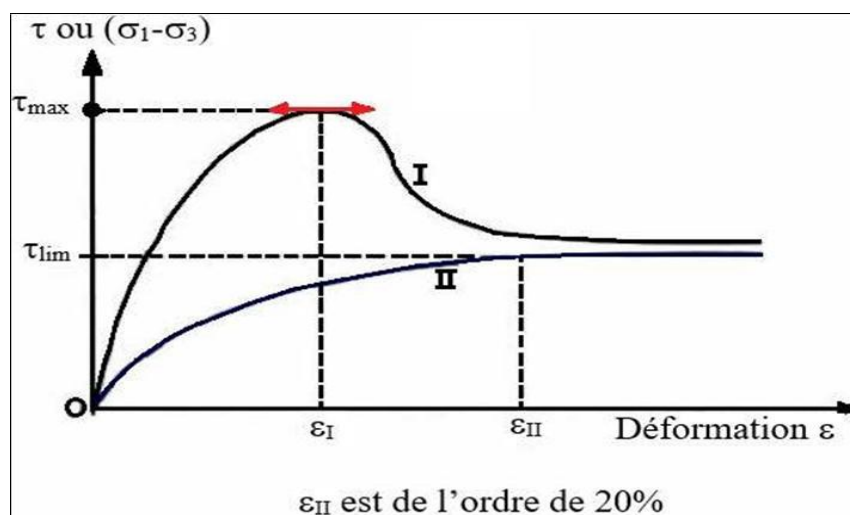


Figure II.1 : Courbe effort - déformation dans un essai de cisaillement

Dans les sols saturés, leur résistance dépend des conditions d'application des charges, car ces conditions influencent la répartition des contraintes entre la phase liquide, représentée par la pression de l'eau interstitielle, et la phase solide, correspondant à la contrainte effective du sol. En conséquence, le comportement du sol peut être classé en deux catégories principales selon sa capacité à drainer l'eau : le comportement drainé et le comportement non drainé.

II.2.2 Comportement drainé du sol :

Lorsqu'il n'y a pas d'eau, le sol adopte systématiquement un comportement drainé. Ce type de comportement traduit la réaction du matériau lorsque l'eau interstitielle circule librement entre les grains pendant l'application de la charge, sans générer de pressions

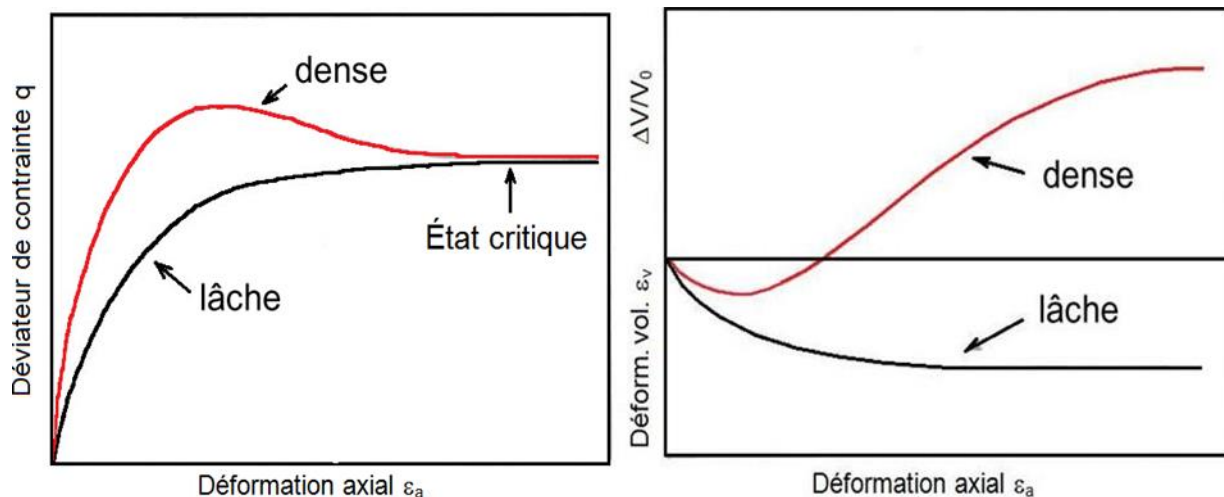
Chapitre II : comportement des sols limoneux et technique de stabilisation

interstitielles excessives. En l'absence ou avec une très faible pression interstitielle, les efforts appliqués sont transmis intégralement au squelette du sol, et les contraintes induites des contraintes effectives. L'application de la charge s'accompagne d'une variation de volume, dont l'ampleur dépend de l'intensité des contraintes exercées.

Lors d'un essai triaxial, sous une compression drainée progressive avec une charge uniforme, où $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, l'échantillon de sol commence à perdre progressivement son volume au fur et à mesure que la différence entre les contraintes principale ($\sigma_1 - \sigma_2$) augmente, cette phase est appelée phase de contractante, résultant du rapprochement et de l'imbrication des particules du sol, elle traduit un mécanisme de densification et de compactage du squelette granulaire, provoqué par les glissements et les rotations des grains sous l'effet des charges appliquées.

A l'opposé, la phase de dilatance survient lorsque les particules du sol s'écartent et se désolidarisent, entraînant une augmentation irréversible du volume sous l'effet des contraintes de cisaillement. Ce phénomène reflète un processus de déstructuration et d'expansion du squelette granulaire.

La transition entre les phases de contractance et de dilatance est influencée par plusieurs facteurs. La figure II.2, selon **Canou et al. (2000)**, illustre les comportements typiques observés lors d'un essai de cisaillement drainé sur sable, qu'il soit initialement lâche ou dense, sous un niveau de contrainte donné.



D'après **Luong (1978)**, les essais triaxiaux conventionnels en conditions drainées, que ce soit en compression ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) ou en extension ($\sigma_1 < \sigma_2 = \sigma_3$), permettent d'identifier le niveau de contrainte marquant la transition entre la déformation volumique contractante et la déformation volumique dilatante. Ce niveau constitue un indicateur clé du comportement du sol, correspondant à l'état critique, associé à un taux de variation volumique nul ($\epsilon_v = 0$), définissant ainsi une plage de déformation stable et modérée avant la rupture, sans être affectée par la porosité initiale du sol.

II.2.3 Comportement non drainé du sol :

Lors d'un essai triaxial sur un sol saturé soumis à une compression uniaxiale, la charge est appliquée suffisamment rapide pour empêcher le drainage de l'eau entre les grains, ce qui entraîne une augmentation de la pression intertielle. Cela conduit le sol à se comporter différemment des matériaux qui réagissent mécaniquement à la charge, en passant par deux phases distinctes : la contraction et la dilatance, qui peuvent être observées à travers les variations de la pression interstitielle (Figure II.3).

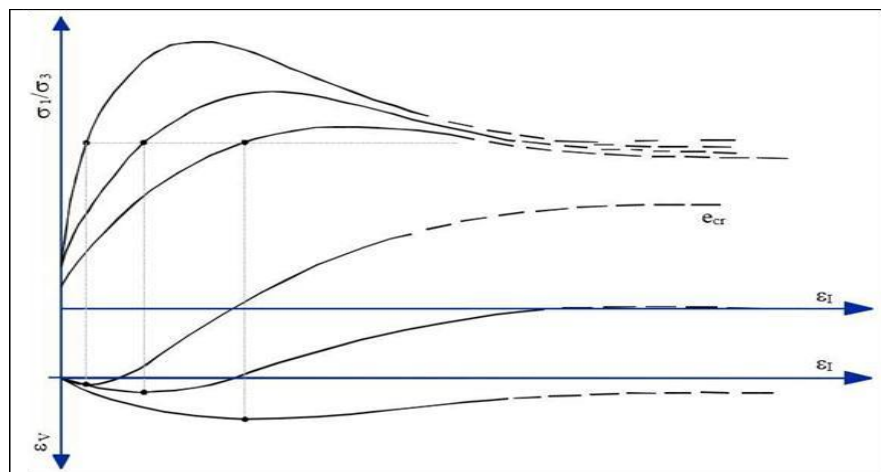


Figure II.3 : Variation de volume sous l'effet de la charge uniaxiale (Luong et Habib, 1978)

Durant la phase de contraction, la pression intertielle augmente car le sol tend à se densifier en raison du glissement et du réarrangement des grains. Ce phénomène reflète un processus naturel de compactage granulaire, entraînant une réduction irréversible du volume du sol sous l'effet du cisaillement.

Luong et Habib (1978) ont défini un niveau de contrainte spécifique où le taux de variation de la pression interstitielle s'inverse lors de l'essai non drainée. Ce niveau

Chapitre II : comportement des sols limoneux et technique de stabilisation

correspond au point où le taux de déformation volumique change lors de l'essai drainé, comme illustré dans la figure II.3.

Ce niveau de contrainte est associé à une condition où le taux de variation volumique est nul ($\epsilon_v = 0$). Indiquant que les grains atteignent un état d'équilibre entre enchevêtrement et désenchevêtrement. A ce stade, la déformation du sol reste limitée et l'angle de frottement demeure constant.

En l'absence de drainage et de variation de volume, la majorité de la contrainte appliquée est transférée au fluide interstitiel entre les grains, sans provoquer de modification significative dans la répartition des forces au sein de la structure granulaire du sol.

La figure II.4 présente des courbes représentatives du comportement non drainé du sol. Une différence notable est observée par rapport à la figure II.2 : les sols denses affichent une réponse relativement stable, tandis que les sols meubles montrent un comportement plus instable, caractérisé par une augmentation marquée de la pression interstitielle, traduisant leur forte sensibilité aux variations de charge.

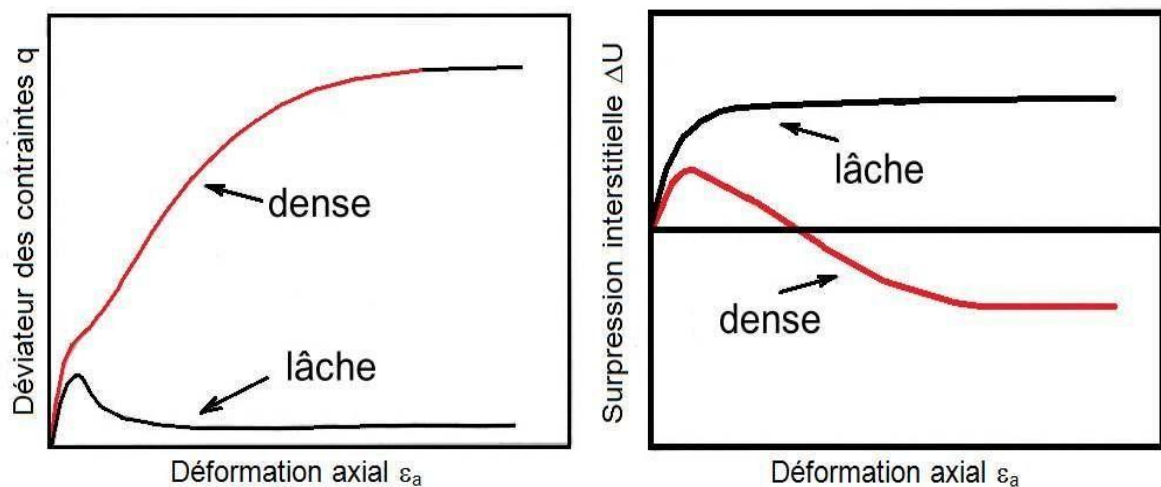


Figure II.4 : Comportement typiques des sols sous sollicitation non drainée (J. Canou et al. 2000)

Canou et al. (2000) ont indiqué que les sols meubles présentent un comportement entièrement contractant lors du cisaillement, avec un taux d'augmentation de la pression interstitielle toujours positif, mais qui se stabilise progressivement, en revanche, les sols denses traversent deux phases distinctes : d'abord une phase contractante avec un taux positif, suivi d'une phase dilatance avec un taux négatif. Ces deux phases se croisent en un point de transition correspondant au passage entre contraction et dilatance, mettant ainsi en

évidence le concept de contrainte critique. La diminution de la pression interstitielle entraîne une réduction de la résistance au cisaillement ultime de l'échantillon.

II.3. Influence de quelques paramètres sur le comportement mécanique :

II.3.1 : Influence de la pression confinement :

L'étude menée par **Della et al. (2011)** a montré que l'augmentation de la pression de confinement contribue significativement à l'amélioration de la résistance au cisaillement des sols sableux. Les résultats indiquent que cette pression accrue permet une progression graduelle de la contrainte jusqu'à atteindre un état de stabilité (Figure II.5).

Par ailleurs, les recherches de **Vaid et Sivathayalan (1995)** ont révélé que la pression confinement ne se limite pas à renforcer la résistance au cisaillement, mais qu'elle joue également un rôle essentiel dans la réduction de la susceptibilité des sables lâches à la liquéfaction.

En effet, la capacité du sol à résister à ce phénomène augmente avec l'élévation de la pression de confinement.

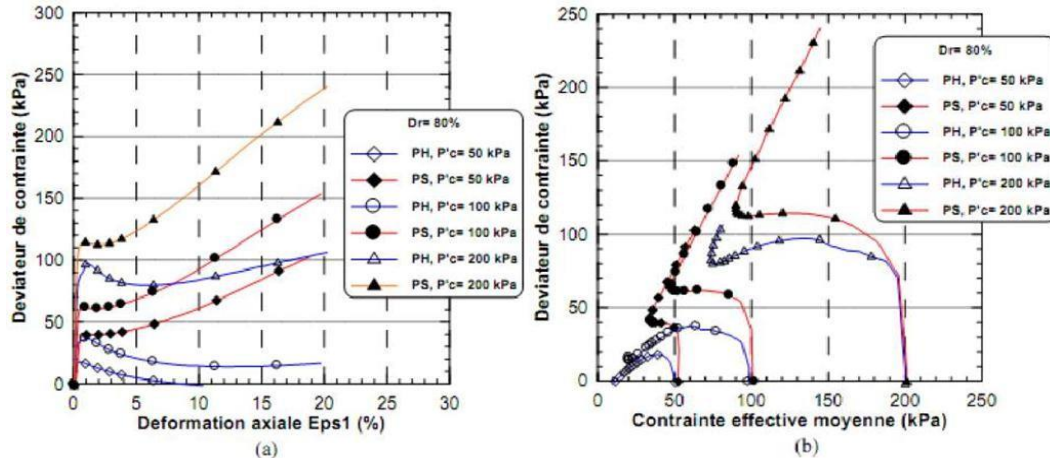


Figure II.5 : Essais non drainée sur un sable dense : (a) courbe de cisaillement, (b) trajectoire de contrainte (Della et al. 2011)

II.3.2. Influence de la teneur en eau :

Il est essentiel d'étudier l'impact de l'humidité sur le comportement mécanique du sol, car ses propriétés sont influencées par des facteurs environnementaux tel 'que l'humidité de l'air et les précipitations, en particulier dans les sols sableux. A cet égard **Bouri et al. (2019)**

a révélé qu'une augmentation de la teneur en eau entraîne une réduction significative de la résistance du sable, affectant négativement l'angle de frottement et la cohésion.

D'autre part, une étude réalisée par Aouali **et al. (2019)**, utilisant l'essai de cisaillement direct sur du sable limoneux, a montré que l'augmentation de l'humidité entraîne une diminution de la résistance au cisaillement maximale et résiduelle, ce qui reflète une dégradation de certaines propriétés physiques telles que l'angle de frottement interne.

Par ailleurs certaines recherches indiquent que l'humidité a un effet négatif sur la résistance au cisaillement en réduisant la cohésion et l'angle de frottement, la résistance étant plus faible en conditions humides qu'en conditions sèches (Figure II.6). Toutefois, une étude de **Bain et al. (2007)** a conclu que la présence d'eau n'affecte que légèrement le comportement des sables secs.

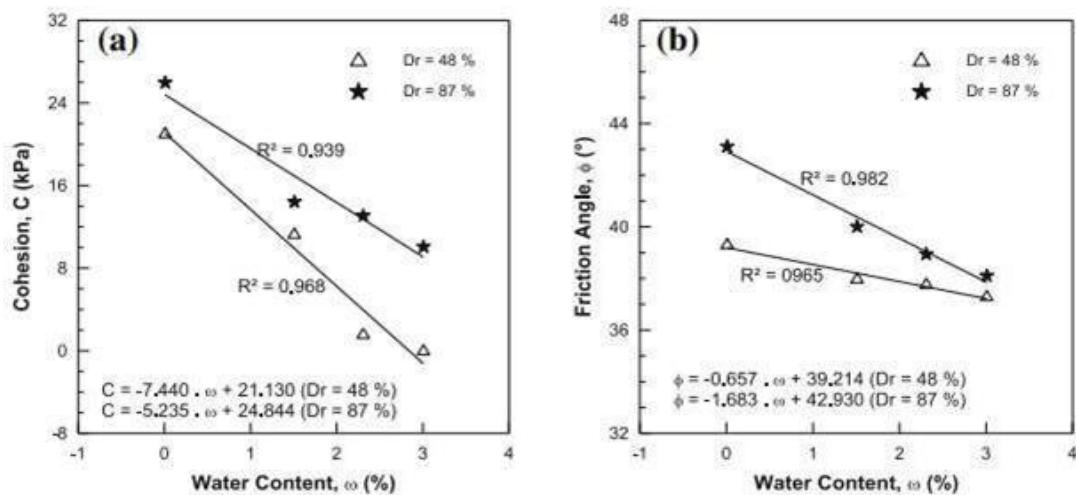


Figure II.6 : Effet de la teneur en eau sur la cohésion et l'angle de frottement

Enfin, dans une autre expérience menée par **Della et al. (2012)** à l'aide d'essais triaxiaux sur des échantillons avec différents teneurs en eau, il a été observé que le sable sec a tendance à se dilater sous charge, tandis que le sol humide présente un comportement fortement contractant, mettant en évidence l'influence de l'humidité sur la réponse mécanique du sol.

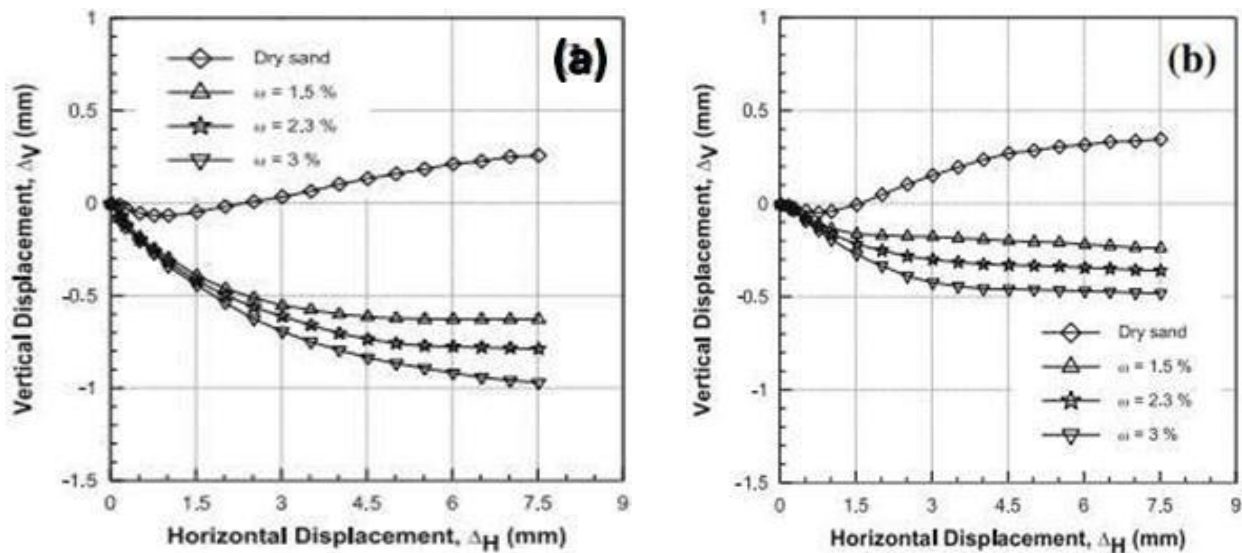


Figure II.7 : effet de l'humidité sur le chargement de volume en fonction de déformation horizontale (Benessalah et al, 2015)

II.3.3 : Influence de la présence des fines :

De nombreuses études ont été menées pour analyser l'effet du mélanger de sable avec des sols fins, mais les résultats restent divergents quant au rôle des particules fines. **Amini et Qi (2000)**, ainsi que **Ling et al. (2009)**, ont conclu que l'ajout de particules fines aux sols granulaires renforce leur résistance.

En revanche, d'autres recherches, notamment celles menées par **Monkul et al. (2016,2017)**, **Arab (2009)**, **Belkhatir et al. (2010)** et **Aouali et al. (2018)**, ont montré que l'augmentation de la teneur en particules fines entraîne une diminution de la résistance des sols granulaires.

Par ailleurs, d'autres études, comme celles de **Benghalia et al. (2015)** et **Bouferra et shahrour (2004)**, indiquent que la résistance diminue avec l'augmentation du taux de particules fines jusqu'à atteindre une certaine valeur, après quoi elle commence à s'améliorer à nouveau.

Vanayagam et Martin (2002) ont présenté une perspective différente en soulignant que les caractéristiques physiques du sable limoneux diffèrent nettement de celles du sable pur. Dans le même contexte, **Bouri et al. (2019)** ont indiqué que la résistance au cisaillement constitue un critère fondamental pour évaluer la stabilité des sols destinés à la construction, ce qui rend nécessaire l'analyse du comportement au cisaillement des sables peu résistants.

Chapitre II : comportement des sols limoneux et technique de stabilisation

Une série d'essais de cisaillement direct a été réalisée sur les sables de la région de Chlef en utilisant des mélanges de sable et de limon. Les résultats ont montré que la résistance au cisaillement ainsi que l'angle de frottement diminuent à mesure que la teneur en limon augmente, tandis que la cohésion tend à croître progressivement (figures II.8 et II.9).

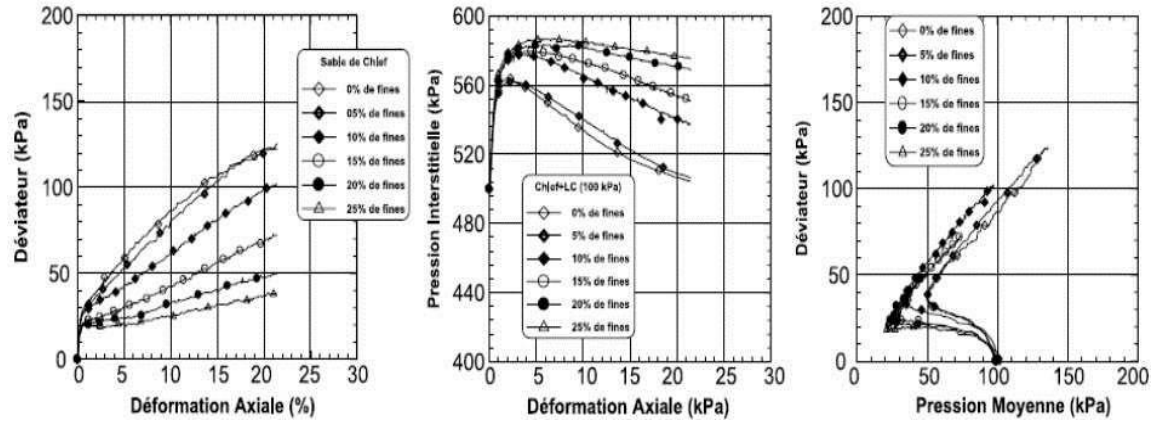


Figure II.8 : effet de la teneur en fines sur le comportement non drainé d'un mélange sable-limon soumis à une pression confinée de 100 Kpa (Arab, 2009)

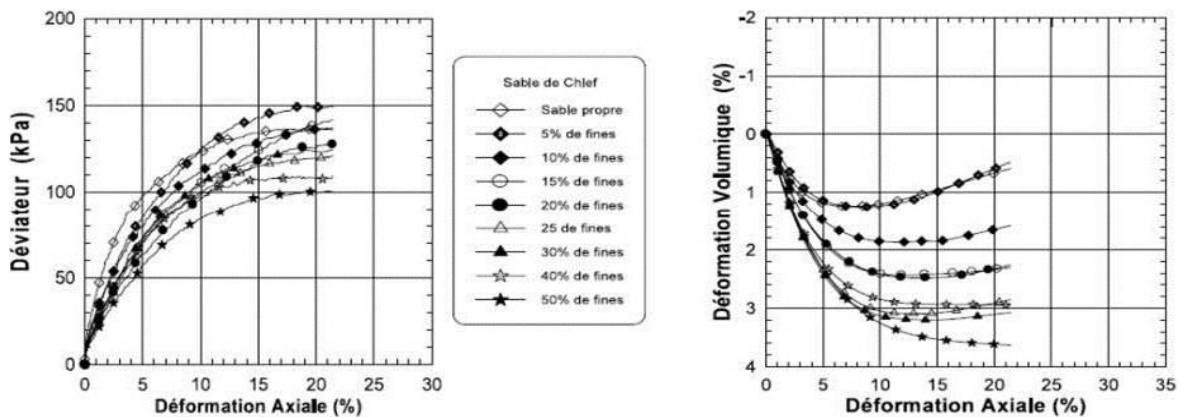


Figure II.9 : Effet de la proportion de fines sur le comportement drainé d'un mélange sable-limon (Arab, 2009)

II.3.4 : influence de la granulométrie :

La granulométrie est l'un des facteurs essentiels influençant de manière significative le comportement du sol sous l'effet des contraintes, en impactant le taux de déformation et la résistance au cisaillement. La variation de la distribution des tailles des particules entraîne une modification du volume des vides ainsi que de la surface de contact effective entre les

Chapitre II : comportement des sols limoneux et technique de stabilisation

grains, influençant ainsi le mécanisme de transmission et de répartition des charges dans le sol.

Une étude menée par **Taïba et al. (2017)** a examiné l'impact du coefficient de granulométrie et de la taille des particules sur le comportement des sables limoneux. Les résultats ont révélé

qu'une augmentation du coefficient de granulométrie, combinée à une diminution des tailles des particules, entraîne une réduction de la résistance maximale au cisaillement.

De plus, les recherches de **Yilmaz et al. (2008)** ainsi que de **Janalizadeh et al. (2013)** ont montré que la diminution progressive des valeurs de la taille des particules conduit à une baisse graduelle de la résistance au cisaillement des sables limoneux, soulignant ainsi l'importance de la distribution des tailles des particules dans la détermination des propriétés mécaniques du sol.

II.3.5 : Influence de la forme des grains :

La forme des grains est une caractéristique essentielle qui influence considérablement le comportement mécanique des matériaux granulaires. **Shinohara et al. (2000)** ont mené une étude sur l'effet de la forme des particules sur l'angle de frottement interne de différents types de grains à l'aide d'un essai de compression triaxiale. Les résultats ont montré que l'angle de frottement augmente avec l'accentuation des arêtes des grains, tandis qu'il diminue lorsque la porosité initiale de l'échantillon est faible, en raison d'un effet accru d'enchevêtrement entre les particules.

Holtz et Gibbs (1956) ont démontré que les matériaux constitués de particules anguleuses offrent une résistance au cisaillement plus élevée que ceux composés de particules arrondies, ce qui souligne l'impact de la forme des grains sur le comportement mécanique du sable et du gravier.

Par ailleurs, les recherches de **Santamarina et Cho (2001)** ainsi que de **Holtz et Kovacs (1981)** ont révélé que la réponse du sable aux contraintes et à la déformation est influencée par le degré d'angularité des particules. Une augmentation de cette angularité entraîne un renforcement de la résistance au cisaillement et raison d'une intensification des forces de contact entre les grains de sable. Une étude menée par **Cho et al. (2006)**, utilisant l'analyse de microphotographies de particules sableuse, a confirmé que l'accroissement de l'angularité

Chapitre II : comportement des sols limoneux et technique de stabilisation

des grains est associé à une augmentation de l'angle de frottement dans des conditions de volume critique.

De plus, **Guo et Su (2015)** ont réalisé des essais triaxiaux sur des échantillons de sable soumis à différentes pressions et rapports de vide, et ont constaté que l'augmentation de l'angularité des grains contribue à une élévation de l'angle de frottement maximal, ce qui influence directement la capacité du sol à résistance au cisaillement.

En fin, **Yang et Wei (2015)** ont indiqué que le sable composé de particules arrondies présente une résistance au cisaillement inférieure à celle du sable constitué de grains anguleux. Ils ont également observé qu'un mélange de sable et de limon anguleux entraîne une réduction de la résistance au cisaillement.

II.4 : Techniques des stabilisations de sols limoneux :

II.4.1 : Méthode mécanique :

II.4.1.1 : Compactage dynamique :

Le compactage dynamique est une méthode efficace pour améliorer les propriétés du sol, en particulier lorsque celui-ci nécessite une augmentation de sa densité ou une réduction de son tassement ou de son potentiel de liquéfaction. Cette technique consiste à laisser tomber des masses lourdes, généralement comprises entre 10 et 30 tonnes, d'une hauteur 15 à 20 mètres voire 30 mètres (**P. Liausu, 1981**). Sur la figure II.10, on présente un exemple de cette technique appliquée à un chantier réel, notamment dans le projet de la ville de Sabah Al Ahmad Marine au Koweït.

Ors de la chute de ces masses, des ondes de chocs se propagent dans le sol, provoquant un réarrangement des particules et une réduction des vides entre elles. Cela permet de compacter le sol en profondeur, jusqu'à environ 10 mètres. Cette pression peut l'expulsion de l'eau interstitielle, ce qui contribue à stabiliser le sol et à renforcer sa cohésion.



Figure II.10 : Chantier de compactage dynamique du sol
(<https://www.bauer.de/en/soil-compaction-desert-kuwait>)

Cependant, cette technique présente des inconvénients qu'on peut les résumer comme suit :

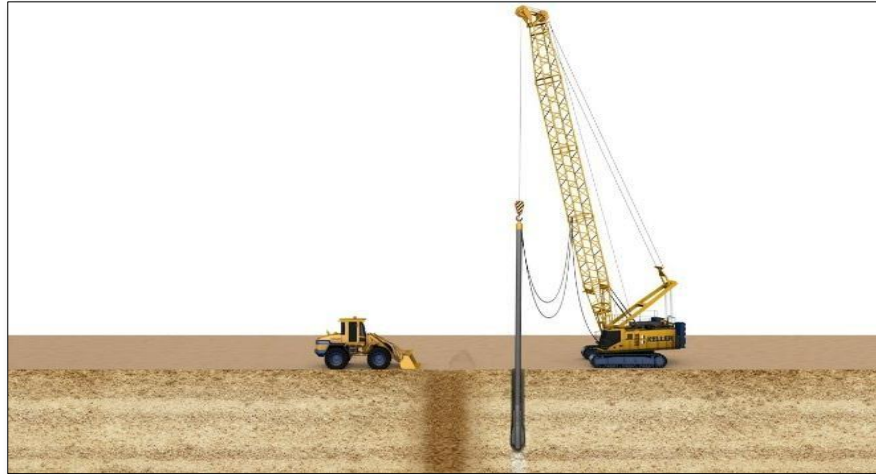
- Des tassements inégaux peuvent apparaître si les impacts ne sont pas bien répartis sur la surface.
- Il est difficile d'utiliser cette technique à proximité de bâtiment anciens ou fragiles en raison de leur sensibilité aux vibrations.
- Il est possible que certaines zones du sol restent mal compactées, ce qui réduit l'homogénéité et la performance globale.
- Le coût peut devenir élevé si plusieurs phases de compactage sont nécessaires ou si le site est difficile d'accès.

II.4.1.2 : Vibro-compactage :

Le compactage par vibration est une méthode utilisée pour améliorer les sols composés principalement de sable ou de gravier à grains peu cohérents. Cette technique repose sur le réarrangement des particules du sol afin d'augmenter leur densité et cohésion.

Elle consiste à générer de fortes vibrations qui pénètrent jusqu'à environ 50 mètres de profondeur, sans avoir besoin d'ajouter des matériaux comme des pierres ou du béton. Cela permet d'obtenir un sol plus homogène et mieux consolidé.

Un dispositif vibrant spécialement conçu pour cette opération est introduit dans le sol, accompagné d'un jet d'eau qui facilite sa descente. Le sol est ensuite compacté progressivement, couche par couche, à des profondeurs variant entre 50 et 100 centimètres à chaque étape, en fonction de la nature du sol et de sa cohésion **Figure II.11**



II.11 : Vibro-compaction du sol (Hausmann, M.R 1990)

Cependant, cette technique présente également des inconvénients qu'on peut les résumer comme suit :

- Elle n'est pas adaptée aux sols fins, car ces types de sols ne réagissent pas bien aux vibrations en raison de leur structure non granulaire.
- Elle peut générer des vibrations importantes pouvant affecter négativement les bâtiments ou infrastructure voisines.
- Dans certains cas, elle nécessite l'utilisation d'équipements lourds et d'une source d'eau pour améliorer son efficacité, ce qui augmente les coûts.
- Il existe un risque de dilatation ou de gonflement du sol environnant après le traitement si celui-ci n'est pas correctement stabilisé.
- Dans les sols saturés, elle peut temporairement augmenter la pression interstitielle de l'eau, ce qui peut causer des problèmes de stabilité pendant l'exécution.

II.4.1.3 Colonnes ballastées :

La technique des colonnes ballastées constitue une solution technique efficace pour l'amélioration des sols meubles et compressibles. Elle consiste en la réalisation de colonnes verticales composées de matériaux granulaires tels que sable, gravier ou granulats compactés. Cette méthode s'effectue en deux phases principales :

- Un vibreur ou tube spécial est enfoncé dans le sol jusqu'à la profondeur requise, repoussant latéralement le terrain environnant.
- Le système est retiré progressivement tandis que la cavité créée est remplie de matériaux granulaires compactés, soit par pression statiques, soit par vibration.

L'avantage principal de ces colonnes réside dans l'amélioration de la capacité portant du sol et du module de réaction du terrain sous les fondations. Ces colonnes jouent également un double rôle en servant de système de drainage vertical. Bien que présentant une relative flexibilité et étant principalement conçues pour résister aux charges verticales, elles contribuent significativement à l'amélioration de la résistance au cisaillement du sol lorsqu'elles sont utilisées pour accroître la stabilité des terrains de fondation contre les risques de glissement généralisé.

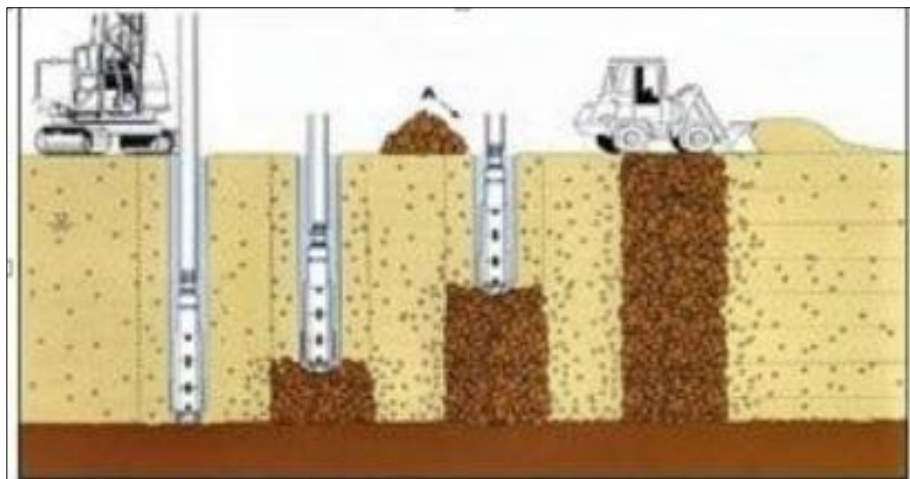


Figure II.12 : schéma de réalisation de colonnes ballastée (Arab et al, 2012)

Les inconvénients de cette technique peuvent être résumés comme suit :

- Les colonnes ballastées ne conviennent pas à tous les types des sols, en particulier aux sols meubles ou riches en matières organiques.

- Lors de l'exécution, le gravier peut se mélanger au sol, ce qui réduit l'efficacité des colonnes.
- Cette technique nécessite des équipements lourds et une expertise technique, ce qui peut augmenter les couts.
- Il est difficile de garantir la qualité de l'exécution en profondeur, surtout lorsque les colonnes sont très profondes.
- Des différences de tassement peuvent apparaître entre les zones traitées et non traitées, ce qui peut causer des problèmes structurels.
- En présence de grande quantité d'eau ou d'une nappe phréatique élevée, des mesures supplémentaires peuvent être nécessaires.
- L'installation des colonnes peut provoquer des vibrations susceptibles d'endommager les bâtiments ou les structures voisines

II.4.2 Méthode physique :

II.4.2.1 Pré-chargement :

La technique de pré-chargement consiste à soumettre le sol à des charges temporaires appliquées avant l'installation des charges permanentes, dans le but de réduire les tassements futurs et d'améliorer la stabilité du sol. Cette méthode est particulièrement adaptée aux sols faibles, notamment ceux riches en argile, qui sont appelés à supporter des charges sur le long terme.

Cette technique permet de provoquer un tassement contrôlé du sol en y appliquant un excès de charge, ce qui accélère le processus de consolidation naturelle. Dans le cas des sols graveleux à forte perméabilité, l'efficacité de cette méthode est encore plus marquée, car l'eau interstitielle s'évacue plus rapidement, réduisant ainsi le temps de traitement comparé aux sols fins à faible perméabilité.

Parmi les principaux avantages de cette méthode est d'améliorer la capacité portante des sols en réduisant les vides entre particules, ainsi que la limitation du tassement des sols meuble grâce à l'accélération du processus de consolidation et à meilleure homogénéité du sol.

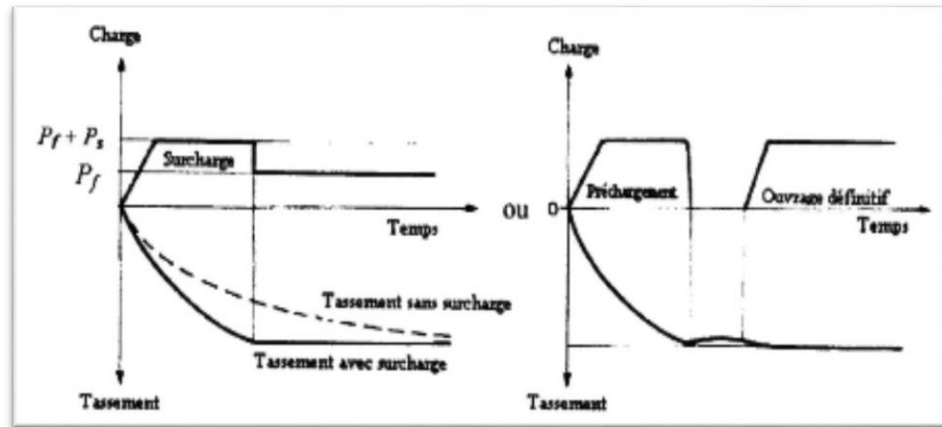


Figure II.13 : principe du pré chargement pour le contrôle des tassements (Bell, 1993)

Les inconvénients de cette technique peuvent être résumés comme suit :

- La technique de pré chargement nécessite beaucoup de temps avant que ses effets sur le sol deviennent visibles.
- Elle requiert une grande surface pour placer les charges, ce qui complique son application en zone urbaine ou restreintes.
- Les charges excessives peuvent provoquer des glissements latéraux du sol ou affecter la stabilité des structures voisines.
- Il est parfois difficile de prévoir avec précision l'ampleur et la vitesse du tassement, ce qui peut entraîner des déformations indésirables.
- Dans certains cas, l'utilisation de drains verticaux est nécessaire pour accélérer le processus, ce qui augmente les coûts et la complexité.
- Si le pré chargement n'est pas bien conçu, il peut endommager les infrastructures ou les services à proximité.

II.4.2.2 : Drainage :

Le drainage est l'une des méthodes les plus efficaces pour accélérer l'amélioration des sols, en particulier ceux saturés en eau. Cette technique repose sur l'installation de drains verticaux facilitant l'évacuation de l'eau interstitielle, ce qui accélère le processus de consolidation du sol.

Les charges sont appliquées de manière perpendiculaire à la surface du sol, selon un maillage régulier pouvant atteindre des profondeurs allant jusqu'à 90 mètres, en fonction de la nature des couches à traiter. Ces drains sont généralement constitués de matériaux

Chapitre II : comportement des sols limoneux et technique de stabilisation

préfabriqués ou mis en œuvre sous forme de colonnes de sable ou de gravier. Une fois les charges appliquées.

L'eau contenue entre les particules de sol migre vers la surface à travers ces drains, permettant ainsi un traitement plus rapide et une stabilisation plus efficace des sols concernés.

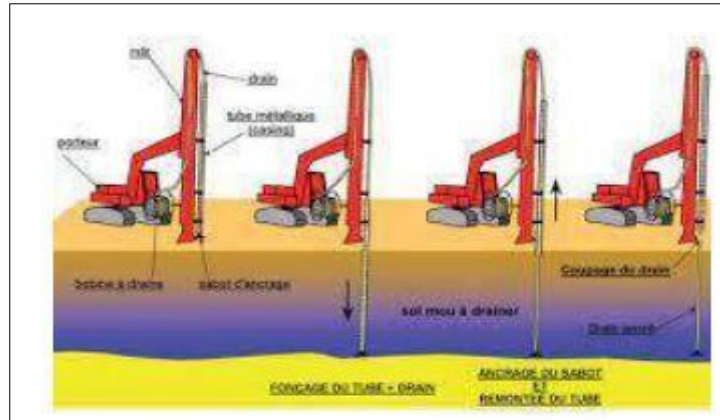


Figure II.14 : Technique de drainage (Halbique, 2022)

Les inconvénients de l'utilisation de la technique de drainage sont les suivants :

- Cette technique nécessite des équipements spécialisés et un entretien régulier, ce qui augmente le coût de projet.
- Les systèmes de drainage peuvent être obstrués ou se détériorer, ce qui réduit leur efficacité au fil du temps.
- Un drainage excessif peut entraîner la retraite et la fissuration du sol.
- Dans certains cas, le drainage peut provoquer un affaissement progressif du sol, compromettant la stabilité des structures en surface

II.4.2.3 Renforcement par des fibres :

La technique de renforcement par fibre offre une solution complète pour améliorer les performances du sol dans ses différents états, depuis l'état liquide jusqu'à l'état plastique et enfin l'état compacté. Cette méthode repose sur l'intégration de fibres dans les sols à fort retrait lors des opérations de préparation et de mélange, augmentant ainsi leur durabilité et leur capacité portante.

Cette technologie se distingue par sa compatibilité avec divers stabilisants tels que les liants hydrauliques et la chaux. Cette synergie améliore considérablement les propriétés

Chapitre II : comportement des sols limoneux et technique de stabilisation

mécaniques du sol. Les fibres utilisées se répartissent en trois catégories principales : les fibres végétales issues des résidus agricoles, les fibres animales provenant des produits d'élevage, ainsi que les fibres synthétiques comprenant des polymères comme la cellophane, des fibres de verre et plastiques.

Cette technique représente une solution d'ingénierie innovante pour traiter les problèmes des sols argileux sujets à la fissuration. Elle combine amélioration des performances du sol et préservation de l'équilibre écologique. Le succès de cette méthode réside dans sa grande flexibilité et son adaptabilité aux diverses conditions de construction et environnementales, en faisant un choix optimal pour les projets d'ingénierie durable.

Cette technique présente plusieurs avantages :

- Elle réduit la pollution environnementale en recyclant les déchets plastiques au lieu de les laisser dans la nature.
- Elle contribue à améliorer les propriétés du sol, telles que la résistance au cisaillement et au chargement.
- Elle permet une meilleure répartition des charges et réduit le risque d'affaissement dans les sols faibles.
- C'est une solution économique car elle réduit la dépendance aux matériaux de fixation traditionnels coûteux.
- Elle améliore la résistance du sol à l'érosion et à l'effondrement.

II.4.3 Méthode thermique :

II.4.3.1 Déshydratation :

L'utilisation de la chaleur pour assécher le sol est une méthode rarement employée en géotechnique. Toutefois, elle peut parfois être utilisée pour renforcer certains types de sols. Le principe consiste à brûler un combustible dans un forage dédié, relié à un autre forage servant de cheminée d'évacuation des gaz et des fumées, ce qui permet d'accélérer le processus de séchage.

- Cette technique présente quelques inconvénients : L'élimination de l'eau du sol peut ne pas se faire de manière uniforme, ce qui entraîne une variation de sa résistance et de sa stabilité.
- Un séchage rapide peut provoquer un retrait et des fissures dans le sol.

- Le processus peut nécessiter beaucoup de temps, surtout si les méthodes utilisées sont naturelles ou lents.
- L'utilisation de la chaleur ou de l'air chaud consomme beaucoup d'énergie et peut être coûteuse.
- Le retrait de grandes quantités d'eau peut avoir un impact négatif sur l'environnement ou sur le niveau des eaux souterraines.

II.4.3.2 Congélation :

La technique de congélation des sols est une méthode temporaire employée pour améliorer la stabilité des terrains dans les projets de génie civil. Elle est généralement utilisée lors du creusement de petits tunnels ou issues de secours des grands tunnels, ainsi que lors de la réalisation de pieux. Cette méthode permet d'intervenir dans des couches de sol saturées en eau en stabilisant les zones meubles par congélation à l'aide d'azote liquide ou d'une solution saline cette dernière étant une méthode plus ancienne.

La mise en œuvre de cette technique requiert une connaissance approfondie du transfert de chaleur, ainsi qu'un contrôle rigoureux du processus. L'opération consiste à créer un massif gelé soit à l'aide d'azote liquide pour une congélation rapide, soit avec une solution saline pour une congélation de plus longue durée. Le sol ainsi gelé, acquiert une consistance proche de celle du béton.

Cette technique est utilisée notamment lors du creusement de tunnels sous des voies ferrées, dans des terrains soumis aux nappes phréatiques ou encore pour le prélèvement d'échantillon non perturbés destinés aux essais géotechniques en laboratoire.



Figure II.15 : technique de congélation (Halbigue ,2022)

Chapitre II : comportement des sols limoneux et technique de stabilisation

Les inconvénients de cette technique peuvent être résumés comme suit :

- La stabilisation du sol par congélation nécessite des équipements spécialisés et une consommation énergétique importante, ce qui la rend très coûteuse.
La congélation n'est pas une solution permanente ; si le refroidissement cesse, le sol se décongèle et perd sa stabilité.
- Le gel du sol peut provoquer des variations de volume (dilatation ou contraction), pouvant endommager les structures avoisinantes.

II.4.4 Méthode chimique

II.4.4.1 Utilisation de la chaux :

La chaux est l'un des plus anciens matériaux utilisés pour améliorer les propriétés des sols. Son emploi remonte à l'époque romaine et s'est perpétué pendant des siècles en raison de son efficacité dans la stabilisation des sols argileux.

La chaux se distingue par sa capacité à traiter les sols à forte teneur en humidité. Les réactions chimiques entre ses composants et l'eau réduisent en effet le taux d'humidité. Améliorant ainsi les caractéristiques du sol.

Deux types principaux de chaux sont utilisés dans ce domaine :

- **La chaux vive (oxyde de calcium-CaO)** : elle agit rapidement et efficacement, augmentant la résistance des sols plastiques et améliorant leur compactage, tout en optimisant leur teneur en eau.
- **La chaux éteinte (hydroxyde de calcium-Ca(OH))** : sa réaction est plus lente que celle de la chaux vive, et elle est souvent employée pour les sols à bas argileuse.

Chapitre II : comportement des sols limoneux et technique de stabilisation

Il est important de noter que la chaux vive est généralement plus efficace que la chaux éteinte pour l'amélioration des propriétés du sol, ce qui en fait un choix privilégié dans de nombreuses applications techniques.



Figure II.16 : Chantier d'un traitement à la chaux du sol (Rouabhia, 2017)

La technique de traitement avec la chaux présente quelques inconvénients :

- certains types de sols ne réagissent pas bien à la chaux, ce qui réduit la quantité de la stabilisation.
- La réaction avec les sulfates présents dans le sol peut provoquer des fissures ou des gonflements ultérieurs.
- La chaux peut être coûteuse si elle est éloignée du site du projet ou si elle n'est pas disponible localement.
- La stabilisation du sol avec de la chaux nécessite une grande précision dans le contrôle de l'humidité et du mélange pour obtenir de bons résultats.
- Les sols riches en matières organiques peuvent ne pas s'améliorer beaucoup avec l'utilisation de la chaux.
- Un excès d'utilisation de la chaux peut rendre le sol plus dur et plus susceptible de se fissurer avec le temps.

II.4.4.2 Utilisation du ciment :

Le ciment représente une alternative efficace pour l'amélioration des propriétés des sols, bien qu'il partage certaines similarités fonctionnelles avec la chaux. La principale caractéristique du ciment portland réside dans sa capacité à renforcer la résistance du sol à

Chapitre II : comportement des sols limoneux et technique de stabilisation

la compression de manière supérieure à la chaux, grâce aux réactions physico-chimiques intervenant lors du processus d'hydratation (Abdo, 2008).

Le ciment est constitué d'un mélange fin de plusieurs composants essentiels qui réagissent avec l'eau pour former un matériau solide. L'élément principal est le clinker, obtenu par la cuisson de matières premières telles que le calcaire et l'argile à très haute température. On y ajoute une proportion de gypse afin de réguler le temps de prise et d'éviter un durcissement prématuré, ainsi que du sulfate de calcium, qui permet d'ajuster les caractéristiques du durcissement.

Le mécanisme d'amélioration des sols par le ciment repose sur une série de réactions chimiques complexes qui débutent lors du mélange ciment-eau, processus qui se déroule en quatre phases successives :

- **Phase d'adhésion initiale** : le ciment adhère aux molécules d'eau présentes dans le sol via des forces d'attraction superficielles.
- **Phase de dissociation chimique** : les composants solides du ciment décomposent sous l'effet de l'eau, entraînant la rupture des liaisons entre ses molécules.
- **Phase de saturation et diffusion** : les ions du ciment se libèrent dans la solution aqueuse, commençant à former de nouveaux composés (hydrates).
- **Phase de durcissement final** : les nouveaux composés s'agrègent en un réseau cristallin résistant, gagnant en solidité et cohésion au fur et à mesure de l'hydratation.

Ce processus complexe aboutit finalement à la formation d'une masse solide qui augmente considérablement la durabilité du sol et améliore notablement ses propriétés mécaniques.



Figure II.17 : Chantier de traitement au ciment du sol (Boutira, 2021)

Chapitre II : comportement des sols limoneux et technique de stabilisation

Cependant, l'urtection du ciment comme agent de traitement présente quelques inconvénients :

- Le processus de stabilisation du sol avec du ciment est couteux en raison des matériaux et de la main-d'œuvre nécessaires.
- L'utilisation de ciment augmente les émissions de dioxyde de carbone et a un impact négatif sur l'environnement.
- Le ciment n'est pas efficace dans les sols à forte teneur organique.
- L'utilisation de ciment peut entraîner un durcissement excessif du sol, le teneur fragile.
- L'ajoute de ciment peut altérer des propriétés du sol comme la porosité et l'aération de manière indésirable.

II.5 Stabilisation des sols limoneux avec la technique d'Electro-osmose :

La technique de l'électro-osmose est considérée comme une méthode innovante et efficace pour l'amélioration et la stabilisation des sols limoneux, en particulier ceux à faible ou moyenne plasticité. Dans une étude importante réalisée par (**Casagrande, 1983**), a été démontré que l'application d'un courant électrique continu à travers le sol permet de déplacer l'eau de l'anode vers la cathode, ce qui réduit l'humidité et augmente la résistance au cisaillement du sol. Des essais sur le terrain ont confirmé que cette méthode est efficace à long terme, sans recourir à des additifs chimiques. Cela en fait donc une solution et rapide pour améliorer la stabilité des sols.

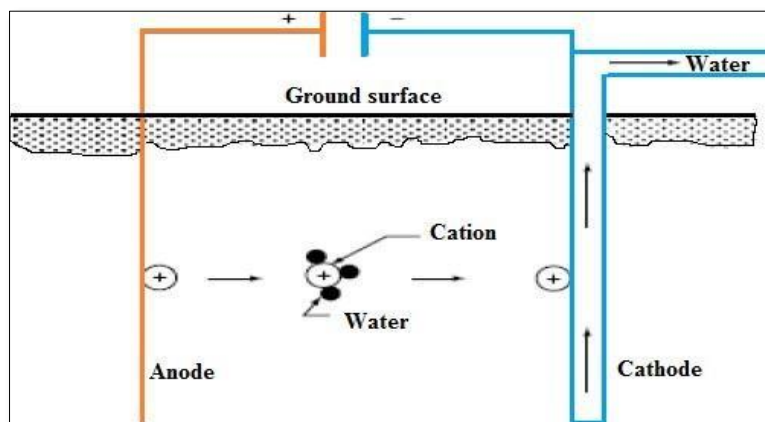


Figure II.18 : principe de la technique électro-osmose (**Gadouri, 2017**)

Chapitre II : comportement des sols limoneux et technique de stabilisation

La technique de stabilisation électroosmotique peut être efficace dans certaine situation, mais elle présente plusieurs inconvénients, notamment :

- Elle nécessite un cout élevé en raison de l'utilisation d'équipement électriques spécialisés et d'une consommation continue d'énergie.
- Elle demande beaucoup de temps pour produire des effets significatifs sur l'amélioration du sol.
- Les électrodes métalliques utilisées peuvent se corroder avec le temps à cause des réactions électrochimiques.
- Elle provoque des modifications de la chimie du sol, notamment du pH, ce qui peut affecter négativement la quantité du sol et l'environnement.
- En l'absence de surveillance rigoureuse, elle peut entraîner la migration de polluants vers les nappes phréatiques, représentant un risque environnemental.

II.6 Conclusion :

L'étude de propriétés mécaniques des sols limoneux constitue un sujet fondamental en géotechnique, en raison de leur nature sensible et de leur grande réactivité aux facteurs environnementaux, notamment aux variations de l'humidité. Ce type de sol est connu pour sa faible résistance au cisaillement et sa grande compressibilité, ce qui le rend sujet au tassement sous l'effet des charges et représente un véritable défi lors de la réalisation de projets de construction.

Le choix de la méthode optimale de stabilisation des sols dépend d'un ensemble de facteurs incluant les aspects économiques et coûts associés, les caractéristiques naturelles du sol, ainsi que les conditions environnementales du site.

Dans le cadre de cette étude, nous développons une solution innovante qui consiste à incorporer dans un sable limoneux des fibres provenant des déchets de la menuiserie PVC recyclées.

Chapitre III

Présentation des essais

III.1 Introduction :

Ce chapitre comprend une étude expérimentale réalisée dans le laboratoire des travaux publics de l'unité de l'ouest à Tiaret (LTPO) ainsi qu'au laboratoire du département de génie civil, selon les procédures opérationnelles résumées ci-dessous.

Ce chapitre vise à étudier l'effet des déchets plastique en PVC à différentes proportions (1.5 %, 3%, 4.5%), sur la résistance au cisaillement des sables limoneux.

III.2 Etude expérimentale :

Cette étude comprend des essais d'identification du sol étudié, ainsi que l'essai de portance et de cisaillement à la boîte.

III.2.1 Sable limoneux :

➤ Essais d'identification :

Des essais de caractérisation géotechnique ont été réalisés selon les normes AFNOR sur l'échantillon prélevé (sable limoneux de ZMALA).

- Analyse chimique (teneur en carbonates **caco₃**, bleu de méthylène **VBS**, taux de sulfates, la teneur pondérale en matière organiques de sol **MO**).
- La granulométrie (par tamisage, et par sédimentomètre).
- Les limites d'Atterberg.
- Essai Proctor normal.
- Essai de cisaillement à la boîte.

III.2.2 Sable limoneux renforcé par des fibres PVC :

- Les limites d'Atterberg
- Proctor normal.
- Essai cisaillement à la boîte.

III.3. Analyse de sable limoneux et des déchets plastiques :

III.3.1. Essai de d'identification :

III.3.1.1. Analyse chimique :

L'objectif de cet essai est d'analyser la composition chimique de l'échantillon sélectionné.

Cette étape joue un rôle essentiel dans l'identification des matériaux locaux employés en construction.

a) Essai d'évaluation de carbonates (NF P94-048) :

L'analyse des carbonates de calcium (CaCO_3) dans un échantillon de sol permet de déterminer leur concentration. Pour réaliser cette évaluation, on utilise un **calcimètre** et on suit les étapes suivantes (Fig. III.1) :

- Peser 0.5 g de l'échantillon de sol et le placer dans un flacon en verre.
- Ajouter 10 ml d'acide chlorhydrique (**HCl à 10%**) dans le flacon.
- Fermer hermétiquement le flacon avec le tube du calcimètre, puis agiter pour favoriser la réaction.
- Mesure le volume de dioxyde de carbone (CO_2) libéré sous l'effet de l'acide.
- Calculer la teneur en (CaCO_3) à l'aide de la formule suivants :

$$\text{CaCO}_3 \% = \frac{100 \times m_2}{m_1} \times \frac{100}{100 - H}$$

Où m_1 est la masse initiale de l'échantillon et m_2 correspond au volume de CO_2 dégagé.



(a)



(b)

Figure III.1 : Essai d'évaluation de taux de carbonates : (a) pesée de l'échantillon du sol ; (b) Mesure du taux de carbonates en utilisant le calcimètre

Tableau III.1 : Taux de carbonates présents dans le sable limoneux

Nature	Masse de sol (g)	Volume (cm ³)	Teneur en calcaire (%)
Sable limoneux	0.5	10	9

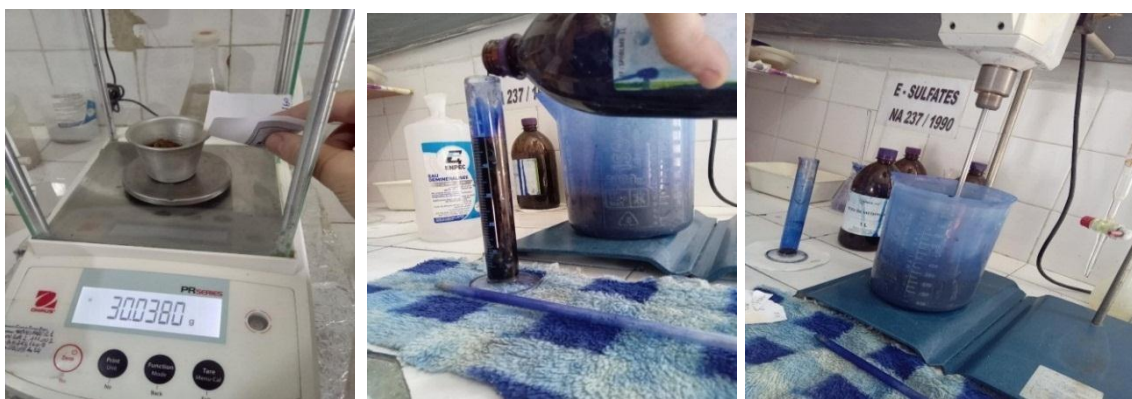
b) Essai de bleu de méthylène (NF p94-068) :

L'essai de bleu de méthylène, ou VBS (valeur en bleu de sol), est une méthode largement utilisée dans le domaine de la géotechnique pour évaluer la qualité du sol et sa capacité d'absorption.

L'objectif de l'essai de bleu de méthylène est pour de révéler la présence des fines de nature argileuse et d'en déterminer la concentration. L'expérience est réalisée un échantillon de sol est préparé, mélangé avec de l'eau distillée, puis une solution de bleu de méthylène est ajoutée progressivement sous agitation.

L'essai est réalisé en déposant une goutte de la suspension sur un papier filtre et analysant la diffusion de la couleur :

- Si une auréole bleue apparaît autour de la tache centrale, l'essai est positif, indiquant une forte teneur en argile.
- Si aucune auréole bleue n'apparaît, l'essai est négatif, suggérant une faible teneur en argile.



(a)

(b)

(c)

Figure III.2 : Etapes de l'essai de bleu de méthylène : (a) Pesée de l'échantillon de sol avant l'ajout de la solution VBS ; (b) Dosage de bleu de méthylène pendant le mélange ; (c) Malaxage de l'échantillon avec la solution de bleu de méthylène

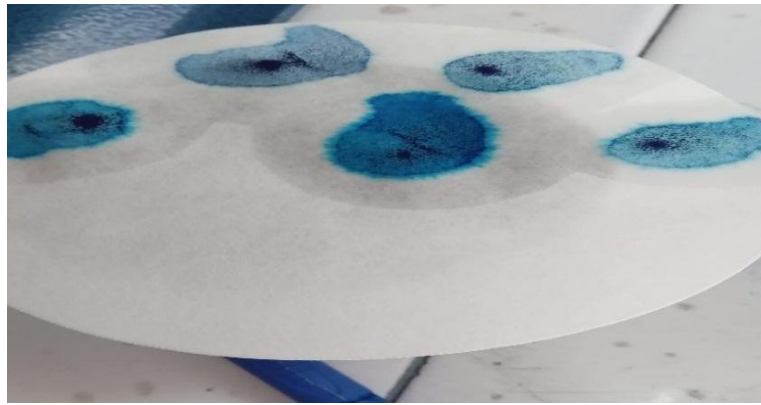


Figure III.3 : Vérification des auréoles

$$\text{VBS} = V/m$$

V : volume total de solution injectée (ml)= 70 ml.

M : masse de la prise d'essai= 30 g.

Tableau III.2 : Résultats de l'essai de VBS pour le sable limoneux

Nature	Masse (g)	Volume (ml)	VBS
Sable limoneux	30	70	2.33

La valeur de VBS obtenue est de 2.33, ce qui se situe dans la plage de $1.5 < \text{VBS} < 2.5$, indiquant que le sol contient une faible proportion d'argile. Il est classé comme un sol sableux limoneux, ce qui témoigne d'une faible activité argileuse.

c) Détermination de la teneur en sulfates (NA-1600-5042) :

La mesure de la teneur en sulfates dans le sol est une étape essentielle pour évaluer ses propriétés géotechniques et sa composition chimique. Cet essai vise à quantifier la quantité de sulfates présente dans l'échantillon, en raison de son impact direct sur la stabilité et la durabilité des structures construites sur ce sol.

Etape de réamisation de l'essai :

- Peser avec précision un échantillon de sol.
- Traiter l'échantillon avec de l'eau distillée et de l'acide chlorhydrique pour extraire les sulfates.
- Filtrer la solution pour séparer les sulfates des autres composants du sol.

- Ajouter une solution de chlorure de baryum pour précipiter les sulfates sous forme de sulfates de baryum.
- Filtrer le précipité, le sécher, puis mesurer sa masse pour déterminer la teneur en sulfates dans l'échantillon de sol



Figure III.4 : dispositif d'essai de détermination de la teneur en sulfates

Tableau III.3 : résultats de l'essai de teneur en sulfates

Nature	Taux de sulfates (mg/kg)
Sable limoneux	Nul

Cet essai est crucial en raison de l'influence des sulfates sur le sol et les structures qui y sont construites. Leur interaction avec certains minéraux peut entraîner des problèmes d'expansion, de gonflement et de dégradation du béton. Ainsi, l'analyse de la teneur en sulfates permet de concevoir des fondations et des structures adaptées aux conditions du sol.

d) Détermination de la teneur pondérale en matières organiques de sol (méthode par calcination NF p 94-047) :

La détermination de la teneur pondérale en matières organiques du sol (MO) est une étape essentielle dans l'analyse des échantillons de sol. Cet essai permet d'évaluer la quantité de matières organiques présentes dans l'échantillon, influençant ainsi les propriétés géotechniques du sol, notamment sa capacité à supporter des charges.

L'essai consiste à sécher un échantillon de sol à une température spécifique, puis le calciner dans un four à 450°C afin d'éliminer les matières organiques. Après la calcination, la perte de masse est mesurée, ce qui correspond à la quantité de matières organiques brûlées.

La teneur en matière organiques est exprimée en pourcentage par rapport à la masse sèche des particules solides avant calcination et est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\text{CMOC} = (m_0 - m_1) / (m_1 - m_0) \times 100$$

Où **m₀** représente la masse initiale de l'échantillon avant calcination et **m₁** la masse restante après calcination.

Le tableau suivant résume les résultats d'essai.

Tableau III.4 : Résultats de l'essai de teneur en matières organiques

Nature	CMOC
Sable limoneux	Nul

III.3.1.2. Analyse granulométrique :

➤ Analyse granulométrique par tamisage (NF P94-056) :

L'objectif de l'essai est de déterminer la répartition relative des tailles des particules du sol en la faisant passer à travers une série de tamis aux ouvertures de dimensions variées. En utilisant un tamis à sec après lavage du sol contenant des particules dont la taille dépasse 80 µm.

Le processus consiste à utiliser un ensemble de tamis empilés par ordre décroissant de leurs ouvertures, permettant ainsi de séparer et de classer les particules selon leurs diamètres la répartition pondérale de chaque fraction granulométrique, ce qui est essentiel pour évaluer les propriétés géotechniques du sol, telles que la perméabilité, la stabilité et la capacité portante.

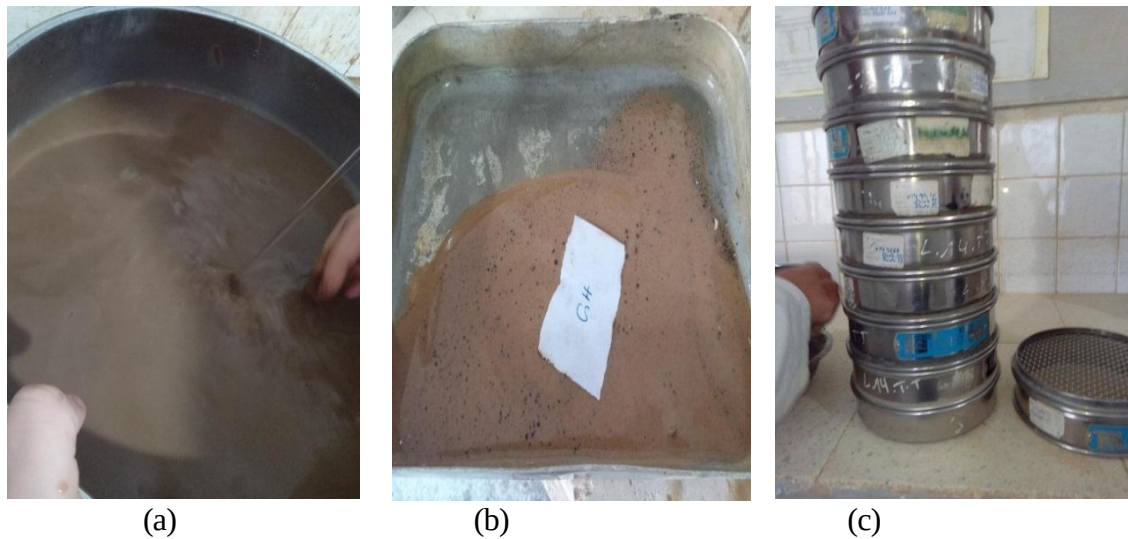


Figure III.5 : Analyse granulométrique par tamisage : (a)préparation de l'échantillon par lavage avant tamisage (b) échantillon après lavage ; (c) Tamisage de l'échantillon à travers la série de tamis

➤ **Analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P 94-057) :**

Cet essai complémentaire à l'analyse du sol par tamisage. Elle est utilisée pour décrire et classer le sol avec précision. Cette méthode s'applique aux particules fines du sol qui passent à travers un tamis de 80 μm .

- Les particules fines sont mises en suspension dans l'eau à l'aide d'un agent défoulant pour éviter leur agglomération.
- Elles se déposent à des vitesses variables en fonction de leur taille.
- L'évolution de la masse volumique de la solution et la profondeur d'immersion du densimètre sont mesurées afin de déterminer la répartition granulométrique des particules fines.



Figure III.6 : Appareillage d'analyse granulométrique par sédimentométrie

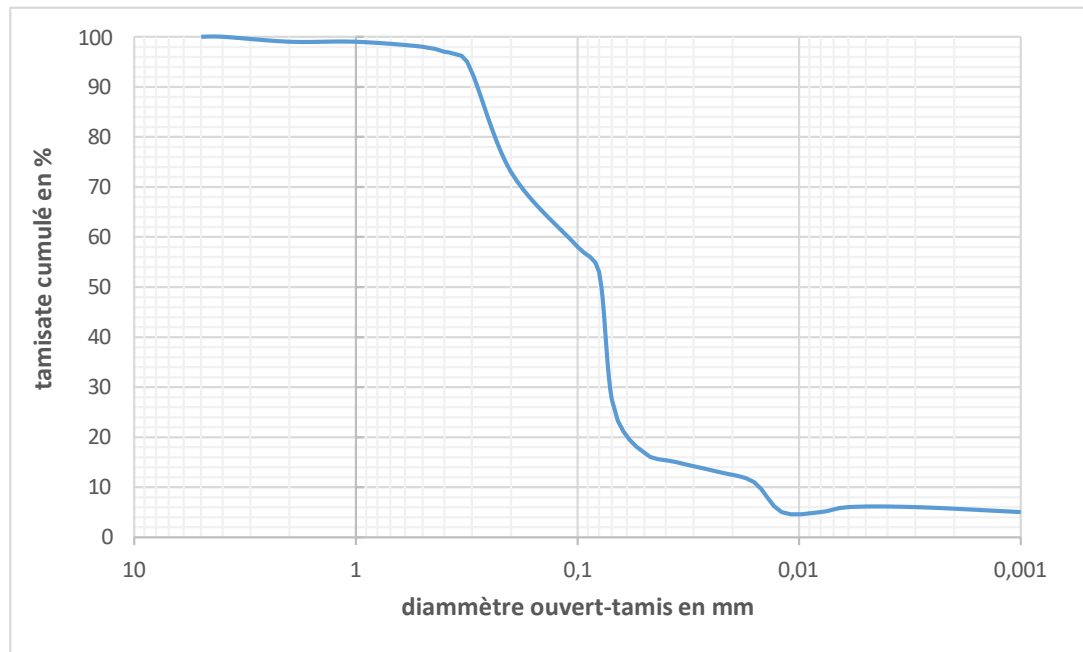


Figure III.7 : Courbe granulométrique de sable limoneux.

D'après la courbe granulométrique on peut calculer les coefficients suivants :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.115}{0.016} = 7.19$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{(0.07)^2}{0.016 \times 0.115} = 2.66$$

On a :

$C_u = 7.19 > 4 \rightarrow$ la granulométrie du sol est étalée.

$C_c = 2.66 \rightarrow$ Cela indique que le sol est uniformément gradué.

Et selon le guide technique de terrassement routier GTR le sol est classé en A2.

III.3.1.4 Masse volumique absolue :

La masse volumique absolue (ρ_s) est la masse par unité de volume du matériau, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. L'appareil utilisé est le densimètre "Le Chatelier" (figure III.8).



Figure III.8 : Essai de la masse volumique absolue du sable limoneux.

La formule qui nous permis la détermination de la masse volumique absolue est :

$$\rho_s = M / (V_2 - V_1)$$

ρ_s : Masse volumique absolue.

M : Masse de l'échantillon en g.

V_1 : Volume de l'eau.

V_2 : Volume total (l'échantillon + eau).

Tableau III.5 : La masse volumique absolue du sable limoneux.

Désignation	M (g)	V_1 (cm ³)	V_2 (cm ³)	ρ_s (g/cm ³)
Sable limoneux	7.68	17.95	20.90	2.60

III.3.1.5 Essai de Diffraction des Rayons X (DRX) :

La diffraction des rayons X est utilisée pour déterminer les principaux minéraux présents dans le sol.

L'analyse par diffraction des rayons X d'un échantillon du sable limoneux a été réalisée au Laboratoire « Synthèse et catalyse » de la Faculté des sciences de la Matière, à l'aide du diffractomètre Rigaku Mini Flex 600.



Figure III.9 : Appareillage de DRX

Les résultats du diffractogramme, présentés dans la figure III.10, ont montré que le sable limoneux est constitué principalement du minéral Quartz.

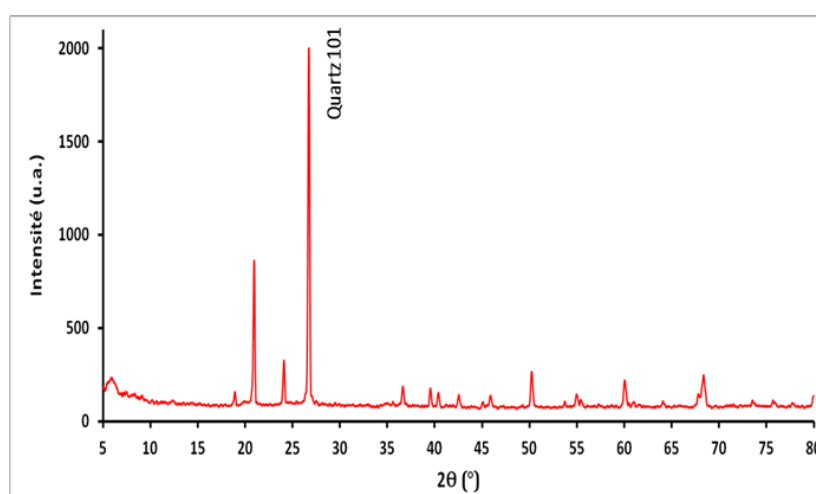


Figure III.10 : Courbe résulte de (DRX)

III.3.1.6 limites d'Atterberg (NF P 94-051) :

Les limites d'Atterberg sont des critères géotechniques standards permettant de caractériser les propriétés d'un sol et de définir les transitions entre ses différents états :

- **Limite de liquidité (WL)** : correspond au passage de l'état liquide à l'état plastique.
- **Limite de plasticité (WP)** : correspond au passage de l'état plastique à l'état solide.

Ces limites sont utilisées pour déterminer le taux d'humidité du sol aux points de transition entre les différents états (Figure III.11), exprimé en pourcentage de la masse totale de la matière première.

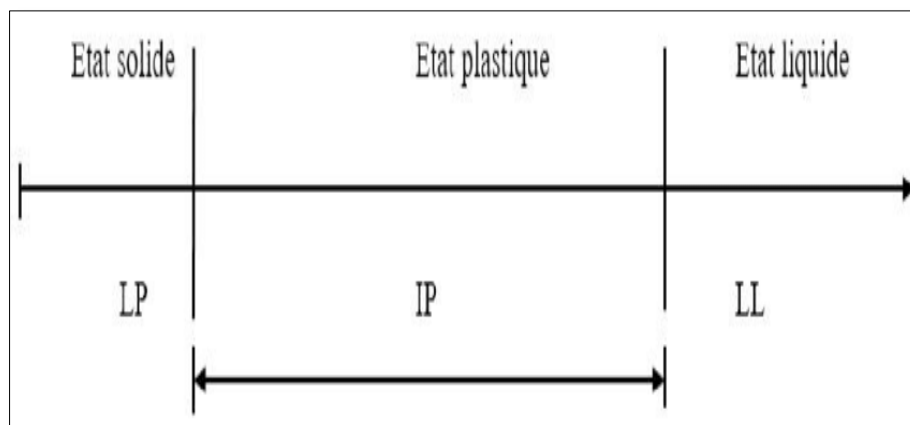
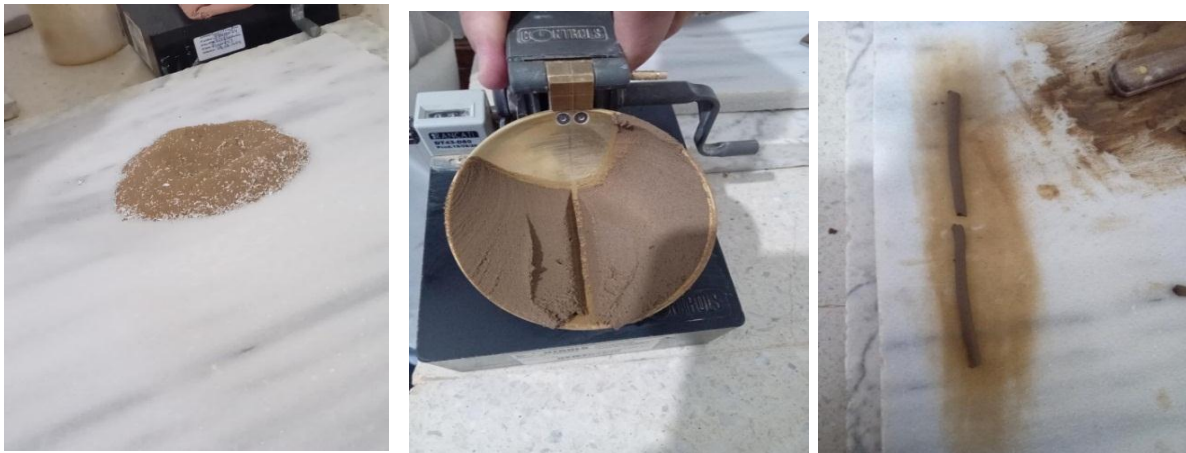


Figure III.11 : Différents états du sol selon les « limites d'Atterberg »

La différence $I_p = WL - WP$, qui définit l'étendue du domaine plastique du sol, est appelée indice de plasticité. Cet indice est un élément essentiel dans l'analyse des caractéristiques du sol. Il permet d'estimer la quantité et le type d'argile présents dans l'échantillon, contribuant ainsi à une évaluation précise de la teneur en argile. Cet essai est réalisé à l'aide de l'appareil de Casagrande. La figure III.12 montre les différentes étapes de réalisation des essais de WL et WP. Les résultats des essais de limite de liquidité et de plasticité sont récapitulés respectivement dans le tableau III. 6 et III.7.



(a)

(b)

(c)

Figure III.12 : Détermination des limites d'Atterberg : (a) préparation de l'échantillon ; (b) limite de liquidité ; (c) limite de plasticité

Tableau III.6 : Résultats de l'essai de limite de liquidité du sable limoneux naturel

N° d’essai	1° ESSAI		2° ESSAI		3° ESSAI	
N° de coups	16		21		26	
N° de la tare	H3	XD	27	SA	P4	I4
Poids total humide	6.60	6.61	7.03	6.38	6.51	6.96
Poids total sec (g)	6.07	6.06	6.47	5.94	6.05	6.38
Poids de tare	3.90	3.85	4.21	3.98	4.08	3.88
Poids de l’eau	0.53	0.55	0.56	0.44	0.46	0.58
Poids de sol sec	2.17	2.21	2.26	1.96	1.97	2.5
Teneur en eau %	24.42	24.88	24.77	22.45	23.35	23.2
Résultats	24.65		23.61		23.28	
La moyenne	23.58					

Tableau III.7 : Résultats de l'essai de limite de plasticité du sable limoneux

N° essai	1° ESAI	2° ESSAI	3° ESSAI	4°ESSAI
N° de la tare	48A	10A	EEE	5T
Poids total humide (g)	5.71	5.82	5.72	6.01
Poids total sec (g)	5.46	5.53	5.41	5.70
Poids de tare (g)	3.98	3.84	3.74	3.90
Poids de l'eau	0.25	0.29	0.31	0.31
Poids de sol sec	1.48	1.69	1.67	1.8
Teneur en eau	16.8	17.16	18.56	17.22
	9			
	17.46			

L'indice de plasticité $I_p = W_L - W_P = 5.17 \rightarrow 5 < IP < 15$, Le sol reconstitué d'une classe peu plastique, selon le tableau III.8.

Tableau III.8 : classification indice de plasticité et degré de plasticité

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < IP < 5$	Non plastique
$5 < IP < 15$	Peu plastique
$15 < IP < 40$	Plastique
$IP > 40$	Très Plastique

III.3.2. Essai Proctor normal (NF P 94-093) :

L'essai Proctor normal, est une expérience utilisée en géotechnique visant à déterminer la densité sèche optimale d'un matériau ainsi que sa teneur en eau correspondante.

a. Les étapes d'essai :

- Un échantillon de sol est prélevé et séché puis pesé (figure III.13).
- L'échantillon est tamisé à l'aide d'un tamis 5mm.

- Différentes quantités d'eau sont ajoutées aux échantillons pour obtenir plusieurs niveaux d'humidité.
- Chaque échantillon est compacté dans un moule Proctor normal (figure III.14.a).
- Chaque échantillon de sol compacté dans le moule en tris couches égales, en utilisant une dame automatique (figure III.14.b).
- La densité sèche de chaque échantillon est mesurée, puis on trace la courbe Proctor.
- La teneur en eau optimale et la densité sèche maximale sont déterminées à partir de la courbe.

On présente sur la figure III. 15 des éprouvettes de sol après démoulage.



Figure III.13 : Préparation du mélange



(a)



(b)

Figure III.14 : Essai Proctor : (a) Moule Proctor; (b) Dame automatique



Figure III.15 : Eprouvettes après démoulage

III.3.2.2 : Essai de cisaillement à la boîte (NF 94-071-1) :

Essai de cisaillement en boîte est l'une des méthodes courantes en géotechnique pour déterminer la résistance du sol au cisaillement.

- L'essai vise à évaluer la capacité des sols à résister aux contraintes de cisaillement en conditions drainées et non drainées. Ce qui permet de déterminer les principaux paramètres de résistance au cisaillement dans les sols naturels ou reconstitués.
- L'essai est effectué en appliquant une contrainte de cisaillement continue dans une direction rectiligne à un échantillon de sol placé à l'intérieur de la boîte de cisaillement.
- Cet essai est utilisé pour les types de sols répondant à certaines exigences, comme les sols où la taille maximale des particules est dans la plage spécifiée ($1/2 \leq h \leq 6 d_{\max}$).
- Les résultats de l'essai permettent d'extraire des paramètres essentiels tels que l'angle de frottement interne et la cohésion, qui sont nécessaires pour la conception des ouvrages géotechniques et l'analyse de la stabilité des pentes et des fondations.

- **Réalisation de l'essai de cisaillement direct:**

- a. Préparation de l'échantillon :**

- Confection des éprouvettes (dans le moule Proctor) pour les différents mélanges à la teneur en optimale (déterminée par l'essai Proctor).
 - taille d'une éprouvette du sol en utilisant une trousse coupante de diamètre 60 mm en se servant d'une presse hydraulique (figure IV.16).

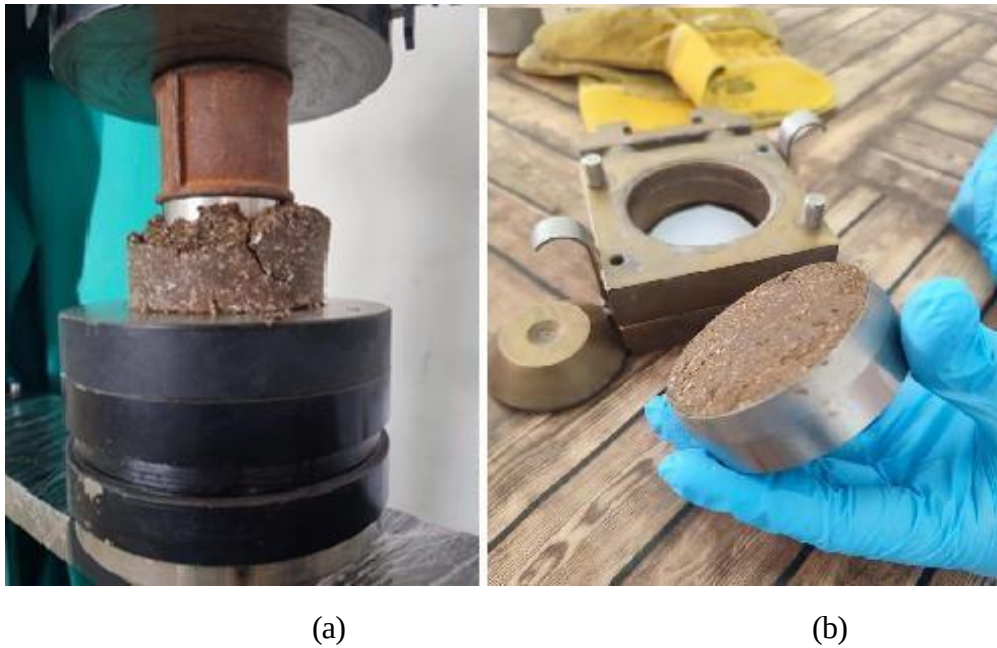


Figure III.16: Préparation des échantillons pour essais de cisaillement : (a) Taille d'un échantillon de sol en utilisant une presse hydraulique ; (b) échantillon taillé et prêt à être placé dans la boîte de cisaillement

- Pesée de l'échantillon avant insertion dans la boîte de cisaillement.

b. Montage de l'échantillon dans la boîte :

- Disposition d'une plaque drainante, d'une pierre poreuse et d'un papier filtre au fond de la demi-boîte inférieure (figure.17).



Figure III.17 : Accessoires de la boîte de cisaillement

- Positionnement de l'échantillon dans la boîte, puis fixation des deux moitiés à l'aide de vis de fixation.



Figure III.18 : positionnement de l'échantillon dans la boîte

- mise en place de l'ensemble dans l'appareil de cisaillement.

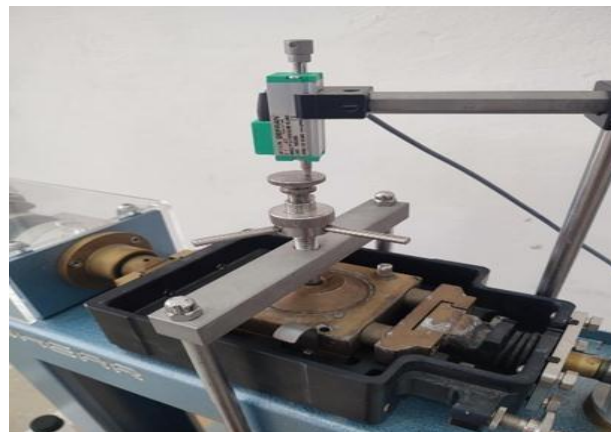


Figure III.19 : Placement de l'échantillon dans la boîte de cisaillement

- Application de la charge verticale (50, 100, 200 Kpa).



Figure III.20 : Application de la charge dans l'appareil de cisaillement

- Vérification du niveau du plateau de chargement (figure III. 21).



Figure III.21 : Ajustement du niveau avant l'essai

c. Réglage de l'appareil :

- Sélection du type d'essai sur le logiciel " essai de cisaillement direct"
- Introduction du nom de fichier résultat dans le logiciel par un intitulé reflétant l'échantillon afin de faciliter son identification lors de l'enregistrement des résultats.
- Réglage de la vitesse de cisaillement et du temps de consolidation.
- Mise à zéro des capteurs de déformation et de force.
- Après la phase de consolidation et avant de commencer le cisaillement, retirer les deux goupilles puis procéder au démarrage de l'essai en appuyant sur le bouton < " skip " puis " continu " .

d. Exécution de l'essai :

➤ **Essais Non consolidé non drainé (UU) :**

- Une contrainte de cisaillement progressive est appliquée en déplacement horizontalement sur la moitié supérieure de la boîte par rapport à la moitié inférieure à une vitesse constante 1 mm/ min (figure III.19).
- L'essai s'arrête automatiquement lorsque la durée prédéfinie 10 min est atteinte ou lorsque le déplacement atteint 10 mm (figure III.22).

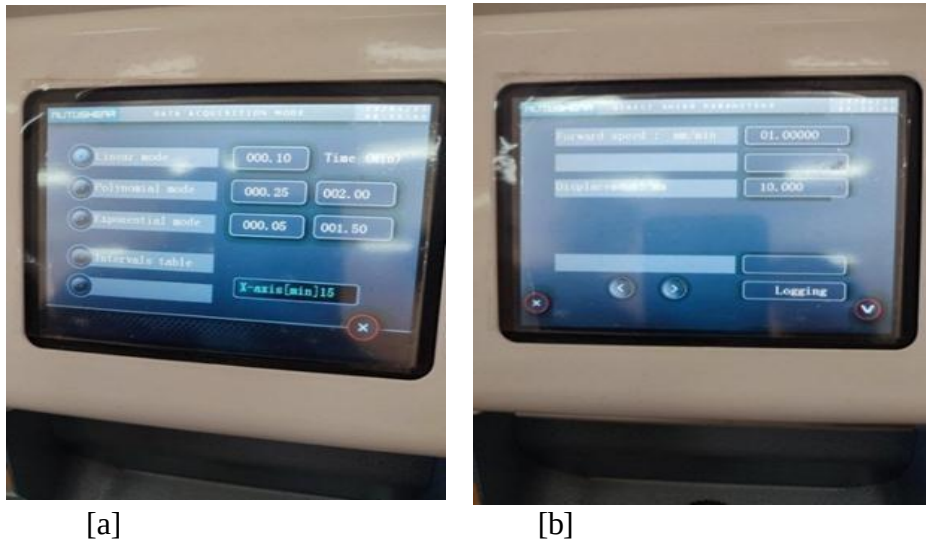


Figure III.22: [a] Réglage du temps d'acquisition, [b] Réglage de la vitesse de l'essai

- Pendant l'essai, la force de cisaillement et les déplacements horizontaux et verticaux sont enregistrés.

➤ **Essais Consolidé drainé (CD) :**

- **Phase de saturation :**

- L'échantillon est placé dans la boîte de cisaillement et fixé à l'aide des goupilles.
- La boîte est remplie d'eau distillée jusqu'à immersion complète de l'échantillon (figure III.23).
- Une faible contrainte verticale est appliquée pour faciliter la pénétration de l'eau et l'évacuation de l'air.

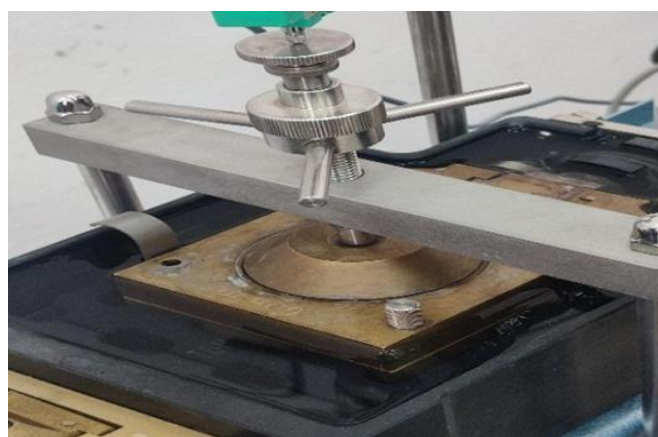


Figure III.23 : Remplissage de la boîte de cisaillement avec l'eau distillée

- Application de la contrainte verticale.
- Enregistrement des résultats.
- **Phase de cisaillement :**
 - Retirer les goupilles qui maintiennent les deux demi-boîtes .
 - Déplacer la moitié supérieure de la boîte horizontalement à vitesse constante et lente.
 - Permettre le drainage pendant le cisaillement.
- Pour l'essai CD, le temps est plus long et la vitesse est de l'ordre de 0.05 mm/min (figure.22).

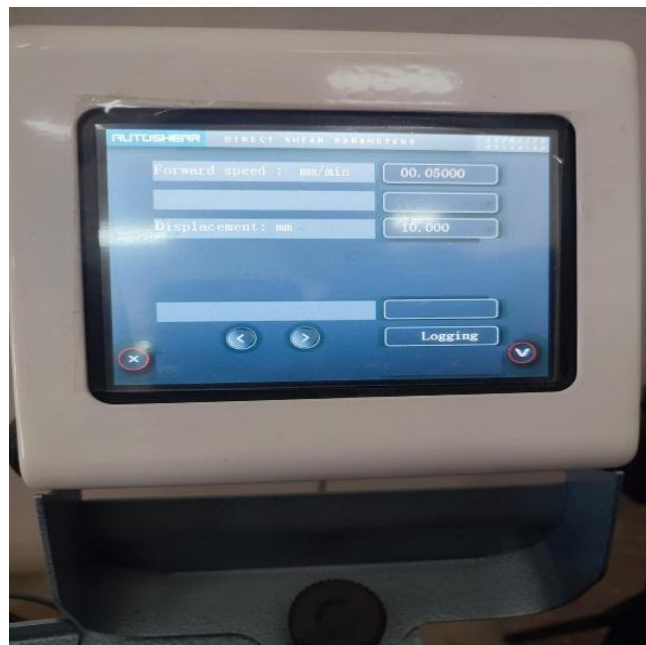


Figure III. 24: Réglage de la vitesse de l'essai CD

- e. **Démontage d'essai :**
 - Enlever les poids du plateau de charge
 - Enlever la boîte du chariot et sortir l'éprouvette de la boîte
 - Ramener la partie mobile du bâti à sa position initiale
 - Fois l'essai terminé, l'échantillon est retiré de la boîte de cisaillement pour inspecter visuellement les déplacements (figure III.25).



Figure III.25 : Echantillons après l'essai de cisaillement : (a) stockage des échantillons et (b) inspection visuelle des déplacements

III.4 Renforcement du sol par l'ajout des déchets plastiques PVC :

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé des déchets plastiques de type PVC. Ces déchets, récupérés auprès d'un atelier de menuiserie d'aluminium ont été criblés à l'aide d'un tamiseuse automatique (figure III.26) afin de les classer selon leurs dimensions. Les fractions obtenues ont été ensuite incorporées au sol étudié en différents pourcentages. On présente dans le tableau III.9 les différentes classes de fibres plastiques utilisées.



Figure III.26 : Tamiseuse automatique

Tableau III.9 : Dimensions des fibres plastiques utilisées

Classe	PVC0	PVC1	PVC2	PVC3
Dimensions (mm)	1-1.6	1.6-2	2-2.5	2.5-3.15

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'essai chimiques et mécaniques réalisés sur le sable limoneux, notamment l'essai Proctor et l'essai de cisaillement en boîte.

Ces expériences visant à déterminer les propriétés physiques et mécaniques du sol, permettant ainsi de comprendre son comportement après ajout de fibres plastiques, à court et à long terme.

Chapitre IV

Interprétation des résultats

IV.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude et à l'analyse des résultats présentés dans le chapitre précédent, en mettant principalement l'accent sur les essais Proctor et les essais de cisaillement à la boîte.

IV.2 Limites d'Atterberg :

Les résultats présentés dans la figure IV.1 montrent que l'ajout de fibres PVC modifie la consistance du sable limoneux. En effet, Pour un pourcentage de 1.5% d'ajout de PVC, l'indice de plasticité diminue sensiblement, suite à une réduction des limites de liquidité, ainsi l'indice de plasticité passe de 5 caractérisant un matériau argileux à 2.5 caractérisant un matériau peu argileux. En revanche, pour un dosage de 3% de PVC, l'indice de plasticité reste presque inchangé, car il y a augmentation, à la fois, des valeurs des limites de liquidité et de plasticité. Concernant les mélanges contenant 4.5% de PVC, les limites d'Atterberg n'ont pas pu être mesurées.

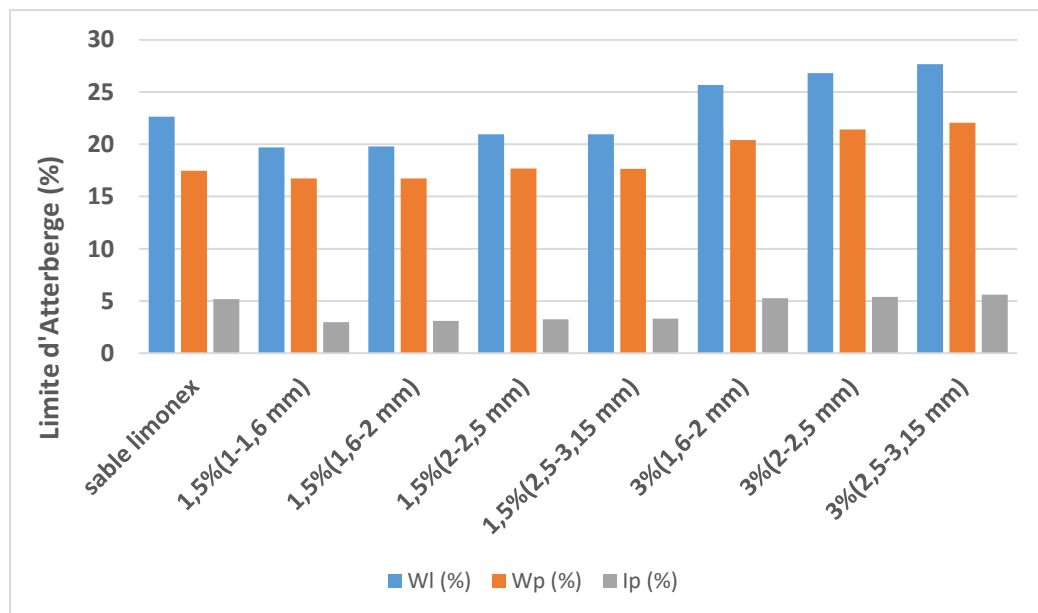


Figure IV.1 : Histogrammes représentant les limites d'Atterberg des mélanges (sable Limoneux/ fibres PVC)

VI.3 Analyse des résultats des essais Proctor :

VI.3.1 Mélanges de sable limoneux avec 1.5% PVC :

La figure IV.2 montre que l'ajout de fibre de PVC, de différentes dimensions au sable limoneux, influence clairement la densité sèche maximale ainsi que la teneur en eau optimale. On observe que le mélange contenant des fibres de dimension (1-1.6 mm) atteint la densité sèche la plus élevée. Cette amélioration est attribuée à la capacité de ces fibres courtes à se répartir de manière homogène dans le sol, ce qui favorise le rapprochement des particules et améliore l'efficacité du compactage.

En ce qui concerne l'augmentation de la teneur en eau optimale, la variation des dimensions et des proportions des fibres de PVC constitue l'un des facteurs principaux influençant cette teneur pour chaque mélange. De plus, cette eau supplémentaire contribue à améliorer la maniabilité du mélange et faciliter le processus de compactage. Il est à noter

que quand la teneur en eau optimale augmente, la densité sèche maximale diminue pour les dimensions de fibres PVC de grandes dimensions.

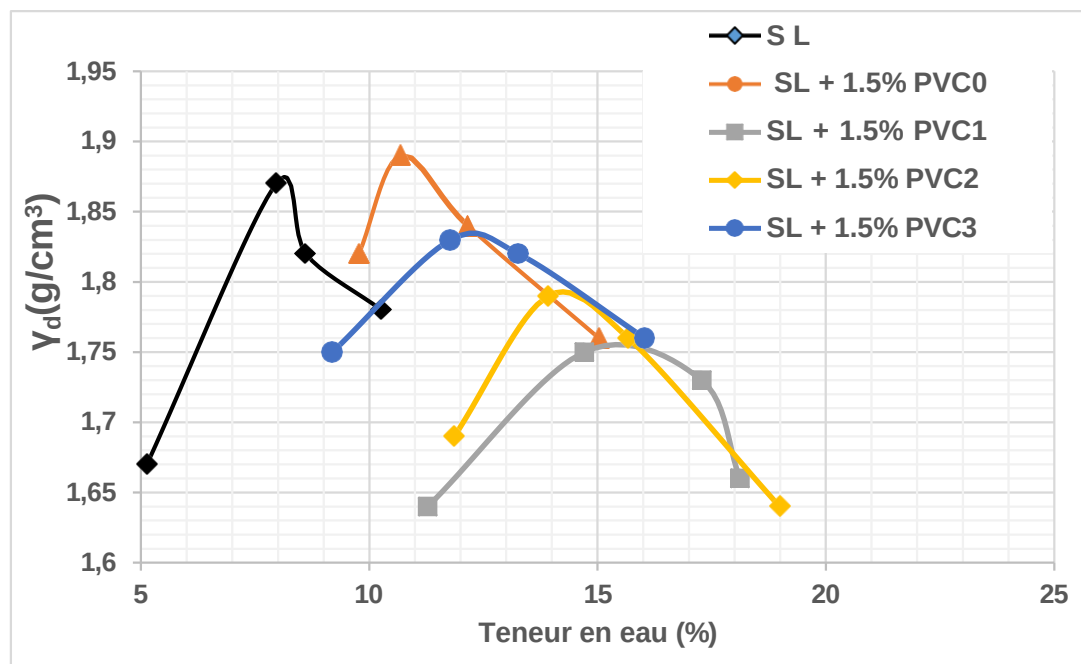


Figure VI.2 : Résultats de l'essai de Proctor des mélanges de sable limoneux avec 1.5 % de fibres de PVC

VI.3.2 Mélanges de sable limoneux et 3% PVC :

La figure IV.3 montre que l'ajoute de 3% de fibres PVC fait augmenter la teneur en eau optimale et diminuer la densité sèche maximale. La diminution de la densité sèche maximale est due à la densité des fibres plastiques par rapport à celle du sable limoneux.

Quant à l'augmentation de la teneur en eau optimale, elle est due à l'incapacité des fibres de PVC à absorber l'eau, ce qui affecte la répartition de l'humidité dans l'échantillon et nécessite une quantité d'eau plus élevée pour améliorer la maniabilité du mélange.

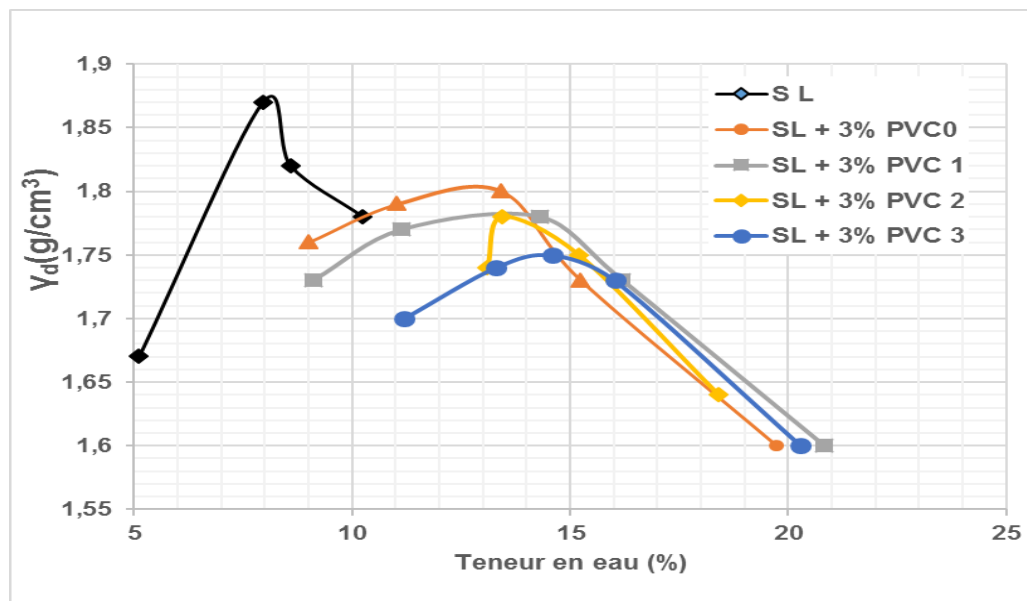


Figure IV.3 : Résultats de l'essai de Proctor du sable limoneux avec 3 % de fibre de PVC

VI.3.3 Mélange de sable limoneux et 4.5 % PVC :

La figure IV.4 illustre les résultats de l'essai Proctor avec l'ajout de 4.5 % de fibres PVC, où l'on observe qu'elle donne la même tendance que les mélanges à 3 %. La densité sèche maximale diminue plus du fait de la quantité ajoutée des fibres plastiques.

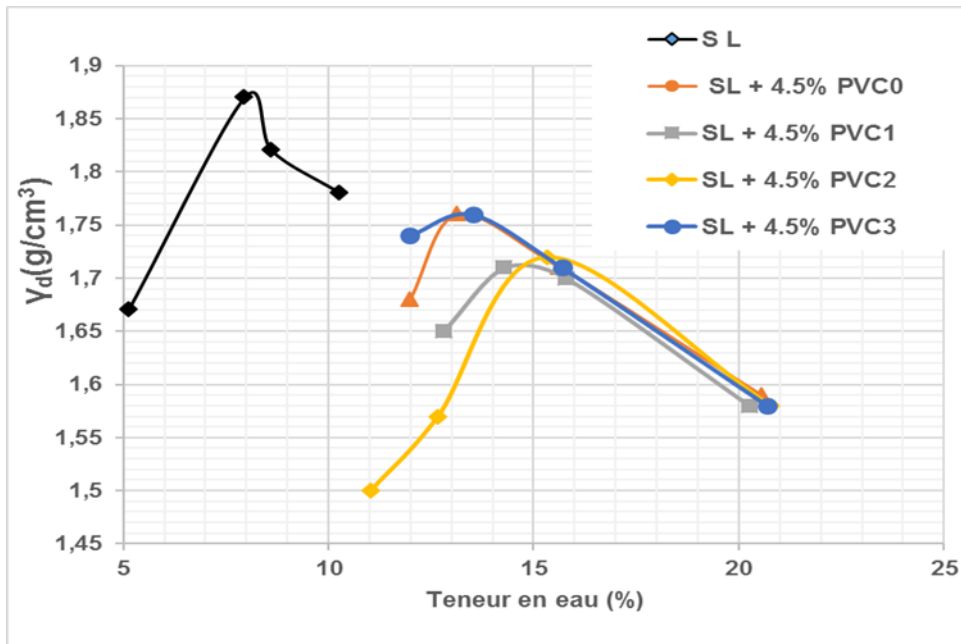


Figure IV.4 : Résultats de l'essai de Proctor des mélanges de sable limoneux avec 4.5 % de fibres PVC

La figure IV.5 récapitule les valeurs des densités sèches obtenues pour les différents mélanges. On remarque que la meilleure composition correspond à un dosage en Fibres PVC de dimensions 1-1.6 mm avec un pourcentage d'ajout de l'ordre de 1.5%. Ceci peut être dû au fait que cette classe de fibres PVC correspond à des dimensions proches de celles du sable limoneux, ce qui permet une meilleure répartition et une bonne homogénéisation, ce qui se traduit par une bonne compacité du mélange.

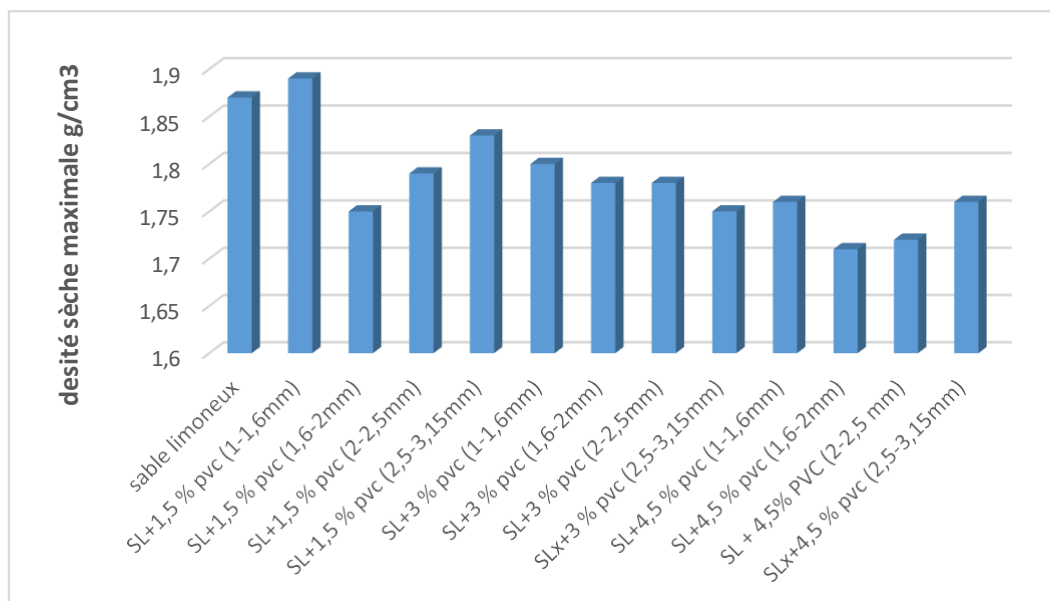


Figure IV.5 : Histogramme représentant la densité sèche maximale pour les différents mélanges

IV.4 Résultats des essais de cisaillement à la boîte :

On présente les résultats d'essais de cisaillement à la boîte réalisées sur les différents mélanges, avec et sans fibres plastiques. Il est important de noter que ces essais ont été réalisés en conditions "non consolidé non drainé UU" et "consolidé drainée CD".

IV.4.1 Essais de cisaillement UU :

On présente sur les figures IV. 6 à la figure IV.11 les résultats des essais de cisaillement effectués sur les mélanges à 1.5% de PVC. Pratiquement, on a les mêmes allures des courbes de cisaillement à différentes contraintes normales. Un tel comportement correspond à sol dense. Ceci est confirmé par les courbes de déplacement vertical comportant deux phases distinctes ; contractance-dilatance (figure IV.7).

Il a été remarqué que pour une contrainte normale de 200kPa appliquée au mélange composé de 1.5% de fibres plastiques de dimensions 1-1.6 mm, la courbe comporte un pic très marqué, ce qui montre que le mélange est très dense. D'ailleurs, la densité sèche maximale a été obtenue pour ce mélange.

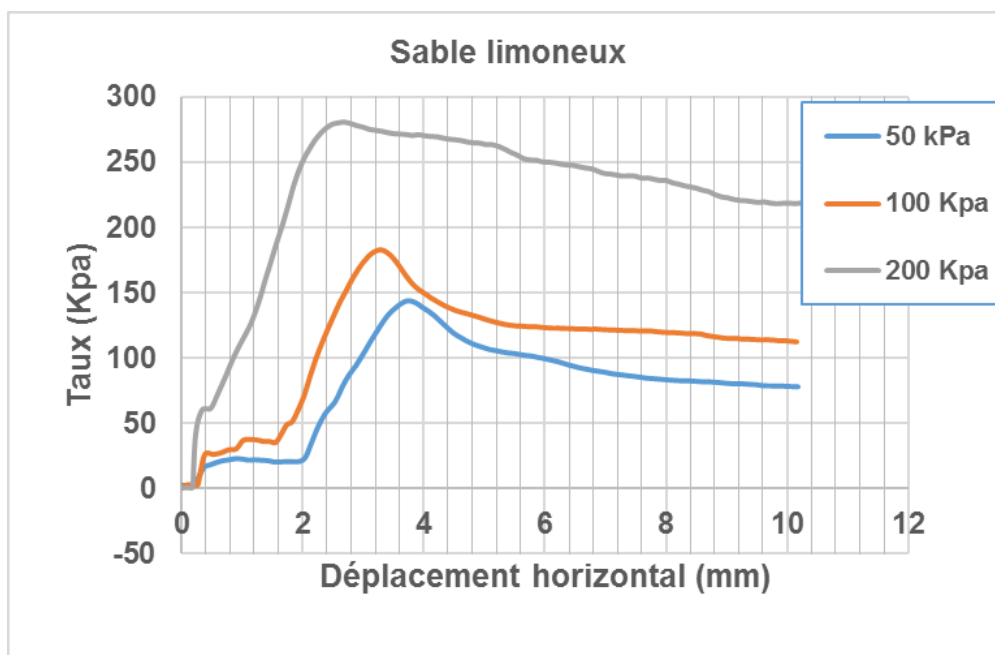


Figure IV.6 : courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux

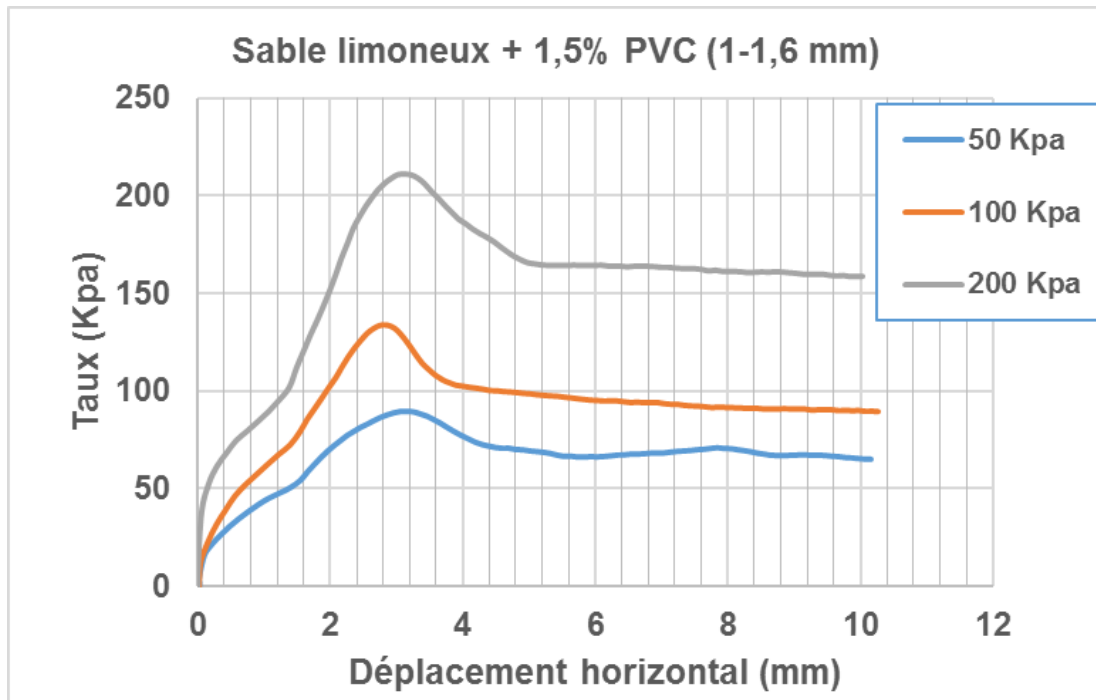


Figure IV. 7: courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 1.5% PVC0

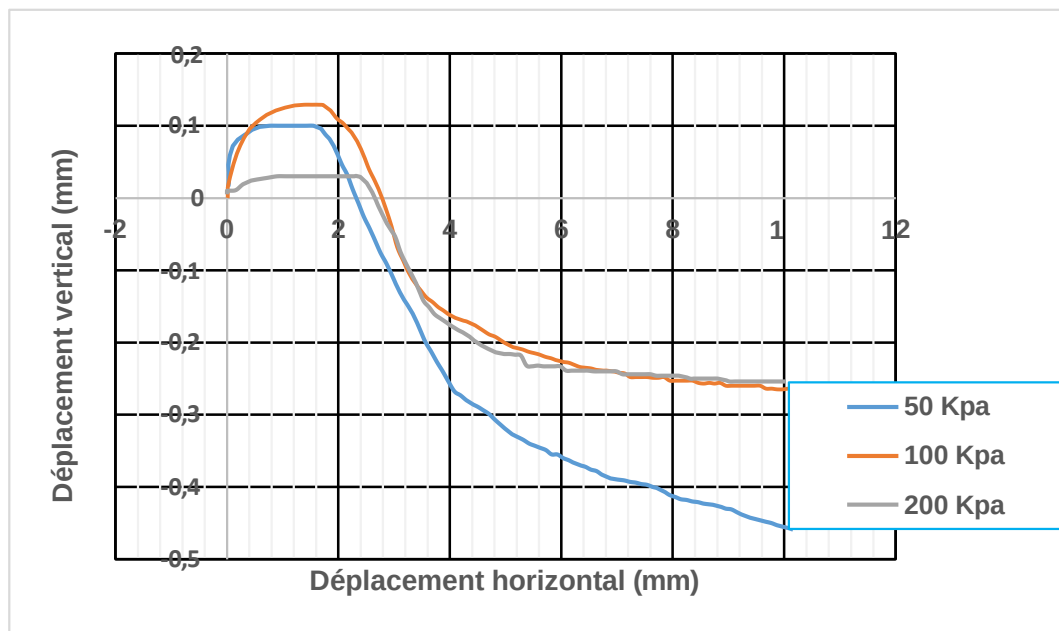


Figure IV.8 : Courbe de déplacement vertical lors du cisaillement des éprouvettes composées de sable limoneux et 1.5% PVC 0

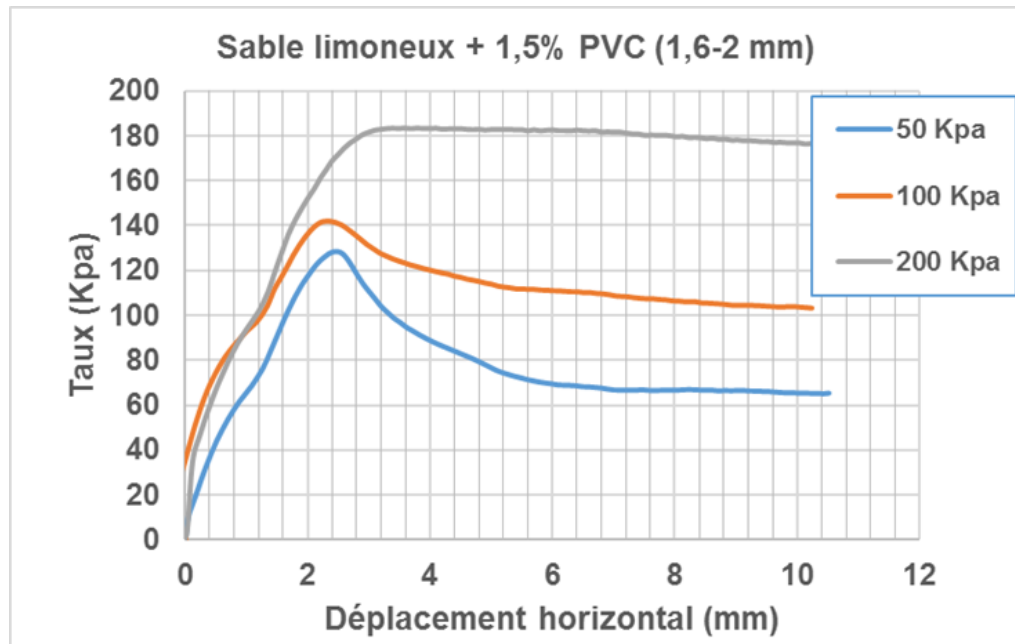


Figure IV.9 : courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 1.5% PVC1

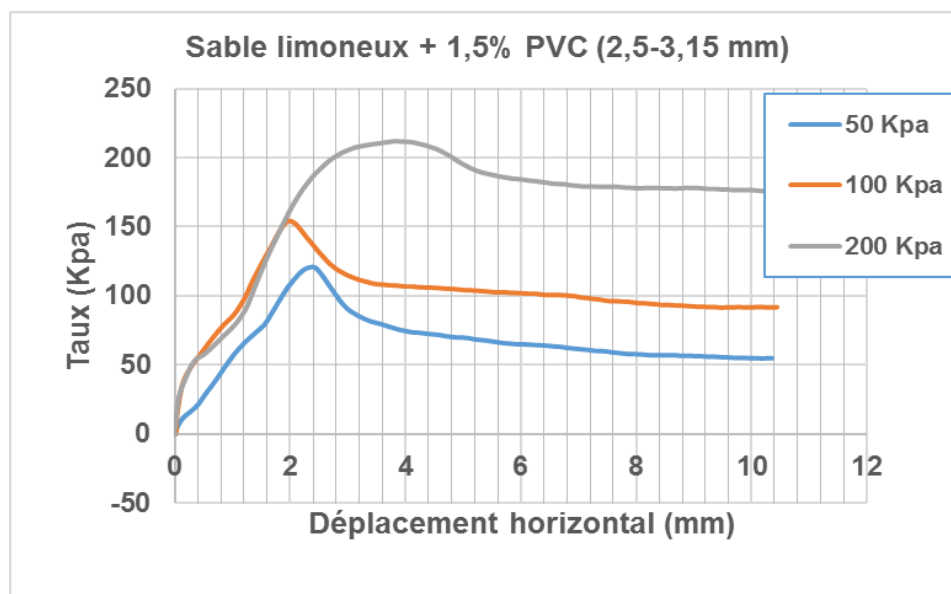


Figure IV.10 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 1.5% PVC2

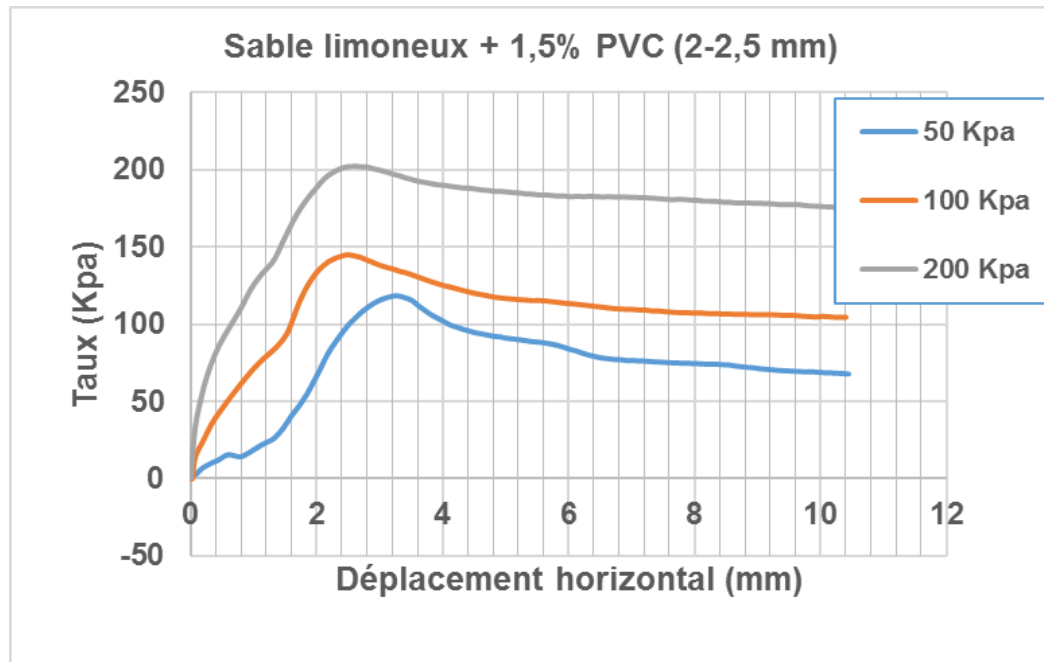


Figure IV.11 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 1.5% PVC3

Concernant le dosage de 3% et 4.5 % en fibres Plastiques de différentes dimensions, les courbes obtenues ont la même tendance que pour le dosage à 1.5%, à l'exception des niveaux des contraintes de cisaillement. Les résultats sont présentés sur les figures de IV.12 a IV.

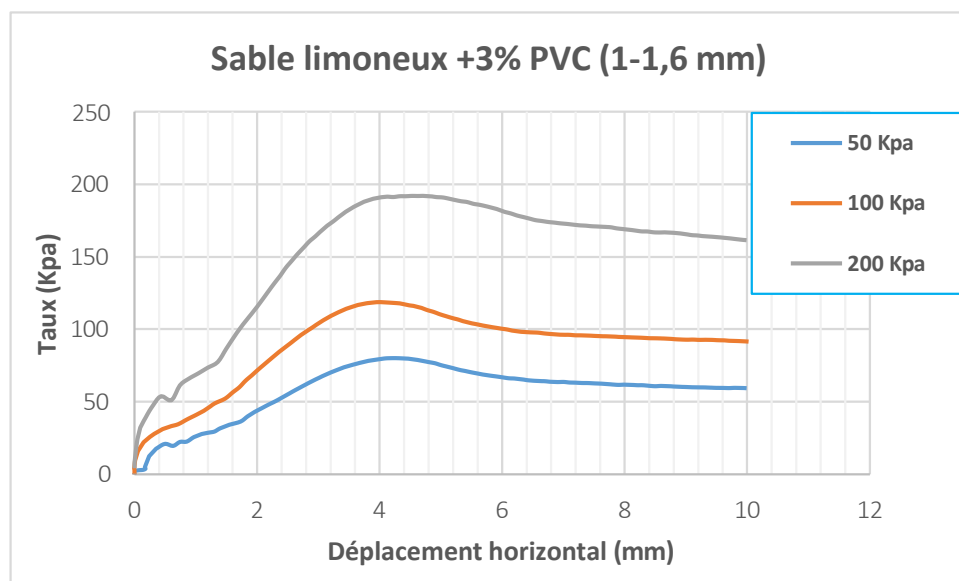


Figure IV.12 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 3% PVC0

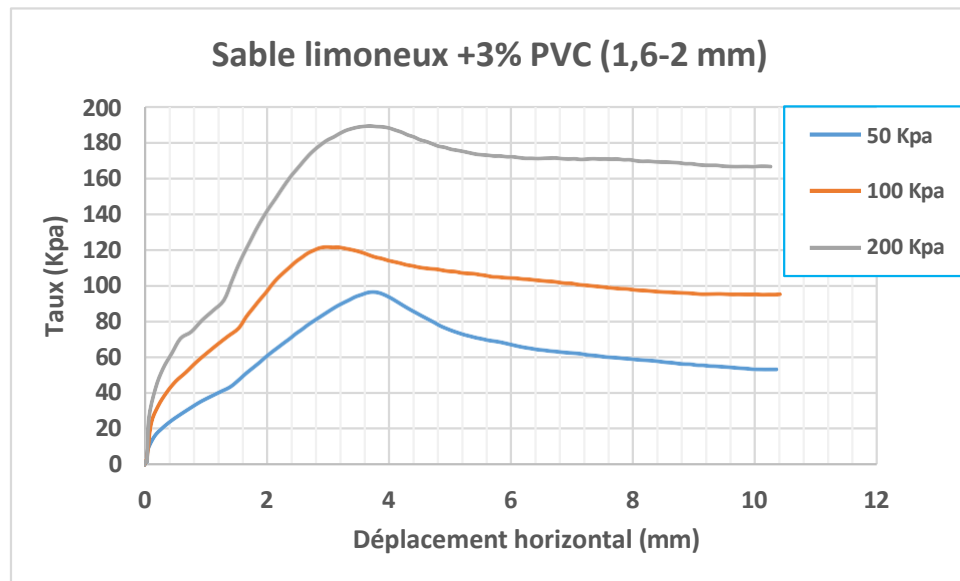


Figure IV.13 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 3% PVC1

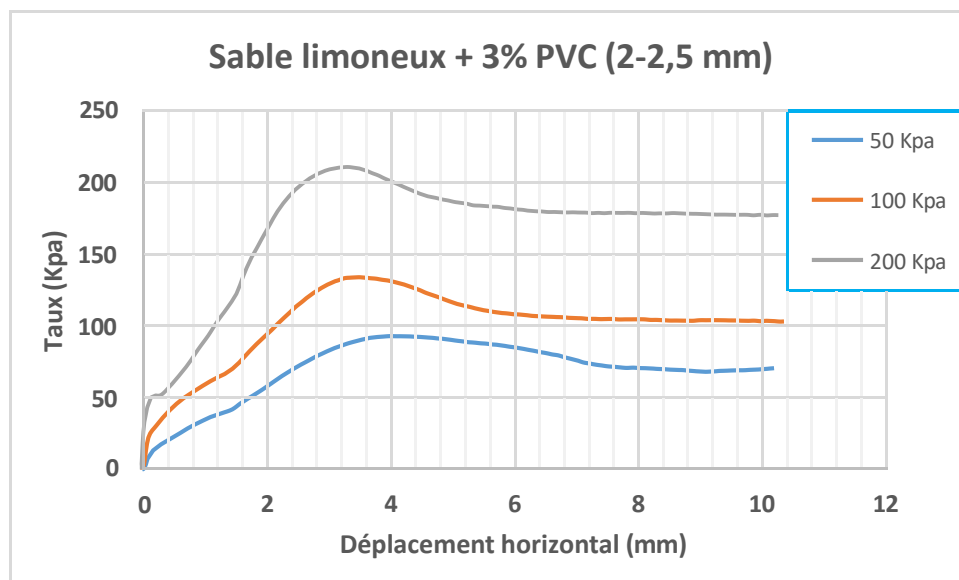


Figure IV.14 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 3% PVC2

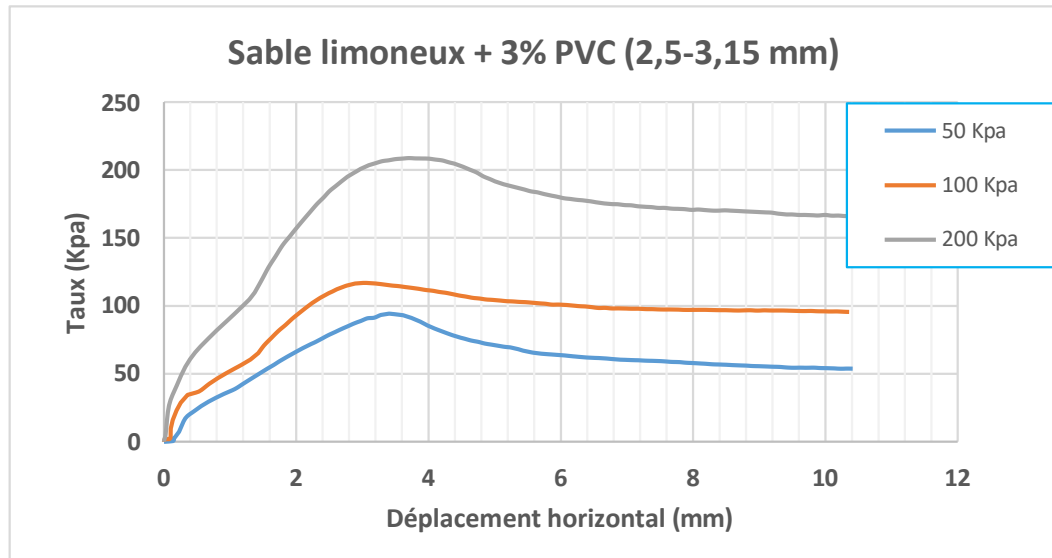


Figure IV.15 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 3% PVC3

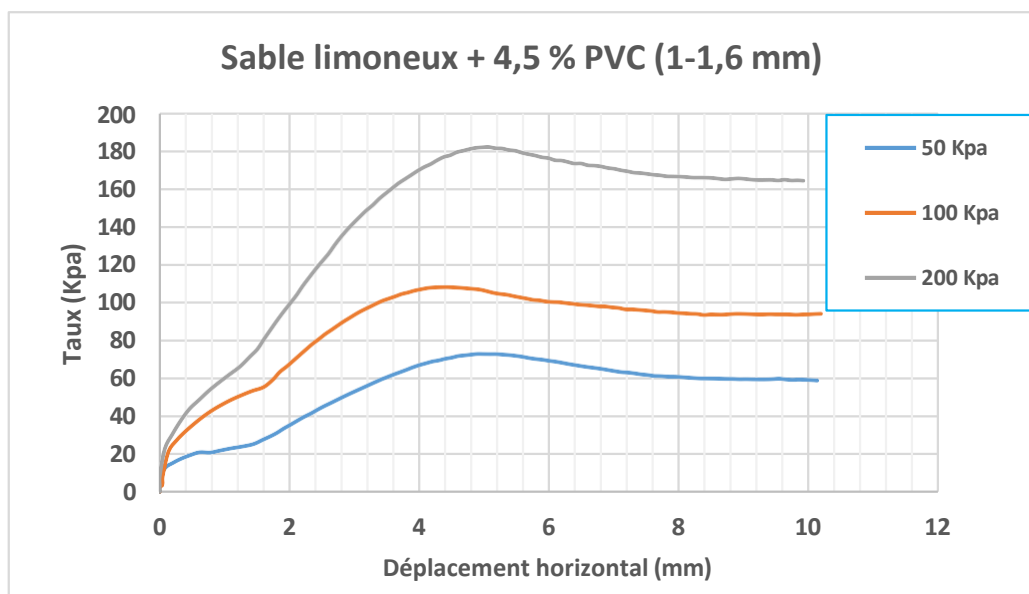


Figure IV.16 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 4.5% PVC0

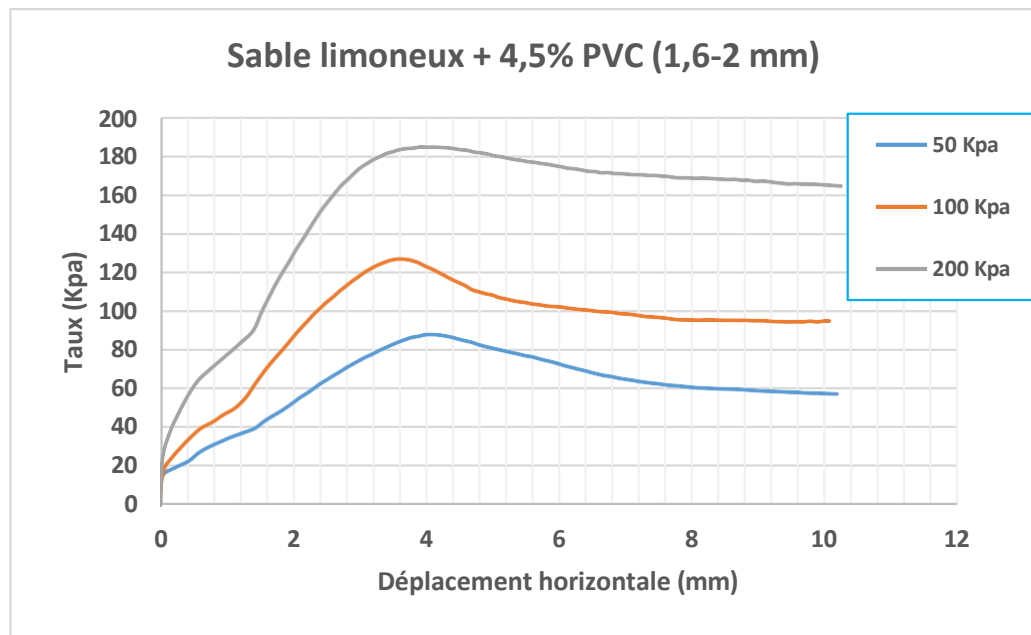


Figure IV.17 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 4.5% PVC1

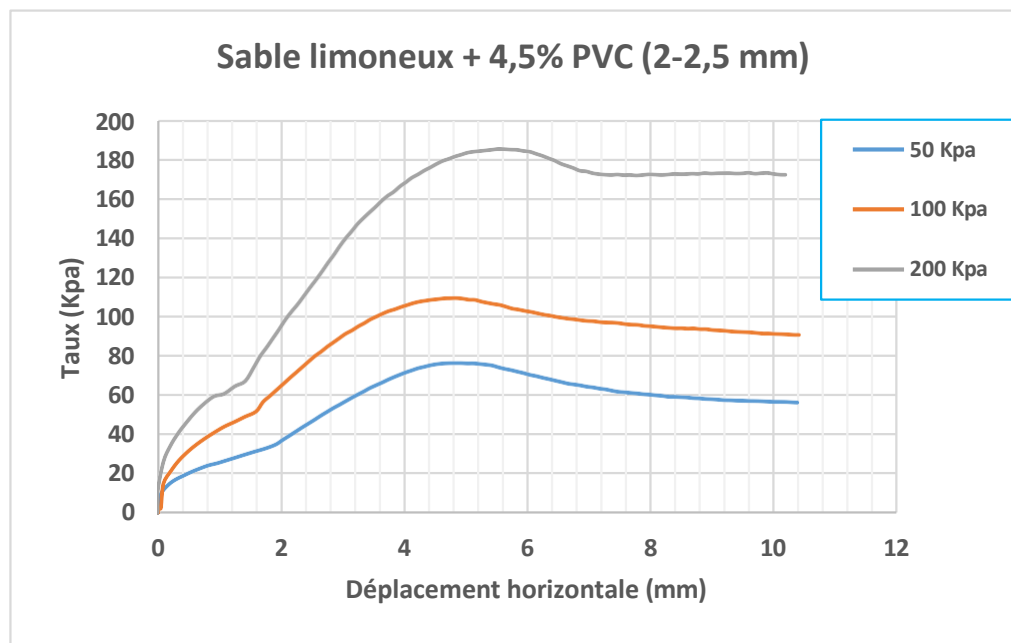


Figure IV.18 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisé sur le sable limoneux + 4.5% PVC2

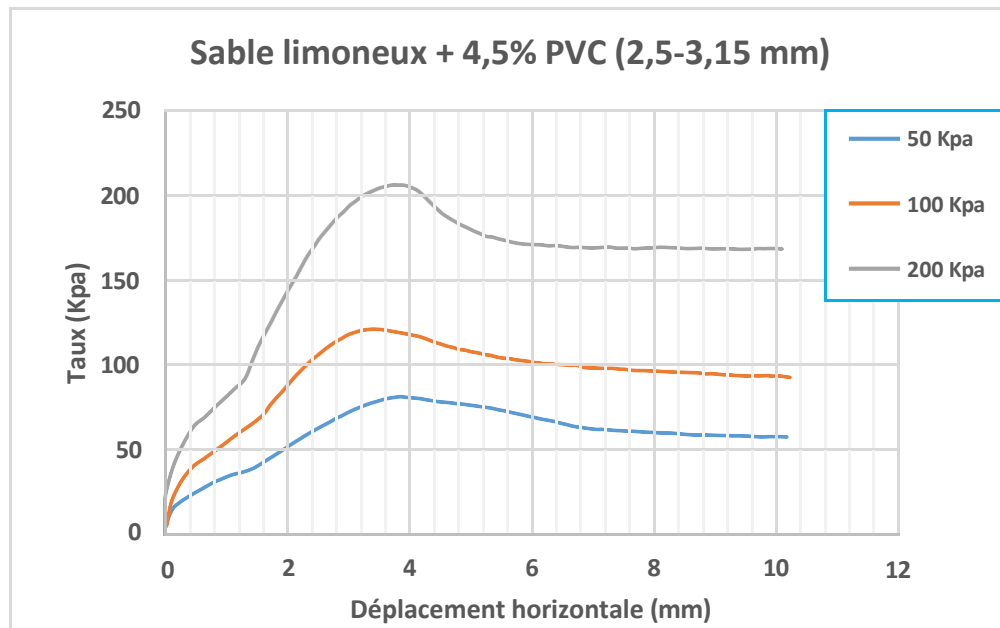


Figure IV.19 : Courbes de cisaillement direct (UU) réalisée sur sable limoneux + 4.5% PVC3

La figure IV.20 présente les résultats des cohésions non drainées pour les différents mélanges, où l'on observe que l'ajoute de fibres PVC de dimension 1.6-2 mm au sable limoneux améliore de manière significative la cohésion non drainée à court terme. Cette amélioration est due à la participation active des fibres plastiques (de dimensions 1.6-2 mm) à la résistance au cisaillement du mélange.

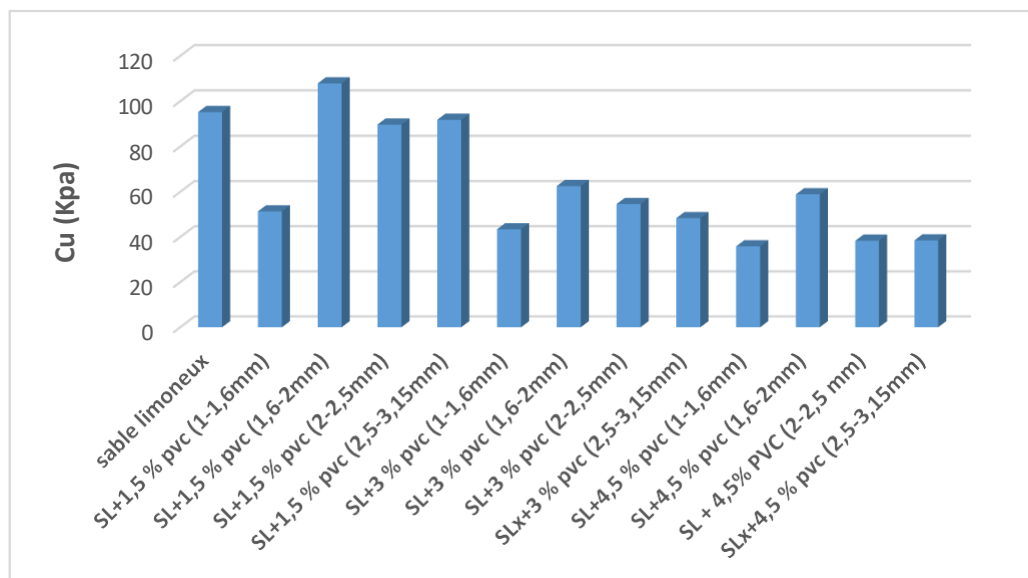


Figure IV.20 : Valeurs des cohésions non drainées pour les différents mélanges

IV.4.2 Essais de cisaillement en conditions consolidé drainé (CD) :

Les résultats de cisaillement direct en conditions CD effectués sur les différents mélanges sont présentés sur les figures de IV.21 au IV.27. La même tendance a été observé sur les courbes avec une variation des niveaux de contraintes de cisaillement à la rupture.

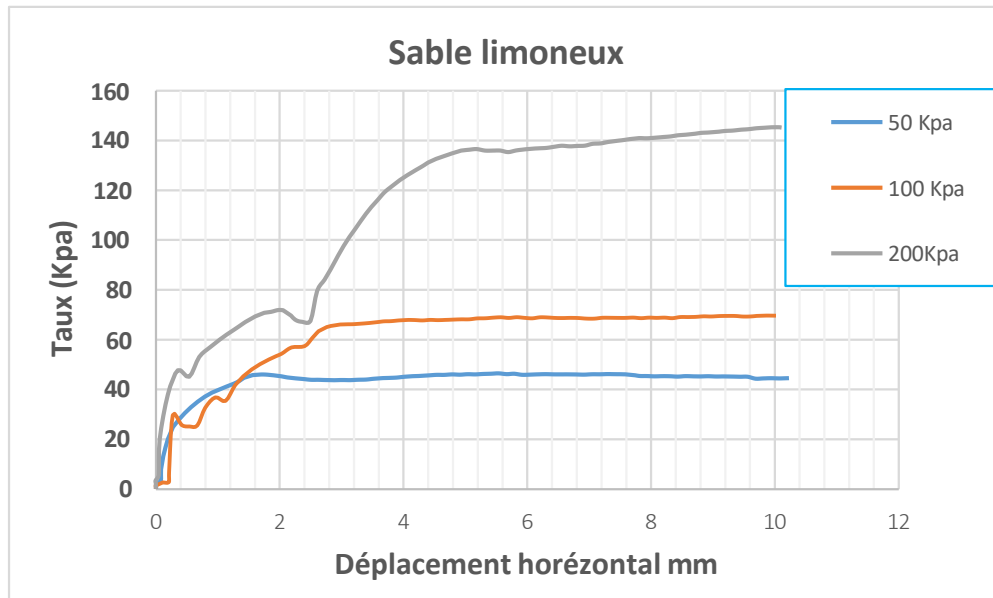


Figure IV.21 : Courbes de cisaillement direct (CD) réalisé sur le sable limoneux

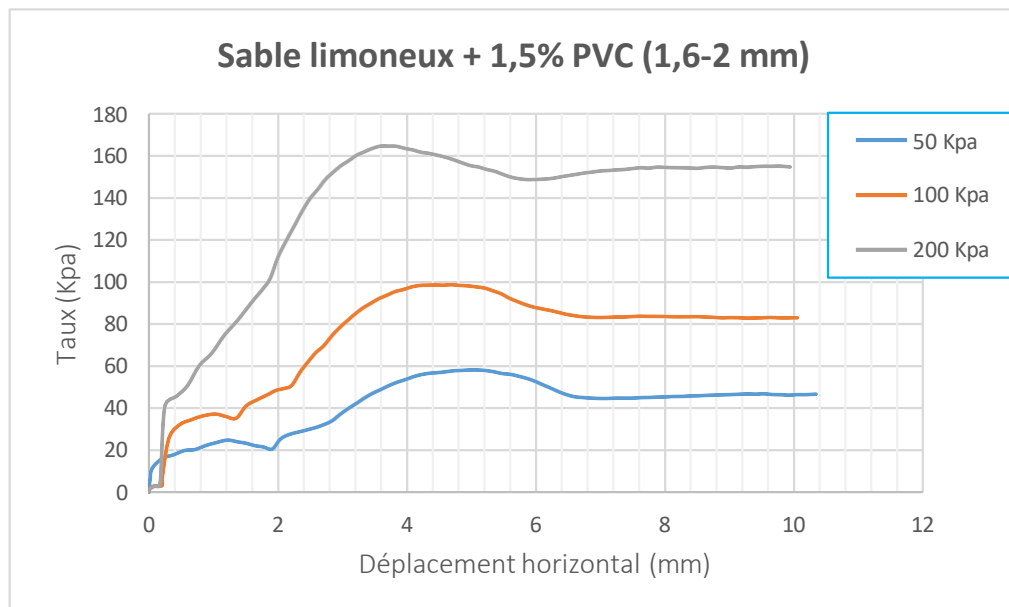


Figure IV.22 : Courbes de cisaillement direct (CD) réalisée sur le sable limoneux + 1.5 % PVC1

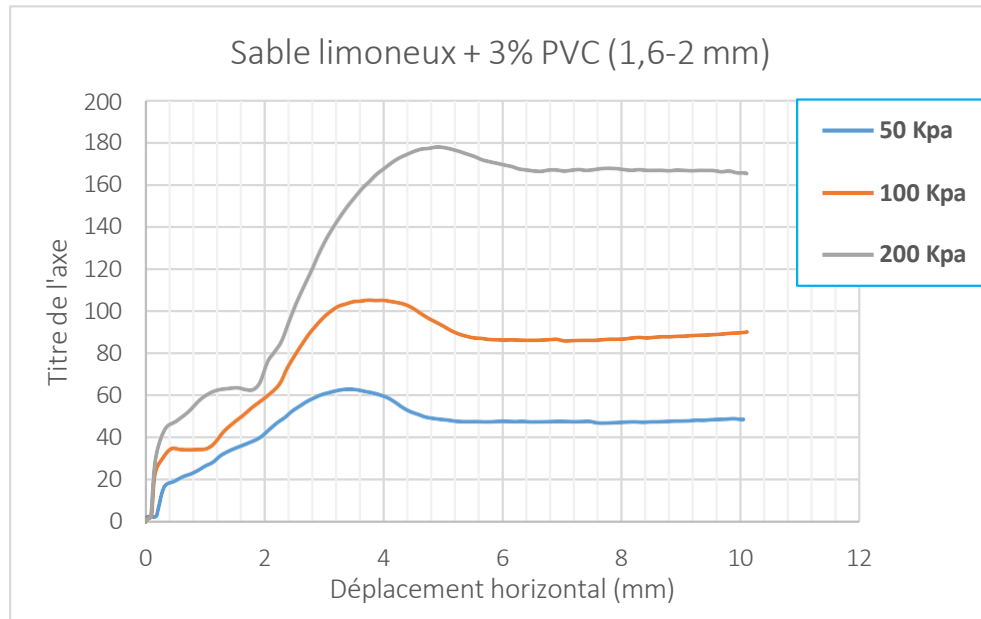


Figure IV.23 : Courbes de cisaillement direct (CD) réalisé sur le sable limoneux + 3 % PVC1

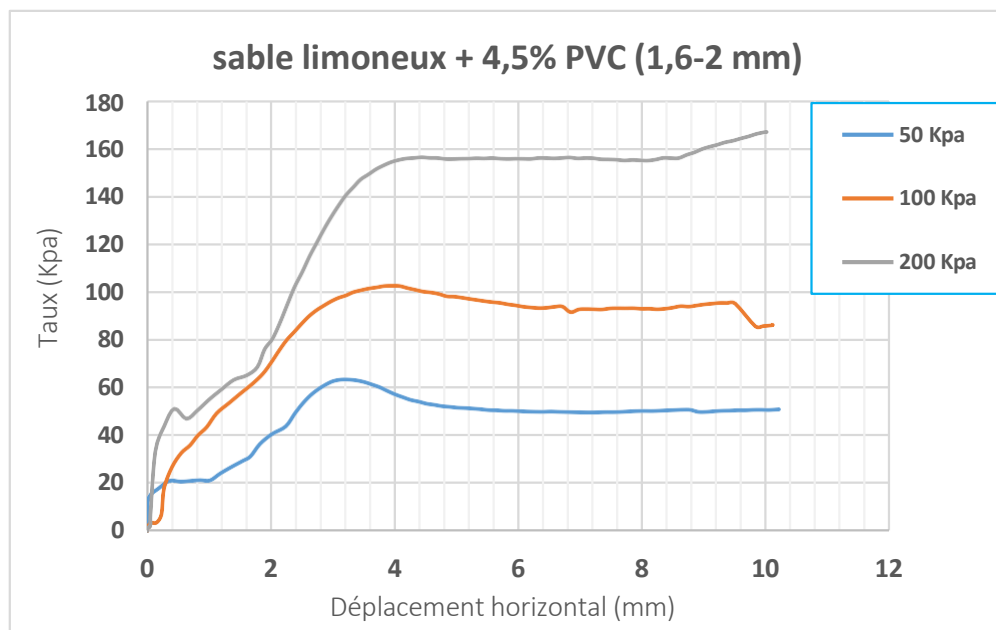


Figure IV.24 : Courbes de cisaillement direct (CD) réalisé sur le sable limoneux + 4.5 % PVC1

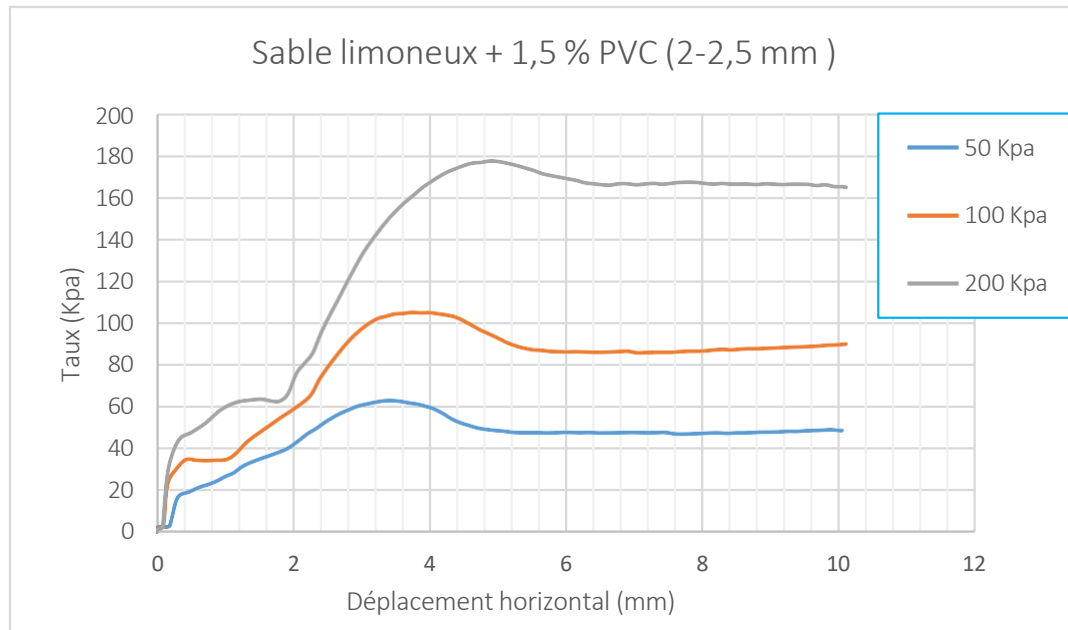


Figure IV.25: Courbes de cisaillement direct (CD) réalisée sur le sable limoneux + 1.5 % PVC2

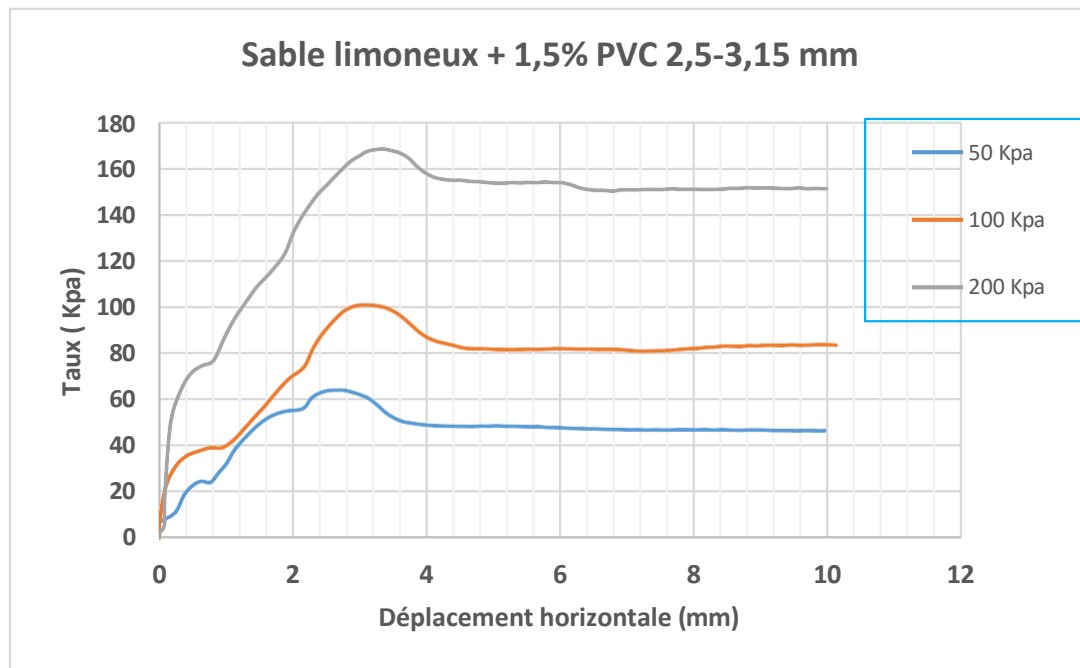


Figure IV.26: Courbes de cisaillement direct (CD) réalisée sur le sable limoneux + 1.5 % PVC3

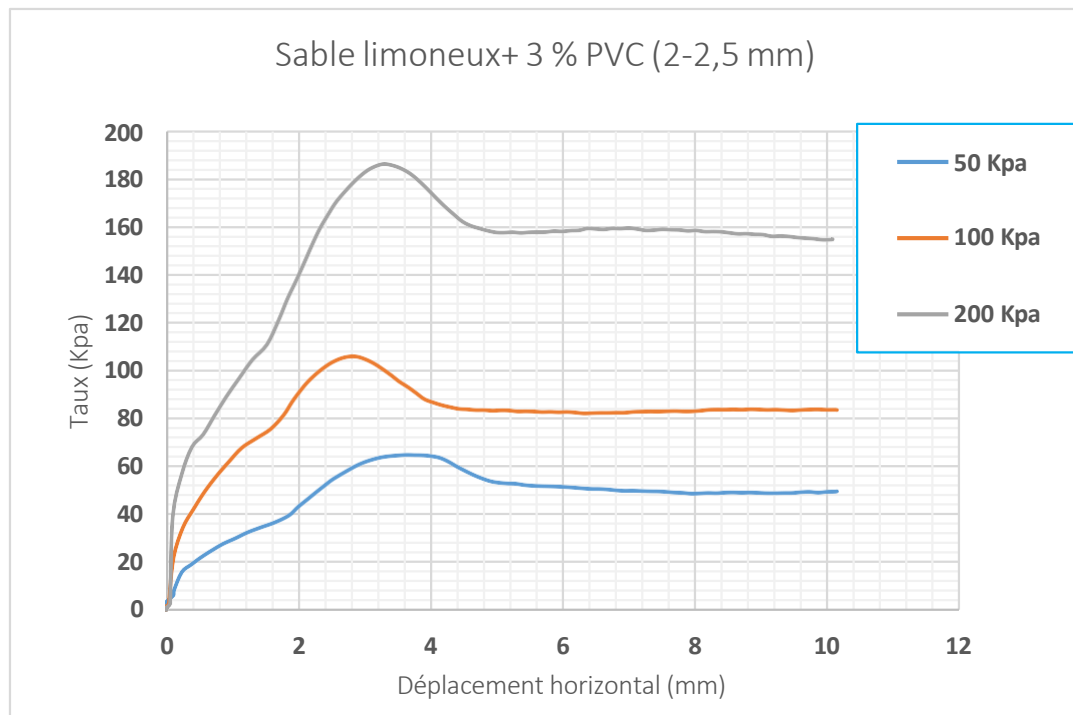


Figure IV.27 : Courbes de cisaillement direct (CD) réalisé sur le sable limoneux + 3 % PVC2

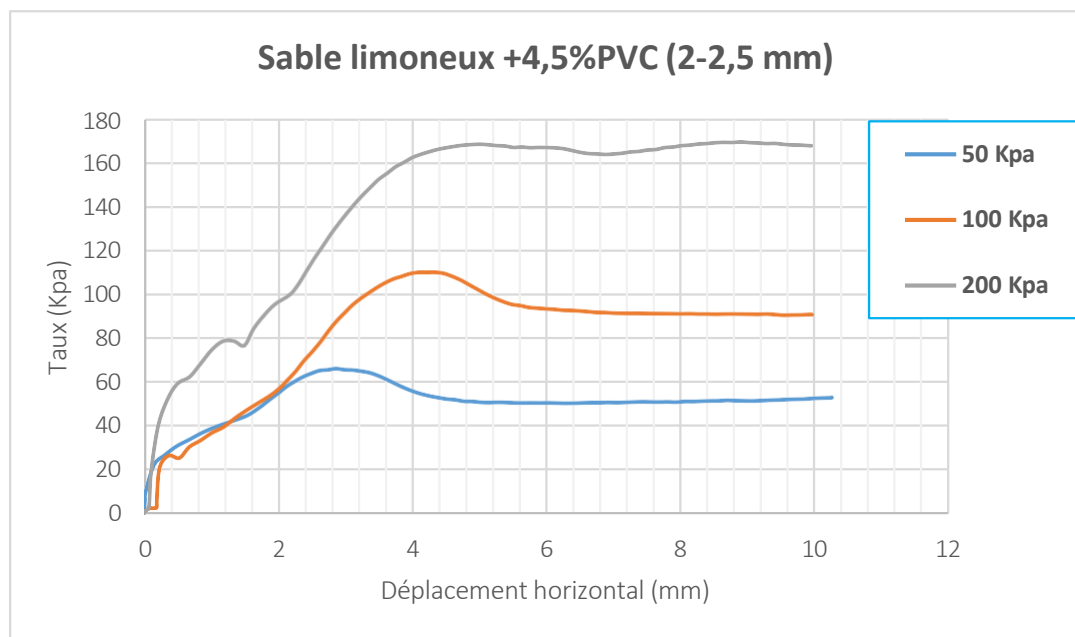


Figure IV.28 : Courbes de cisaillement direct (CD) réalisée sur le sable limoneux + 4.5 % PVC2

La figure IV.28 présente les résultats des cohésions drainées pour les différents mélanges, où l'on constate que l'ajout de fibres PVC au sable limoneux améliore de manière significative la cohésion drainée. Et cela pour l'ensemble des mélanges à différentes concentrations en fibres plastiques ainsi que pour leurs différentes.

Ce renforcement est lié à l'effet mécanique des fibres qui limitent les déplacements internes des particules du sol.

Quant à l'angle de frottement, il reste relativement stable, avec une légère amélioration dans certains cas, ce qui s'explique par le fait que les fibres influencent peu la nature du contact entre grains, mais elles favorisent une meilleure redistribution des contraintes.

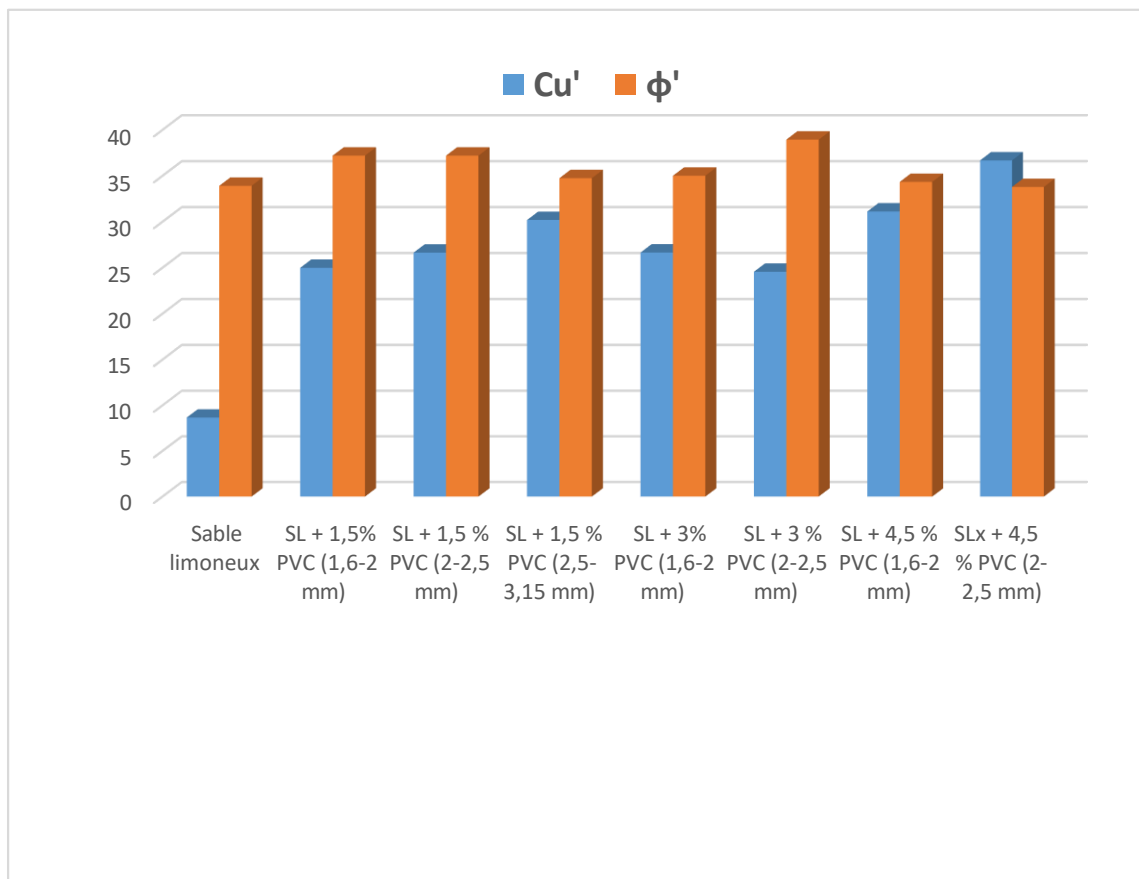


Figure IV.29 : Valeurs des cohésions drainées et des angles de frottement interne pour les différents mélanges

IV.5 Conclusions :

Les résultats expérimentaux ont montré que l'ajout de fibres de PVC ont un effet différent à court et à long terme. En effet, à court terme, l'ajout de fibres plastiques au sable limoneux n'améliore pas la cohésion non drainée, à l'exception du mélange contenant 1.5% de fibres plastiques de dimensions 1.6-2mm.

En revanche, pour le comportement à long terme, les caractéristiques intrinsèques du sable limoneux se trouvent améliorées, en particulier pour la cohésion, ainsi la résistance du matériau se trouve améliorée.

Ces résultats confirment l'intérêt de cette technique dans le cadre du renforcement des sols limoneux.

Conclusions Générales Et Perspectives

Conclusions générales

Le sable limoneux est un sol faiblement cohésif et à capacité portante limitée, ce qui restreint son utilisation dans les projets de construction et les travaux publics. En raison de ces caractéristiques peu favorables, il devient nécessaire d'améliorer son comportement géotechnique.

Dans ce cadre, la valorisation des déchets plastiques, notamment les fibres de PVC recyclées, constitue une solution innovante et durable. Elle contribue non seulement à la réduction de la pollution causée par les déchets non biodégradables, mais vise également à améliorer les performances mécaniques du sol.

L'étude expérimentale s'est concentrée sur les essais Proctor normal et les essais de cisaillement à la boîte, dans le but d'étudier son comportement à court et à long terme.

Le matériau utilisé a été caractérisé par plusieurs essais d'identification, à savoir : granulométrie, VBS, limites d'Atterberge, DRX. Ces résultats ont montré qu'il s'agit d'un sable limoneux peu plastique.

La stabilisation de ce sable limoneux a été réalisée par l'ajout de fibres plastiques issues de la menuiserie d'aluminium, avec des dimensions comprises entre 1 et 3.15 mm, et selon différentes proportions (1.5%, 3%, 4.5%).

Les essais Proctor normal ont montré que l'ajout de 1.5% de fibres de petites dimensions (1-1.6 mm) permettait d'obtenir la densité sèche la plus élevée, grâce à une meilleure répartition des fibres dans le sol. En revanche, des taux plus élevés (3% et 4.5%) ont entraîné une diminution de la densité, en raison de la faible densité propre du PVC. La teneur en eau optimale a augmenté avec l'ajout de fibres, traduisant un besoin accru en eau pour assurer une bonne maniabilité du mélange.

Concernant les essais de cisaillement, les résultats expérimentaux ont mis en évidence que l'ajout de fibres de PVC exerce un effet différent à court et à long terme. À court terme, l'incorporation de fibres plastiques dans le sable limoneux n'a pas significativement amélioré la cohésion non drainée, à l'exception notable du mélange contenant 1,5 % de fibres de PVC de dimensions 1,6–2 mm, pour lequel une légère augmentation a été observée.

En revanche, à long terme, une amélioration sensible de la résistance au cisaillement du sable limoneux a été constatée. Cette amélioration est attribuée à l'effet de renforcement

Conclusions générales

mécanique induit par les fibres, lesquelles jouent un rôle de stabilisation en limitant les déplacements internes des particules du sol.

Quant à l'angle de frottement interne, il est resté relativement stable, ce qui indique que l'effet des fibres concerne essentiellement le comportement cohésif global, plutôt que le frottement inter-granulaire.

Les résultats obtenus confirment que l'utilisation de fibres PVC recyclées représente une solution efficace pour le renforcement des sols à faible cohésion.

Concernant la continuité de ces travaux de recherche, nous proposons d'examiner les points suivants :

Etudier l'effet combiné du traitement à la chaux et le renforcement de la structure des sables limoneux sur leur portance et leur résistance à court et à long terme.

Etudier l'effet de temps de cure sur l'évolution de la résistance des éprouvettes confectionnés avec de la sable limoneux prétraité et les fibres plastiques, à 30, 60 et 90 jours.

Références

- Adaika, A. (2022). Elaboration et caractérisation des nouvelles formulations à base de pvc et déterminer leurs compositions (mémoire de master, université Mohamed khider de Biskra.
- Aouali, N. (2020). Etude en laboratoire de la contribution des géotextiles à l'amélioration de la résistance des sols limoneux (expérimentation et modélisation) (thèse de doctorat, université de Blida 1, Faculté de technologie, Département de Génie civil).
- Aouli, N., Benessalah, I., Arab, A., Bassem, A. (2018). Shear strength response of fibre reinforced Chlef (Aléria) silty sand : laboratory study. *Geotechnical and Geological Engineering*.
- Arab, A. (2009). Comportement monotone et cyclique d'un sable limoneux. *Comptes Rendus Mécanique*, 337, pp 621-631.
- Arab, A., Belkhatir, M., Sadek, M., et Shahrour, I. (2012, octobre). Techniques d'Amélioration des sols dans les zones sismiques. In 1er colloque International sur l'Amélioration des sols, Chlef, Algérie, pp. 2-9.
- Arab, A., Shahrour, I., Hamoudi, S., et Lancelot, L. (2008). Effet de la fraction des fines sur le comportement d'un sable limoneux. *Revue Française de Géotechnique*, (122), pp. 37-43.
- Belkhatir, M., Missoum, H, Arab, A., Della, N., Schanz, T. (2010). Influence of intergranular void ratio on monotonic and cyclic undrained shear response on sandy soils. *C. R. Mecanique*. 338 (2010) ,290-303.
- Belle, F. G. (1993). *Engineering treatment of soils*. London, UK : E & FN Spon.
- Benghalia, Y., Bouafia, A, Canou, J., Dupla, J.C. (2015). Liquefaction susceptibility study of sandy soils : Effect of low plastic fines. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(2), 605-618.
- Bian, H., Nishimura, T., Arab, A., et Shahrour, I. (2012). Influence de la saturation sur le comportement cyclique d'un sable. *Laboratoire mécanique de Lille and Ashikaga Institue of Technology, Tochigi, Japan*, 2007.
- Bouferra, R., Shahrour, I. (2004). Influence of fines on the resistance to liquefaction of a clayey sand. *Ground Improvement*, 8(1), 1-5.

Références

- Boutamine, M. Rahal, A. (2013). Étude mécanique thermique et économique de quelque mélange à base de pvc proposé par l'ENICAB de BISKRA (mémoire de master, université Mohamed khider – Biskra.
- Boutamine., M. Rahal, A. (2013). Étude mécanique thermique et économique de quelque mélange à base de pvc proposé par l'ENICAB de BISKRA (mémoire de master, université Mohamed khider – Biskra.
- Boutiara, H., et Ferrah, Y. (2021). Etude du comportement mécanique des propriétés de cisaillement d'un sable limoneux stabilisé par une émulsion de bitume (Mémoire de master, Université Yahia Fares de Medea).
- Canou, J., Benahmed, N., Dupla, J. C., et Gennaro, D. (2000). Instabilités de liquéfaction et phénomène de mobilité cyclique dans les sables. Revue Français de Géotechnique. (98), PP 29-46.
- Cho, G.C., Dodds, J., et Santamarina, J.C. (2006). Particale shape effects on packing density, stiffness, and strength : Natural and crushed sands. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 132(5).591-602.
- Della, N., Arab, A., Belkhatir, M. (2010). A laboratory study of the initial structure and the overconsolidation effects on the undrained monotonic behavior of sandy soil from Chlef region in northern Alegria. Arab J Geosci 4(5-6).983-991.
- Della, N., Belkhatir, M., Arab, A., et Missoum, H. (2012). Etude expérimentale de la monotone d'un matériau granulaire : effet de l'état initial. 1er colloque International sur l'Amélioration des sols, Chlef, Algérie, 21-22 octobre.
- Guo, P., & Su, X. (2007). Shear strength, interparticle locking, and dilatancy of granulaire materials. Canadian Geotechnical Journal, 44(5), 579-591.
- Halbigue, N., et Baghdadi, F. (2022). Evaluation expérimental sur le comportement mécanique du mélange sable limoneux-ciment (Mémoire de master, université Yahia Fares de Medea.
- Holtz, R. D., et Kovacs, W.D (1981). An introduction to geoyechnical engineering. Englewood cliffs, NJ : Prentice-Hall.
- Kedendel, A., et Sadedine, I. (2019). Etude expérimentale sur les comportements mécaniques de sable limoneux renforcé par les fibres de verre (Mémoire de master, Université Yahia Fares de Medea).
- Liausu, P. (1981). Vibrations engendrées par le compactage dynamique. Revue Française de Géotechnique, (14 bis), pp. 134-138.

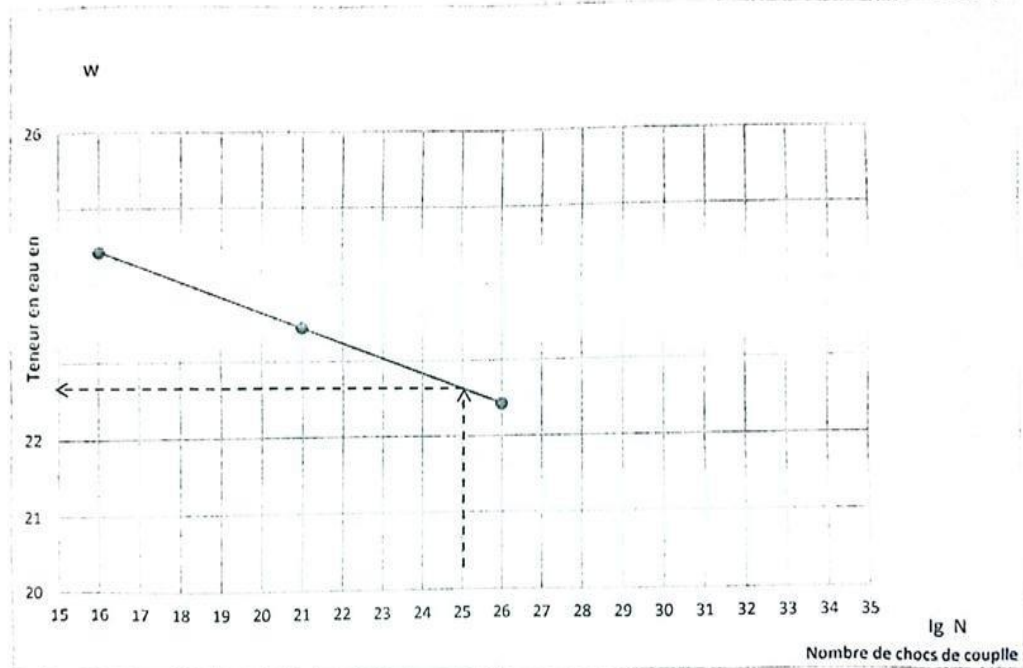
Références

- Miri, M R., et Lekmouchi, I. (2017). Etude d'un linge de recyclage du plastique (Mémoire de master, Université Saad Dahleb de Blida).
 - Moudjeb, L. Mebrouki, S. (2020). Aspect théorique de modification chimique de pvc 4000m avec des amines, synthèse, caractérisation et application (mémoire de master académique, université kasdi merbah –Ouargla
 - Nadja., K. Hachoud, A. (2022). Plastification du pvc (mémoire de master, université kasdi merbah-Ouragla.
 - Naeini, S. A., et Baziar, M. H. (2004). Effect of fines content on steady-state strength of mixed and layered samples of a sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24 (2), 181-187.
 - Rouabhia, E H., et Zedadra, H. (2017). Amélioration des sols (Mémoire de master, Université 08 Mai 1945 de Guelma.
 - Santamarina, J.C., Cho, G.C. (2001). Determination of critical state parameters in sandy soils-simple procedure. *Geotechnical Testing Journal*, 24(2), 185-192.
 - Senouci, n. Hedjal, n. (2015). Etude comparative de la dégradation du pvc poudre et plastifié (mémoire de master, université ibn khaldoune-tiaret
 - Senouci., N. Hedja., N. (2015). Etude comparative de la dégradation du pvc poudre et plastifié (mémoire de master, université ibn khaldoune-Tiaret.
 - Shinohara, K., Oida, M., et Golman, B. (2000). Effect of particle shape on angle of internal friction by triaxial compression test. *Powder Technology*, 107(1-2), 131-136.
 - Viad, Y.P, & Sivathayalan, S. (1996). Errors in estimates of void ratio of laboratory sand specimens. *Canadian Geotechnical Journal*. 33(6), 1017-1020.
 - Yilmaz, Y., Mollamahmutoglu, M., Ozaydin, V., et Kayabali, K. (2008). Experimental investigation of the effect of grading characteristics on the liquefaction resistance of various graded sands. *Engineering Geology*, 100(3-4), 91-100.
1. <http://www.metaux-detail.com/>
 2. <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.7617107>
 3. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>
 4. <https://www.pvcinfo.be/>
 5. « [http:// www.gaggione.fr/downloads/polychloruredevinylepvc.pdf](http://www.gaggione.fr/downloads/polychloruredevinylepvc.pdf) »
 6. <https://www.keller-algerie.com/>

Annexes

Annexes

Client :	0	PROCES VERBAL D'ESSAI DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG Conformément à la norme NFP 94-051	
Projet :	0		
Lieu :		Dossier :	0
Méthode de prélèvement : MELANGE		Sondage :	SONDAGE N°
DATE :	00/01/1900	Profondeur:	0



Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande

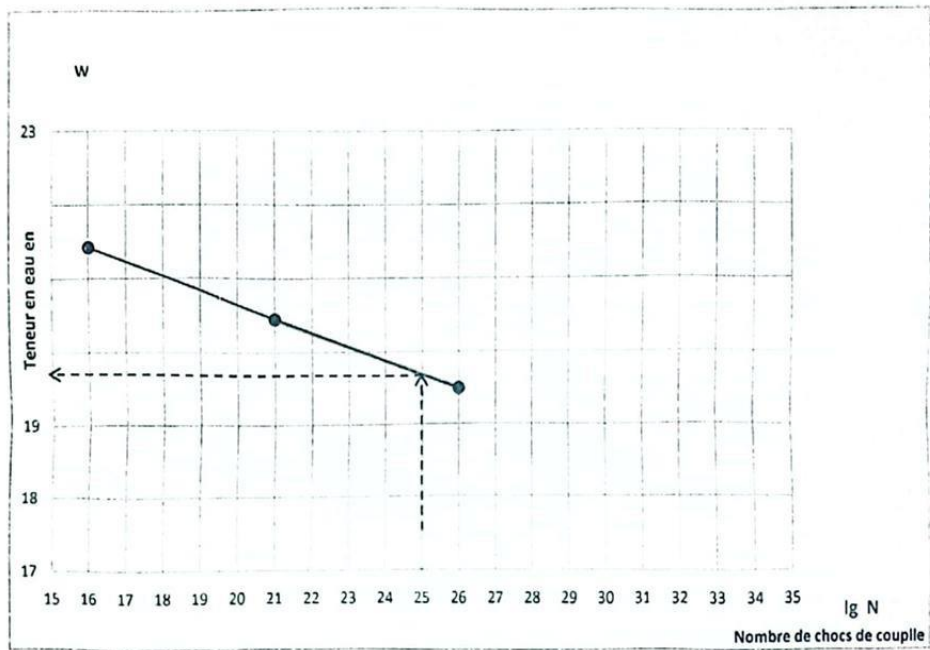
Mesures n°	1	2	3
Teneur en eau (%)	24,44	23,45	22,43
Nombre de coups N	16	21	26

Teneur en eau de plasticite (%)	W= 16,89	W= 17,03	W= 18,56	WP= 17,89
	W= 17,16		W= 17,22	
Limite de liquidite :WL= 22,63 (%)	Indice de plasticité Ip = 5,17			
Limite de plasticité:Wp= 17,46 (%)				

Annexes

P.O. - Unité de TIARET

Client :	0	PROCES VERBAL D'ESSAI DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG Conformément à la norme NFP 94-051	
Projet :	1.5% PVC - Ø1 - 1.6 mm		
Lieu :		Dossier :	0
Méthode de prélèvement :	MELANGE	Sondage :	0
DATE :	23/04/2025	Profondeur:	0



Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande

Mesures n°	1	2	3
Teneur en eau (%)	21.43	20.45	19.49
Nombre de coups N	16	21	26

Teneur en eau de plasticité (%)	W= 16.92 W= 16.44	W= 16.68	W= 16.97 W= 16.55	WP= 16.76
Limite de liquidité :WL= 19.70 (%)	Indice de plasticité Ip = 2.98			
Limite de plasticité:Wp= 16.72 (%)				

Annexes

CD 44B
8.61 7.01
26

O. - Unité de TIARET

Client : 0	PROCES VERBAL D'ESSAI DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG Conformément à la norme NFP 94-051
Projet : 1.5% PVC - Ø1.6 - 2 mm	
Lieu :	Dossier : 0
Méthode de prélèvement : MELANGE	Sondage : 0
DATE : 23/04/2025	Profondeur: 0

Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande

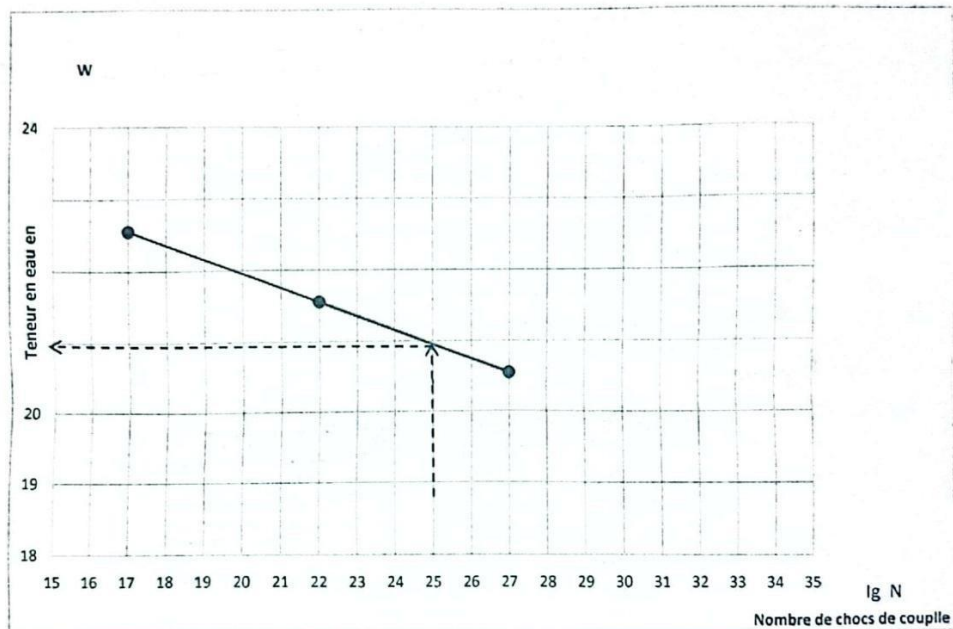
Mesures n°	1	2	3
Teneur en eau (%)	21.56	20.59	19.58
Nombre de coups N	16	21	26

Teneur en eau de plasticité (%)	W _p = 16.87	W _p = 16.59	W _p = 16.91	W _p = 16.78	WP = 16.85
Limite de liquidité : W _L = 19.80 (%)	Indice de plasticité Ip = 3.08				
Limite de plasticité : W _p = 16.72 (%)					

Annexes

..T.P.O. - Unité de TIARET

Client :	0	PROCES VERBAL D'ESSAI DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG Conformément à la norme NFP 94-051	
Projet :	1.5% PVC - Ø 2 - 2.5 mm		
Lieu :		Dossier :	0
Méthode de prélèvement :	MELANGE	Sondage :	0
DATE :	23/04/2025	Profondeur:	0



Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande

Mesures n°	1	2	3
Teneur en eau (%)	22.56	21.56	20.55
Nombre de coups N	17	22	27

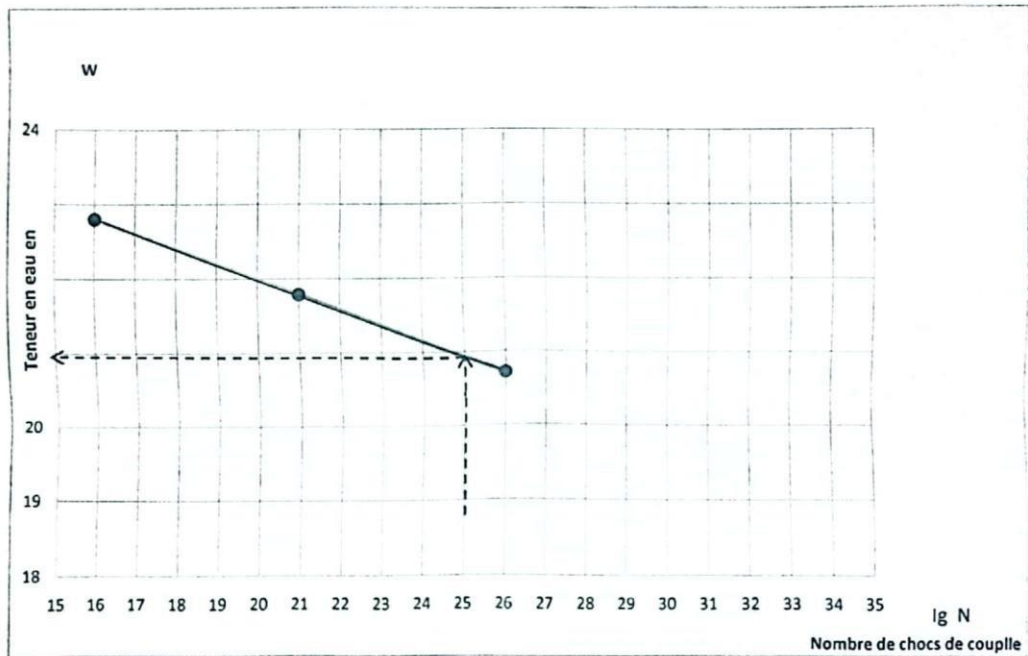
Teneur en eau de plasticité (%)	W= 17.71 W= 17.90	W= 17.80	W= 17.71 W= 17.44	WP= 17.58
Limite de liquidité : WL= 20.95 (%)	Indice de plasticité Ip = 3.26			
Limite de plasticité : Wp= 17.69 (%)				

Annexes

21	CA	6.39
14	6.01	5.98
5.72	6.61	4.00
3° ESSAI	26	F3

P.O. - Unité de TIARET

Client : 0	PROCES VERBAL D'ESSAI DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG Conformément à la norme NFP 94-051
Projet : 1.5% PVC - Ø 2.5 - 3.15 mm	
Lieu :	Dossier : 0
Méthode de prélèvement : MELANGE	Sondage : 0
DATE : 23/04/2025	Profondeur: 0



Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande

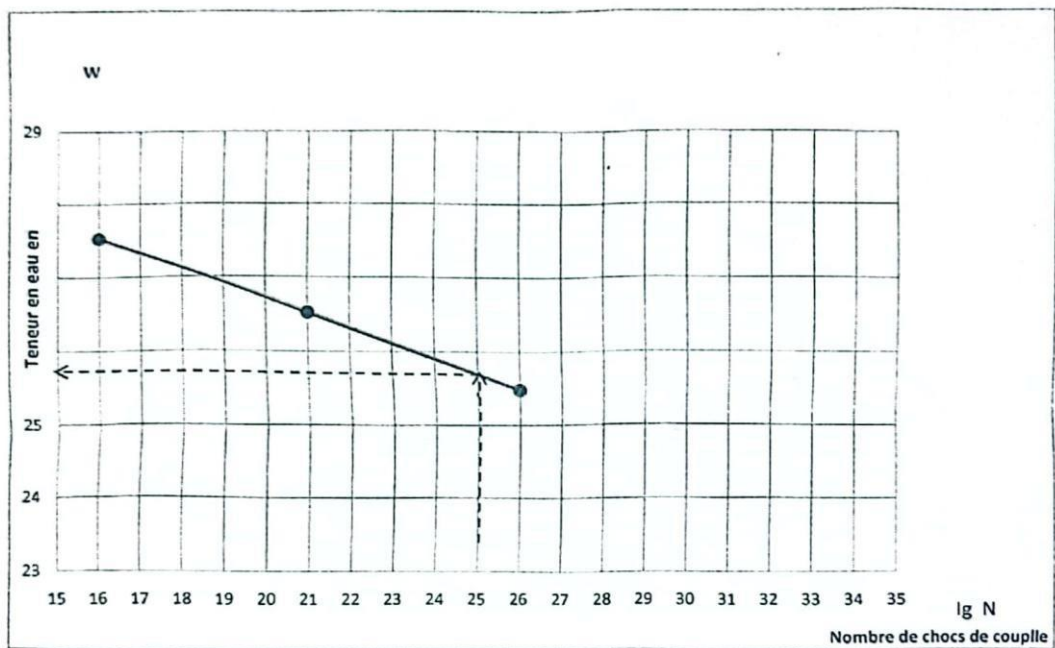
Mesures n°	1	2	3
Teneur en eau (%)	22.80	21.79	20.72
Nombre de coups N	16	21	26

Teneur en eau de plasticite (%)	W= 17.59	W= 17.54	W= 17.98	WP= 17.76
	W= 17.49		W= 17.54	
Limite de liquidite :WL= 20.95 (%)	Indice de plasticité Ip = 3.30			
Limite de plasticité:Wp= 17.65 (%)				

Annexes

P.O. - Unité de TIARET

Client : UNIVERSITER	PROCES VERBAL D'ESSAI DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG Conformément à la norme NFP 94-051
Projet : 3% DECHES PLSTIQUE PVC (1,60 - 2,00)	
Lieu :	Dossier : 0
Méthode de prélèvement : MELANGE	Sondage : 0
DATE : 24/02/2025	Profondeur: 0



Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande

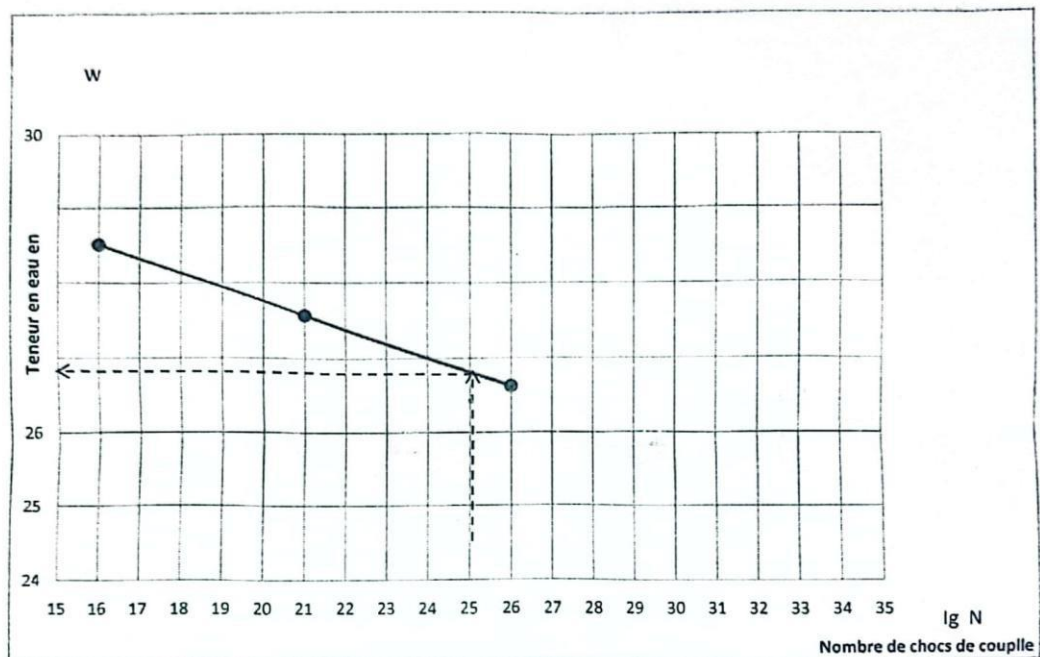
Mesures n°	1	2	3
Teneur en eau (%)	27,53	26,52	25,48
Nombre de coups N	16	21	26

Teneur en eau de plasticité (%)	W= 20,71 W= 20,28	W= 20,50	W= 20,29 W= 20,41	WP= 20,35
Limite de liquidité :WL= 25,69 (%)	Indice de plasticité			
Limite de plasticité:Wp= 20,42 (%)	Ip = 5,27			

Annexes

Unité de TIARET

Cliant : UNIVERSITER	PROCES VERBAL D'ESSAI DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG Conformément à la norme NFP 94-051
Projet : 3% DECHES PLSTIQUE PVC (2,00 - 2,50	
Lieu :	Dossier : 0
Méthode de prélèvement : MELANGE	Sondage : 0
DATE : 24/02/2025	Profondeur: 0



Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande

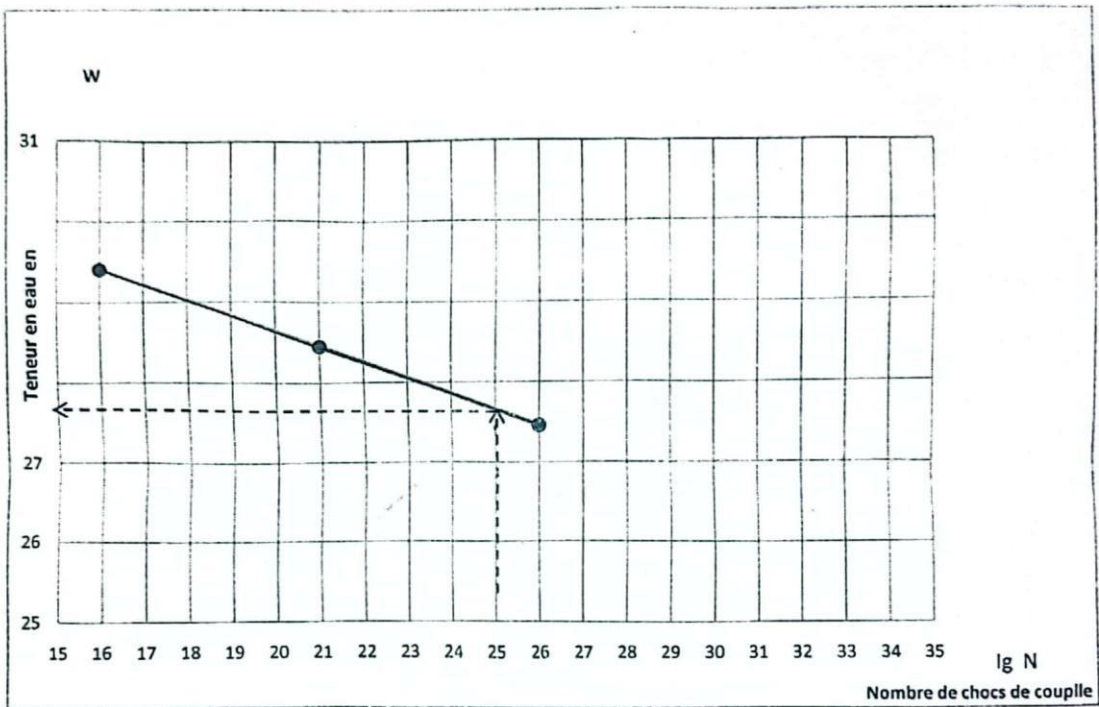
Mesures n°	1	2	3
Teneur en eau (%)	28,52	27,57	26,62
Nombre de coups N	16	21	26

Teneur en eau de plasticite (%)	W= 21,13	W= 21,26	W= 21,53	WP= 21,60
	W= 21,38		W= 21,68	
Limite de liquidite :WL= 26,82 (%)	Indice de plasticité Ip = 5,39			
Limite de plasticité:Wp= 21,43 (%)				

Annexes

P.O. - Unité de TIARET

Client : UNIVERSITER	PROCES VERBAL D'ESSAI DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG Conformément à la norme NFP 94-051
Projet : 3% DECHES PLSTIQUE PVC (2,50 - 3,15	
Lieu :	Dossier : 0
Méthode de prélèvement : MELANGE	Sondage : 0
DATE : 24/02/2025	Profondeur: 0



Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande

Mesures n°	1	2	3
Teneur en eau (%)	29,41	28,45	27,46
Nombre de coups N	16	21	26

Teneur en eau de plasticité (%)	W= 21,83 W= 21,74	W= 21,79	W= 22,37 W= 22,30	WP= 22,33
Limite de liquidité :WL= 27,68 (%)	Indice de plasticité Ip = 5,62			
Limite de plasticité:Wp= 22,06 (%)				

Annexes

Date	Heure	Temps de Lecture	T (°C)	Ct	0 Prid m/ 0					
					R Lecture densimètre	P% sur tamis 80 Um	D (µm)			
jeudi 27 février 2025	10:48	30 s	25	1.1	1,010	26	0,069			
		01 min	//	//	1,006	17	0,051			
		02 min	//	//	1,005	15	0,036			
		05 min	//	//	1,004	13	0,023			
		10 min	//	//	1,003	11	0,016			
		20 min	//	//	1,000	5	0,012			
		40 min	//	//	1,000	5	0,008			
		80 min	//	//	1,000	6	0,006			
		04 h	//	//	1,000	6	0,003			
		24 h	//	//	1,000	5	0,001			

Date

Le chef de service

20/03/2025

