

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département Génie des Procédés et de l'Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des Procédés et de  
l'Environnement

---

Évaluation de l'effet de l'utilisation des granulats et de  
la poudrette de pneus usagés sur la stabilité des sols

---

**ZAIR Inès Rawia**

Présenté et soutenu publiquement le (26/06/2024)

Composition du jury :

Président :	M. NAMANE Abdelkader	Prof, ENP, Alger
Promotrices :	Mme YAHIA Zohra	Doctorante, ENP,
	Mme IRINISLIMANE Ratiba	MCA, UMBB, Boumerdès
	Mme. BELHANECHÉ Naima	Prof, ENP, Alger
Examineur :	M. BALOUL Hakim	MCA, UMBB, Boumerdès
Invités :	M. GUELLATI Salah Eddine	Directeur des laboratoires, LCTP
	M. HEDJAL Tahar Rached	Chef de service, LCTP

ENP 2024



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département Génie des Procédés et de l'Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des Procédés et de  
l'Environnement

---

Évaluation de l'effet de l'utilisation des granulats et de  
la poudrette de pneus usagés sur la stabilité des sols

---

**ZAIR Inès Rawia**

Présenté et soutenu publiquement le (26/06/2024)

Composition du jury :

Président :	M. NAMANE Abdelkader	Prof, ENP, Alger
Promotrices :	Mme YAHIA Zohra	Doctorante, ENP,
	Mme IRINISLIMANE Ratiba	MCA, UMBB, Boumerdès
	Mme. BELHANECHÉ Naima	Prof, ENP, Alger
Examineur :	M. BALOUL Hakim	MCA, UMBB, Boumerdès
Invités :	M. GUELLATI Salah Eddine	Directeur des laboratoires, LCTP
	M. HEDJAL Tahar Rached	Chef de service, LCTP

ENP 2024

## الملخص

تستكشف هذه الدراسة حلاً مبتكراً ومستداماً لمواجهة التحديات البيئية المتعلقة بإدارة نفايات الإطارات، من خلال دمج هذه المواد المعاد تدويرها في تثبيت التربة. تقيم كيف يمكن لحبيبات ومساحيق الإطارات المعاد تدويرها تحسين استقرار وخصائص التربة الميكانيكية، مقارنةً بالأساليب التقليدية مثل معالجة الجير. تم تقييم فعالية هذا النهج باستخدام اختبارات الضغط بروكتور المعدلة واختبارات الأودوميتر. تشير النتائج إلى أن استخدام حبيبات ومساحيق الإطارات المعاد تدويرها يمكن أن يحسن استقرار وخصائص التربة الميكانيكية، مما يوفر بديلاً بيئياً وفعالاً للأساليب التقليدية.

**كلمات مفتاحية:** استقرار التربة، خصائص ميكانيكية للتربة، حبيبات الإطارات، مسحوق الإطارات، إعادة التدوير، اختبار الضغط بروكتور، اختبار أودوميتر.

## Abstract

This research explores an innovative and sustainable solution to address environmental challenges associated with tire waste management by integrating these recycled materials into soil stabilization. It assesses how recycled tire aggregates and crumb rubber can enhance the stability and mechanical properties of soils compared to traditional methods such as lime treatment. The effectiveness of this approach was evaluated through modified Proctor compaction tests and oedometer tests. The results demonstrate that the use of recycled tire aggregates and crumb rubber can improve soil stability and mechanical properties, thus providing an environmentally friendly and effective alternative to conventional methods.

**Keywords :** Soil stabilization - Soil mechanical properties - Tire granulates - Tire powder - Valorization - Proctor test - Oedometer test.

## Résumé

Cette recherche explore une solution novatrice et durable pour relever les défis environnementaux liés à la gestion des déchets de pneus, en intégrant ces matériaux recyclés dans la stabilisation des sols. Elle évalue comment les granulats et la poudrette de pneus recyclés peuvent améliorer la stabilité et les propriétés mécaniques des sols, comparativement aux méthodes traditionnelles comme le traitement à la chaux. L'efficacité de cette approche a été évaluée à travers des tests de compactage Proctor modifiés et des essais œdométriques. Les résultats montrent que l'utilisation des granulats et de la poudrette de pneus recyclés peut améliorer la stabilité et les propriétés mécaniques des sols, offrant ainsi une alternative écologique et performante aux méthodes conventionnelles.

**Mots clés :** Stabilisation des sols, Caractéristiques mécaniques des sols, Granulats de pneus, Poudrette de pneus, Valorisation, Essai Proctor, Essai Œdométrique.

## Dédicaces

“You can’t be good at everything, but that doesn’t mean you can’t do anything”

Wonwoo - Seventeen

Je dédie ce mémoire, fruit d’un travail rigoureux et d’une réflexion approfondie, aux personnes qui ont illuminé mon parcours et enrichi mon existence.

A ma maman et mon papa, à qui je ne pourrai jamais exprimer suffisamment ma gratitude pour tout ce qu’ils ont fait pour moi. Leur présence bienveillante, leur affection inconditionnelle et leurs encouragements constants ont été les moteurs de ma persévérance et de ma réussite.

À mes grands-parents, sources inépuisables de sagesse et gardiens des valeurs familiales qui m’ont aidée à devenir la personne que je suis aujourd’hui.

À mes meilleures amies, Amina et Maria, compagnes de route fidèles et amies inestimables. Leur amitié et leur soutien indéfectible ont été des sources de réconfort et d’inspiration tout au long de ma scolarité. Je suis reconnaissante pour leur présence constante et leur joie de vivre communicative.

À ma Minette, qui, même de l’autre côté de la Méditerranée, a su apporter sa présence réconfortante et son amour inconditionnel dans ma vie.

Et enfin, à tous ceux que j’aime, qu’ils soient proches ou loin, leur soutien et leur encouragement m’ont donné la force et le courage nécessaires pour accomplir ce travail.

À vous tous, je vous adresse mes plus sincères remerciements et dédie ce travail avec toute mon affection et ma reconnaissance.

*ZAIR Inès Rawia*

## Remerciements

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à mes directrices de mémoire, **Madame N. BELHANECHÉ**, **Madame Z. YAHIA** et **Madame R. IRINISLIMANE**, pour leur précieux encadrement et leurs conseils avisés tout au long de mon travail. Leur confiance en mes capacités a été une source d'inspiration constante qui m'a permis de me surpasser pour réaliser ce travail. Leur patience, leur disponibilité et leur rigueur ont également été essentielles à la réussite de ce mémoire.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à toute l'équipe du **Laboratoire Central des Travaux Publics (LCTP)** qui ont contribué à la réussite de mon stage au sein de leur laboratoire. Leur soutien inestimable, leur expertise et leurs encouragements ont grandement enrichi mon expérience professionnelle et mes travaux de recherche. Je remercie particulièrement **Messieurs TR. HEDJAL**, **S. GUELLATI**, **R. HAMIDI**, **R. BOUTICHE**, **A. HASSINI** et **O. MEHENNI** pour leur engagement, leurs conseils et leur disponibilité.

Je souhaite exprimer par ailleurs ma gratitude envers, **Monsieur A. NAMANE**, Professeur à l'École Nationale Polytechnique pour avoir accepté de présider de jury, et **Monsieur H. BALOUL**, Maître de conférence classe B à l'université de Boumerdes, pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Je n'oublierai pas de remercier également **Messieurs S.GUELLATI** et **TR. HEDJAL** d'avoir accepté d'être les invités de ce jury.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble des **professeurs du département de génie des procédés et de l'environnement de l'École Nationale Polytechnique**, pour leur enseignement de qualité et les connaissances qu'ils m'ont transmises durant mes années d'études. Leur passion et leur dévouement pour la recherche m'ont inspirée et motivée à poursuivre mes propres questionnements scientifiques.

À toutes ces personnes, et à toutes celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, je vous adresse mes plus sincères remerciements. Votre soutien et votre dévouement ont été essentiels à la réussite de ce projet.

*ZAIR Inès Rawia.*

# Table des matières

Liste des tableaux	8
Table des figures	9
Liste des abréviations	12
Introduction générale	14
<b>1 Synthèse bibliographique</b>	<b>16</b>
1.1 Généralités sur les pneus . . . . .	16
1.1.1 Historique . . . . .	16
1.1.2 Fonctions des pneus . . . . .	17
1.1.3 Composition des pneus . . . . .	17
1.2 Déchets pneumatiques . . . . .	21
1.2.1 Réglementation . . . . .	21
1.2.2 Types de pneus usagés . . . . .	21
1.2.3 Valorisation des pneus usagés . . . . .	21
1.2.3.1 La valorisation énergétique . . . . .	22
1.2.3.2 La valorisation matière . . . . .	22
1.2.4 Impacts des pneus sur l'environnement . . . . .	24
1.3 Stabilité des sols . . . . .	25
1.3.1 Définition de la stabilité des sols . . . . .	25
1.3.2 Facteurs influençant la stabilité des sols . . . . .	25
1.3.2.1 La texture du sol . . . . .	25
1.3.2.2 La matière organique du sol . . . . .	25
1.3.2.3 Les forces mécaniques . . . . .	26

1.3.2.4	L'activité humaine . . . . .	26
1.3.3	Mécanismes de stabilisation des sols . . . . .	26
1.3.3.1	Définition de la stabilisation . . . . .	26
1.3.3.2	But de la stabilisation . . . . .	26
1.3.3.3	Techniques de stabilisation . . . . .	27
1.4	Essais géotechniques . . . . .	28
1.4.1	Définition des essais géotechniques . . . . .	28
1.4.2	Essai Proctor . . . . .	28
1.4.2.1	Définition de l'essai Proctor . . . . .	28
1.4.2.2	Principe de l'essai . . . . .	29
1.4.2.3	Interprétation théorique de l'essai Proctor . . . . .	31
1.4.3	Essai œdométrique . . . . .	32
1.4.3.1	Définition de l'essai . . . . .	32
1.4.3.2	Principe de l'essai . . . . .	32
1.4.3.3	Interprétation théorique du test œdométrique . . . . .	32
1.4.3.4	Les paramètres œdométrique . . . . .	33
1.4.3.5	Description de l'appareillage . . . . .	33
1.5	La matière organique du sol . . . . .	35
1.5.1	Définition de la matière organique du sol . . . . .	35
1.5.2	Rôles et fonctions de la MOS . . . . .	35
<b>2</b>	<b>Méthodologie expérimentale</b>	<b>36</b>
2.1	Matériaux utilisés . . . . .	36
2.1.1	Le sol . . . . .	36
2.1.2	Les granulats et la poudrette de pneus . . . . .	37
2.1.3	La chaux . . . . .	38
2.2	Protocole expérimental . . . . .	38
2.2.1	Identification du sol . . . . .	38
2.2.1.1	Analyse granulométrique . . . . .	38
2.2.1.2	Limites d'Atterberg . . . . .	40
2.2.1.3	Détermination des indices CBR après immersion . . . . .	41



2.2.1.4	Équivalent de sable . . . . .	43
2.2.1.5	Essai au bleu de méthylène . . . . .	45
2.2.1.6	Détermination de la teneur pondérale en matière organique . . . . .	46
2.2.1.7	Analyse chimique sommaire . . . . .	47
2.3	Traitement du sol . . . . .	50
2.3.1	Essai Proctor modifié . . . . .	50
2.3.1.1	But de l'essai . . . . .	50
2.3.1.2	Matériel utilisé . . . . .	50
2.3.1.3	Test sur le sol brut . . . . .	52
2.3.1.4	Test sur le sol traité . . . . .	54
2.3.1.5	Expression des résultats . . . . .	55
2.3.2	Essai œdométrique . . . . .	55
2.3.2.1	But de l'essai . . . . .	56
2.3.2.2	Matériel utilisé . . . . .	56
2.3.2.3	Préparation des échantillons . . . . .	58
2.3.2.4	Exécution de l'essai . . . . .	60
2.3.3	Détermination de la teneur en matière organique . . . . .	62
2.3.3.1	Expression des résultats . . . . .	62
<b>3</b>	<b>Résultats et discussions</b>	<b>63</b>
3.1	Résultats des essais d'identification du sol . . . . .	63
3.2	Influence de l'ajout de la chaux . . . . .	64
3.2.1	Influence de l'ajout sur les paramètres de Proctor . . . . .	64
3.2.2	Influence de l'ajout sur les paramètres œdométrique . . . . .	65
3.2.2.1	Influence sur la courbe œdométrique . . . . .	65
3.2.2.2	Influence sur les indices de compression et de gonflement . . . . .	66
3.2.2.3	Influence sur la compressibilité . . . . .	67
3.3	Influence de l'ajout des granulats de pneus usagés . . . . .	68
3.3.1	Influence de l'ajout sur les paramètres de Proctor . . . . .	68
3.3.2	Influence sur les paramètres œdométrique . . . . .	69
3.3.2.1	Influence sur la courbe œdométrique . . . . .	69

3.3.2.2	Influence sur l'indice de compression et de gonflement . . . . .	70
3.3.2.3	Influence sur la compressibilité . . . . .	71
3.4	Influence de l'ajout de la poudrette de pneus usagés . . . . .	72
3.4.1	Sur les paramètres de compactage . . . . .	72
3.4.2	Influence sur les paramètres œdométriques . . . . .	73
3.4.2.1	Influence sur la courbe œdométrique . . . . .	73
3.4.2.2	Influence sur les indices de compression et de gonflement . . . . .	73
3.4.2.3	Influence sur la compressibilité . . . . .	74
3.5	Influence du traitement sur la teneur en matière organique . . . . .	75
3.6	Étude comparative des trois traitements . . . . .	77
3.6.1	Comparaison des résultats du test Proctor . . . . .	77
3.6.2	Comparaison des résultats œdométriques . . . . .	79
<b>Conclusion générale</b>		<b>81</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>83</b>

# Liste des tableaux

1.1	Composition de deux types de pneus véhicule touristique (véhicule léger) et poids lourds. . . . .	18
2.1	Répartition granulométrique des granulats . . . . .	37
2.2	Série de tamis classés par ordre décroissant . . . . .	39
2.3	Poids à ajouter correspondant aux différents pourcentages à incorporer . . . . .	55
3.1	Résultats des essais d'identification du sol . . . . .	63
3.2	Résultats des essais d'identification du sol pour l'analyse chimique sommaire . .	63

# Table des figures

1.1	Coupe pneumatique. . . . .	17
1.2	Technique d'extraction du latex à partir de l' <i>Hevéa brasiliensis</i> . . . . .	18
1.3	Structure chimique du caoutchouc synthétique. . . . .	19
1.4	Noir de carbone sous microscope à transmission électronique. . . . .	20
1.5	Les différents produits issus de la valorisation matière des pneus usagés. . . . .	22
1.6	Chantier Pneusol à Bou-smail. . . . .	23
1.7	Processus d'ensilage des pneus. . . . .	23
1.8	Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié. . . . .	30
1.9	Dispositif expérimental du moule CBR. . . . .	31
1.10	Exemple représentatif de la courbe Proctor. . . . .	31
1.11	Exemple représentatif de la courbe de compression de l'essai œdométrique. . . . .	32
1.12	Schéma du dispositif expérimental de l'essai œdométrique. . . . .	34
1.13	Système de chargement mécanique – cadre de chargement. . . . .	34
2.1	Localisation du lieu de prélèvement de l'échantillon . . . . .	36
2.3	Schéma du montage de l'éprouvette de l'essai CBR après immersion . . . . .	42
2.4	Schéma du dispositif de l'équivalent de sable et du mesurage de $h_1$ et $h_2$ . . . . .	44
2.5	Moule CBR . . . . .	50
2.6	Balance . . . . .	51
2.7	Dame Proctor automatique . . . . .	51
2.8	Étuve . . . . .	52
2.9	Échantillon de sol après séchage à l'étuve avant tamisage . . . . .	52
2.10	Moule arasé . . . . .	53
2.11	Échantillons de sol étuvés pour déterminer la teneur en eau . . . . .	54
2.12	Procédure de l'essai Proctor . . . . .	54

2.13	Trousse coupante . . . . .	56
2.14	Plaques poreuses supérieures et inférieures . . . . .	56
2.15	Cellule œdométrique . . . . .	57
2.16	œdomètre ou cadre de chargement . . . . .	57
2.17	Poids des contraintes de chargement . . . . .	58
2.18	Balance . . . . .	58
2.19	Trousse coupante remplie et arasée . . . . .	59
2.20	Cellule œdométrique avec la trousse coupante . . . . .	60
2.21	Cellule œdométrique placée sur le cadre de chargement et mise en contact avec le comparateur. . . . .	60
3.1	Courbes Proctor - Variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau lors de l'ajout de la chaux. . . . .	64
3.2	Courbes œdométrique - variation des indices de vide en fonction des contraintes à différents pourcentages de chaux. . . . .	65
3.3	Variation des indices de compression et de gonflement en fonction du pourcentage de la chaux ajoutée. . . . .	66
3.4	Variation de la compressibilité en fonction des contraintes effectives à différents pourcentages de chaux . . . . .	67
3.5	Courbes Proctor - Variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau lors de l'ajout des granulats de pneu. . . . .	68
3.6	Courbes œdométriques - variation des indices de vide en fonction des contraintes à différents pourcentages de granulats de pneus. . . . .	69
3.7	Variation des indices de compression et de gonflement en fonction du pourcentage des granulats ajoutés. . . . .	70
3.8	Variation de la compressibilité en fonction des contraintes effectives lors de l'ajout des granulats de pneus . . . . .	71
3.9	Courbes Proctor - Variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau lors de l'ajout de la poudrette de pneu. . . . .	72
3.10	Courbes œdométrique - variation des indices de vide en fonction des contraintes effectives lors de l'ajout de la poudrette de pneus. . . . .	73
3.11	Variation des indices de compression et de gonflement en fonction du pourcentage de poudrette ajoutée. . . . .	74
3.12	Variation de la compressibilité en fonction des contraintes effectives lors de l'ajout de la poudrette de pneus . . . . .	75
3.13	Variation de la teneur en matière organique du sol en fonction du pourcentage d'ajout. . . . .	76

3.14	Variation de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage d'ajout . . .	77
3.15	Variation de la densité sèche maximale en fonction du pourcentage d'ajout . . .	78
3.16	Variation des indices de compression en fonction des pourcentages ajoutés . . .	79
3.17	Variation des indices de gonflement en fonction des pourcentages ajoutés . . .	80

# Liste des abréviations et des symboles

## *Abréviations*

- **AND** : Agence Nationale des Déchets
- **CBR** : Californian Bearing Ratio
- **CET** : Centre d'Enfouissement Techniques
- **GTR** : Guide des Terrassements Routiers
- **IPI** : Indice de Portance Immédiat
- **LCTP** : Laboratoire Central des Travaux Publics
- **MET** : Microscope Électronique à Transmission
- **MOS** : Matières Organiques du Sol
- **NF** : Norme Française
- **PUR** : Pneus Usagés Réutilisables
- **PUNR** : Pneus Usagés Non Réutilisables
- **SBR** : Styrene Butadiène Rubber

## *Symboles*

- **AgNO<sub>3</sub>** : Nitrate d'argent
- **BaCl<sub>2</sub>** : Chlorure de baryum
- **B** : Masse bleu de méthylène
- **CaCO<sub>3</sub>** : Carbonate de calcium
- **C<sub>c</sub>** : Indice de compression
- **C<sub>s</sub>** : Indice de gonflement
- $\gamma_{d_{max}}$  : Densité sèche maximale du sol
- **ES** : Équivalent de sable
- **f<sub>n</sub>** : Pourcentage massique du refus cumulés ou la fraction passante à travers le tamis
- **G** : Gonflement linéaire relatif
- **HCl** : Acide chlorhydrique
- **I<sub>CBR</sub>** : Indice CBR
- **I<sub>P</sub>** : Indice de plasticité
- **R<sub>n</sub>** : Masse du refus mesuré
- $\sigma$  : Contrainte
- $\gamma_h$  : Densité humide
- **VBS** : Valeur du bleu de méthylène
- **w<sub>L</sub>** : Limite de liquidité
- **w<sub>P</sub>** : Limite de plasticité
- **W<sub>optm</sub>** : Teneur en eau optimale

# Introduction générale

L'apparition de l'automobile a marqué un tournant décisif dans l'histoire des usages de la route et de l'industrie pneumatique. Chaque année, des centaines de millions de pneus sont produits et stockés à travers le monde, symbolisant à la fois le progrès technologique et les défis environnementaux [1]. Cependant, le stockage et l'élimination des pneus en fin de vie est devenu un enjeu majeur pour l'environnement dans le monde entier.

Les défis associés à la gestion des pneumatiques usagés sont considérables, comme en témoignent les données actuelles. Par exemple, en 2021, la France a collecté plus de 420 000 tonnes de pneus usés [2]. En Thaïlande, la demande annuelle de pneus est estimée à environ 100 000 tonnes, ce qui engendre un flux continu de déchets pneumatiques [3]. De même, les importations de pneumatiques en caoutchouc en Algérie ont maintenu une moyenne annuelle d'environ 60 000 tonnes entre 2020 et 2023, selon les statistiques de l'Agence Nationale de Promotion du Commerce Extérieur [4].

Parallèlement, l'augmentation du trafic et des charges sur les routes exige une stabilité accrue des sols. Les sols, composante essentielle de l'infrastructure routière, doivent faire face à une demande croissante en termes de résistance, de durabilité et de capacité à supporter des charges toujours plus lourdes, souvent générées par le poids des véhicules et la fréquence des déplacements.

Actuellement, le défi de maintenir la stabilité des routes peut être résolu par des techniques conventionnelles bien établies. Ces approches traditionnelles comprenant des techniques mécaniques telle que le compactage, des techniques thermiques et des techniques chimiques ont démontré leur efficacité au fil des décennies.

Bien que les techniques conventionnelles restent fiables, l'intégration de solutions innovantes pourrait offrir des avantages supplémentaires en termes de durabilité, tout en répondant aux impératifs de gestion des déchets et de réduction de l'empreinte environnementale.

Face à ces défis croisés, la recherche de solutions novatrices conciliant les exigences environnementales et les enjeux de l'infrastructure dans le cadre d'une économie circulaire est devenue impérative. La valorisation des pneus usagés comme agent stabilisant des sols se présente comme une approche prometteuse, conciliant les exigences environnementales et les enjeux de l'infrastructure routière.

C'est dans ce cadre, que l'utilisation des granulats et de la poudrette de pneus comme agent stabilisant des sols émerge comme une réponse potentiellement bénéfique, tant pour l'environnement que pour l'ingénierie géotechnique.

Le présent travail vise à évaluer l'utilisation des granulats et de la poudrette de pneus usagés comme agents stabilisants des sols. L'objectif est d'analyser l'impact de ces matériaux recyclés sur les propriétés mécaniques des sols, en se concentrant sur les paramètres du Proctor et les paramètres œdométriques. Les résultats obtenus seront comparés à ceux d'une technique de



stabilisation usuelle afin d'apprécier l'efficacité de la méthode proposée.

Ce mémoire est structuré en 3 chapitres :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique dans laquelle une revue exhaustive de la littérature sur les pneumatiques, la stabilisation des sols et les essais géotechniques est présentée. Il aborde en premier des généralités sur les pneumatiques, leur gestion en tant que déchets, puis aborde les différentes techniques de stabilisation des sols. Enfin, il présente les essais géotechniques pertinents et explore le rôle de la matière organique dans les sols.

Le deuxième chapitre détaille la méthodologie utilisée dans l'étude, incluant les matériaux utilisés, le protocole expérimental et le traitement du sol, ainsi que les essais de Proctor et œdométrique pour le sol brut et traité, ainsi que la détermination de la matière organique.

Le troisième chapitre regroupe les résultats et discussions où une analyse approfondie des résultats obtenus est fournie, mettant en évidence l'impact de l'ajout de différents matériaux sur les propriétés des sols. Des discussions sur ces résultats ainsi qu'une étude comparative des traitements sont également incluses.

Enfin, les principales conclusions de l'étude sont présentées, suivies de quelques perspectives pour de futures recherches.

# Chapitre 1

## Synthèse bibliographique

### 1.1 Généralités sur les pneus

#### 1.1.1 Historique

Au cours de l'histoire, l'industrie des pneumatiques a connu une série d'innovations majeures [1] [5] :

- Après la découverte de la vulcanisation par l'américain Goodyear en 1844, plusieurs tentatives ont été faites pour introduire des pneus.
- En 1888, le vétérinaire écossais John Boyd Dunlop a breveté avec succès un tube souple gonflé pour remplacer les pneus pleins, fondant ainsi la société Dunlop.
- En 1891, le pneu à tringle inventé par C.K. Welch a apporté une percée dans l'industrie, suivi de près par les frères Michelin qui ont breveté des pneus pouvant être montés ou démontés manuellement pour automobiles et vélos la même année.
- Au début du 20e siècle, Firestone et Goodyear ont développé des pneus à tringles à flancs droits en 1904, rapidement adoptés par la plupart des fabricants de pneus aux États-Unis.
- En 1929, l'ingénieur néo-zélandais Edward Brice Killen a déposé le brevet du premier pneu sans chambre à air, révolutionnant ainsi le domaine des pneumatiques.
- En 1972, Continental a lancé le premier pneu hiver sans clous, offrant une meilleure adhérence sur les routes enneigées.
- Une avancée majeure est survenue en 1992 avec l'invention du premier pneu roulage à plat par Goodyear. Ce pneu innovant permet au véhicule de continuer à rouler, à une vitesse modérée et sur une courte distance, même après une crevaison.
- En 1999, Dunlop a lancé la technologie Warnair, permettant la détection rapide des pertes de pression dans un pneu et informant le conducteur par un signal sonore ou visuel.
- En 2002, Bridgestone et Continental ont annoncé une collaboration pour le développement d'un pneu Runflat lors du Salon de l'auto de Genève, destiné à concurrencer le pneu roulage à plat inventé par Goodyear.

### 1.1.2 Fonctions des pneus

Les pneus jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des véhicules en assurant trois fonctions principales [6] :

- **Porter la charge** : les pneus supportent la charge du véhicule, résultante de sa masse ainsi que celle des surcharges liées aux mouvements dynamiques du véhicule et celles liées aux forces aérodynamiques à haute vitesse. Ils absorbent également les irrégularités de la route.
- **Guider le véhicule** : les pneus contribuent au guidage du véhicule sur les trajectoires décidées par les conducteurs.
- **Transmettre les forces** : Les pneus sont responsables de la transmission au sol les efforts de freinage ou d'accélération décidés par le conducteur. Leur adhérence au sol influence directement la performance du système de freinage et la capacité d'accélération du véhicule.

### 1.1.3 Composition des pneus

Un pneu est généralement composé d'environ 200 matières premières, la composition d'un pneu varie selon le type de pneu et sa destination.

Peu importe leur utilisation, tous les pneus contiennent quatre groupes fondamentaux de matériaux : les élastomères (caoutchoucs naturels et synthétiques), les charges renforçantes (le noir de carbone et la silice), les matériaux de renforcements (métaux/textiles) et les facilitateurs utilisés durant les divers stades de la production des pneus (cires, antioxydants...) [7][8].

La figure 1.1 illustre une coupe pneumatique [9], tandis que le tableau 1.1 présente la composition de deux types de pneus : véhicule touristique (véhicule léger) et poids lourds [7].

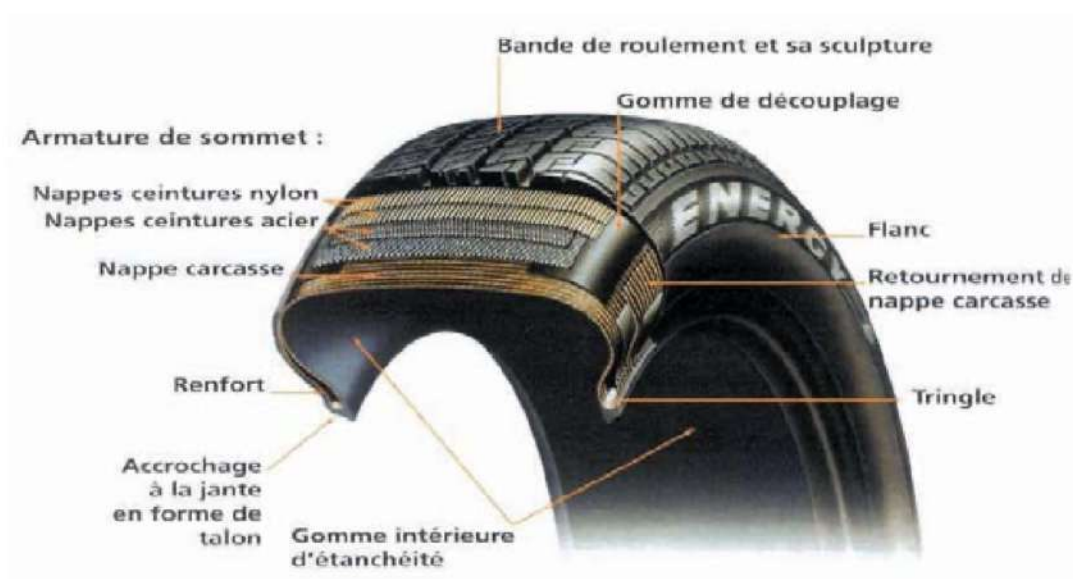


FIGURE 1.1 – Coupe pneumatique.

TABLE 1.1 – Composition de deux types de pneus véhicule touristique (véhicule léger) et poids lourds.

Matériaux	Véhicules légers (%)	Poids lourds (%)
Caoutchoucs	45	42
Noir de carbone et silice	23	24
Métaux	16	25
Textiles	6	-
Oxydes de zinc	1	2
Soufre	1	1
Additifs	8	5

### 1.1.1.1 Le caoutchouc naturel :

Le caoutchouc naturel est un matériau biosourcé produit par des centaines d'espèces d'arbres et de plantes dans de nombreuses parties du monde. Actuellement, 99% du caoutchouc naturel sont produits à partir du latex extrait à partir de l'arbre à caoutchouc l'*Hévéa brasiliensis* [5]. La figure 1.2 illustre la technique d'extraction du latex à partir de l'*Hévéa brasiliensis* [10].

FIGURE 1.2 – Technique d'extraction du latex à partir de l'*Hevéa brasiliensis*.

Le caoutchouc occupe une place importante dans l'industrie des élastomères qui couvre un grand nombre de secteurs industriels, notamment le secteur automobile avec 80 % de toutes les utilisations des élastomères. Dans ce secteur, le caoutchouc est largement employé sous différentes formes telles que pneumatiques, joints, liaisons élastiques, tubes, tuyaux, membranes, et dispositifs antivibratoires [11].

L'utilisation du caoutchouc naturel dans les formulations de mélanges pneumatiques offre des avantages significatifs, contribuant à réduire l'échauffement interne des pneumatiques pendant leur utilisation tout en assurant une résistance mécanique élevée [6].

### 1.1.1.2 Le caoutchouc synthétique :

Le caoutchouc synthétique est un élastomère préparé à partir d'hydrocarbures insaturés par polymérisation et dont le comportement est viscoélastique (caoutchoutique) à la température d'utilisation [11].

La figure 1.3 illustre la structure chimique du caoutchouc synthétique [12].

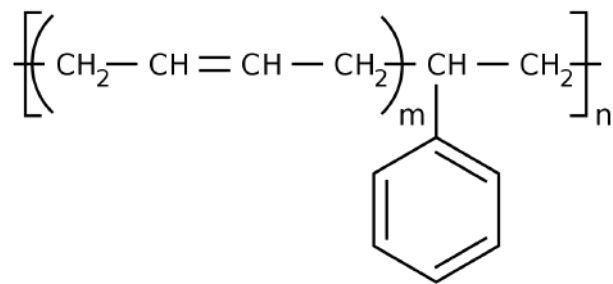


FIGURE 1.3 – Structure chimique du caoutchouc synthétique.

Le caoutchouc synthétique confère au pneu la capacité de se déformer sous contrainte et de retrouver sa forme initiale après un certain laps de temps une fois que la contrainte cesse (phénomène d'hystérésis). Cette caractéristique revêt un intérêt crucial dans la fabrication de pneus adhérents [6].

En plus de cela, le caoutchouc synthétique apporte d'autres propriétés spécifiques, notamment dans le domaine de la longévité des pneus et de la résistance au roulement. Il est particulièrement utilisé dans les bandes de roulement des pneus de voitures et de motos en raison de ses excellentes propriétés d'adhérence, contribuant ainsi à la performance globale des pneumatiques [6].

#### 1.1.1.3 Le noir de carbone :

Le noir de carbone est un matériau élaboré, constitué principalement de carbone élémentaire, et produit par la combustion partielle ou la décomposition thermique d'hydrocarbures selon un procédé bien contrôlé et défini. Cette méthode permet d'assurer une production de matériaux avec des propriétés spécifiques [13].

Appartenant à la classe des carbones aromatiques turbostratiques, le noir de carbone est caractérisé par des températures de formation comprises entre 700 et 2500 °C [14].

Le noir de carbone se présente sous la forme d'une fine poudre noire, inodore, constituée d'agrégats de particules sphéroïdales dites primaires. Ces particules sont liées par des liaisons covalentes et s'organisent en "grappes" formant ainsi des entités tridimensionnelles complexes appelées agrégats. Sous l'influence de forces attractives de type Van der Waals, ces agrégats s'assemblent pour constituer des amas, formant des agglomérats [13]. La figure 1.4 illustre une image au microscope électronique à transmission (MET) du noir de carbone [15].

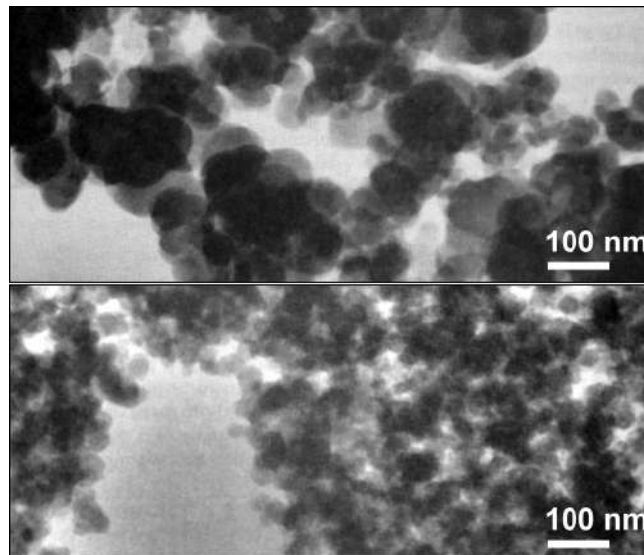


FIGURE 1.4 – Noir de carbone sous microscope à transmission électronique.

Le noir de carbone est largement utilisé dans l'industrie pneumatique, et une fois intégré dans le mélange de gomme, il augmente considérablement la résistance à l'usure des pneus. Il constitue généralement entre 25 et 30 % de la composition de la gomme et est responsable de la couleur noire distinctive des pneus. En plus de son rôle dans l'esthétique des pneus, cette couleur noire offre une protection contre le rayonnement des ultraviolets, contribuant ainsi à prévenir la fissuration et le craquelage de la gomme [6].

#### 1.1.1.4 La silice :

La silice est un composé largement répandu dans la nature, représentant plus de 70 % de la masse de la croûte terrestre. Elle peut être d'origine naturelle, dérivée de roches formées par la sédimentation de carapaces d'organismes variés, ou minérale (comme les sables, le silex). Elle peut également être produite synthétiquement, principalement par deux grandes méthodes : les silices précipitées et les sols de silice par voie humide, ainsi que les silices thermiques ou de pyrogénéation par voie sèche [16].

Les silices utilisées dans l'industrie pneumatique sont les silices précipitées, reconnues depuis longtemps pour leurs propriétés, en particulier pour l'amélioration de la résistance à la déchirure des mélanges de gommes. Les mélanges d'élastomères et de silice permettent la fabrication de pneus présentant une faible résistance au roulement, une excellente adhérence sur sol froid, tout en maintenant des performances exceptionnelles en termes de durabilité [6].

#### 1.1.1.5 Les matériaux de renforcement :

Les renforts du pneu, véritable squelette de sa structure, garantissent sa géométrie et sa rigidité tout en assurant la souplesse nécessaire lors du contact avec la route. Ces renforts peuvent prendre la forme de matériaux métalliques, établissant une liaison physico-chimique solide entre la gomme et l'acier, ou de matériaux textiles, permettant de maintenir une performance optimale à des vitesses élevées. Les matériaux couramment utilisés pour ces renforts textiles incluent le polyester, le nylon, la rayonne et l'aramide, offrant des caractéristiques telles que la résistance, l'endurance et le confort [5].

## 1.2 Déchets pneumatiques

Parallèlement à l'augmentation du nombre de véhicules en circulation, la consommation de pneumatiques suit une courbe ascendante. Si des avancées ont été réalisées pour accroître leur durabilité, grâce notamment à des gommes plus résistantes à l'usure et à des designs innovants, le volume de pneus hors d'usage demeure considérable.

### 1.2.1 Réglementation

Selon la réglementation algérienne, notamment le décret exécutif n° 06-104 du 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux (Journal officiel du 5 mars 2006), les pneus hors d'usage sont classés comme déchets spéciaux « classe S » sous le code « 16.1.1 » sans aucun critère de dangerosité [17].

### 1.2.2 Types de pneus usagés

Les pneus usagés se répartissent en deux ensembles [5] :

- **Les pneus usagés réutilisables (PUR)** : qui peuvent être sous-classés en deux catégories :
  - Le pneu réutilisable, généralement destiné au marché de l'occasion : il s'agit d'un pneu usagé dont la majorité des sculptures n'est pas inférieure à 1,6 mm de profondeur. Après une inspection de la solidité de la structure de l'enveloppe, ces pneus peuvent être utilisés en toute sécurité.
  - Le pneu rechapable : pneu usagé qui, une fois la structure de l'enveloppe inspectée pour s'assurer de sa solidité, peut être soumis à la vulcanisation d'une nouvelle bande de roulement. Cette technique permet d'offrir au pneumatique une seconde, voire une troisième vie, en prolongeant son utilisation.
- **Les pneus usagés non réutilisables (PUNR)** : ces pneus ne sont pas adaptés au rechapage mais ont des composants qui peuvent être réutilisés soit en valorisation matière, soit en valorisation énergétique.

### 1.2.3 Valorisation des pneus usagés

La structure complexe et résistante des caoutchoucs vulcanisés des pneus, due à leur structure réticulée et aux additifs présents, rend leur dégradation lente et ardue. Face à cette problématique, deux voies de valorisation principales s'offrent pour les déchets de pneus et de caoutchouc industriels : la valorisation énergétique et la valorisation matière. Ces approches prometteuses représentent des solutions durables et pertinentes pour la gestion de ces déchets.

### 1.2.3.1 La valorisation énergétique

Le pneumatique, de par son origine polymérique, a un excellent pouvoir calorifique :

$$3 \text{ tonnes de pneus} = 2 \text{ tonnes de fuel [1]}$$

Sa composition homogène en fait par ailleurs un combustible de substitution stable. Cette technique de valorisation concerne essentiellement les cimenteries qui utilisent des pneus usagés en substitution partielle des combustibles traditionnels. Généralement, ces pneus sont utilisés broyés, mais parfois ils sont également utilisés entiers [5].

En effet, les pneus usagés sont classés comme des « déchets », et non des « combustibles » [1]. Leur incinération ne produit pas seulement de la pollution atmosphérique, mais génère également des résidus tels que des mâchefers et des cendres, souvent riches en métaux lourds. Ces résidus nécessitent une gestion spécifique et coûteuse, incluant des procédés d'inertage et un stockage dans des sites protégés et contrôlés.[5].

En Algérie, la valorisation énergétique des pneus usagés est une question complexe en raison d'une réglementation qui reste encore à adapter. Actuellement, les cimenteries algériennes préfèrent utiliser le gaz naturel, jugé plus économique que les pneus usés déchetés comme substitut de combustible [1]. Cependant, selon le ministère de l'environnement et des énergies renouvelables, l'entreprise Lafarge utilise le procédé de co-incinération dans ses cimenteries, employant les pneus usés comme substitut au fioul (information recueillie au près du ministère de l'environnement et des énergies renouvelables le 27/05/2024).

### 1.2.3.2 La valorisation matière

La valorisation matière est un processus de traitement et de transformation des pneus usagés, visant à leur donner une seconde vie sous une forme différente et souvent plus utile [8]. La figure 1.5 résume les différentes formes de la valorisation matières des pneus usagés [18].

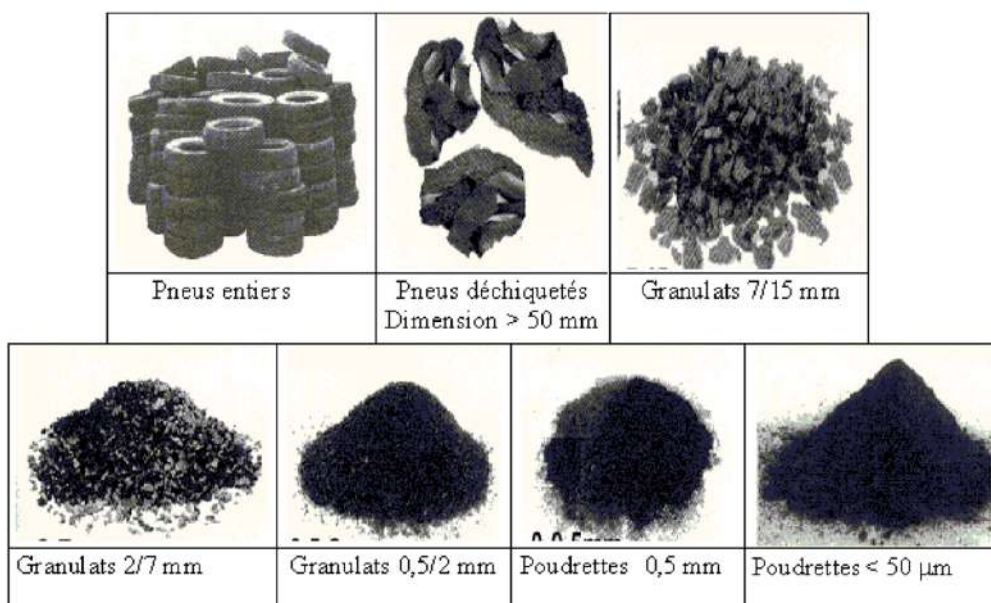


FIGURE 1.5 – Les différents produits issus de la valorisation matière des pneus usagés.



En Algérie, il existe 11 unités dédiées à la valorisation matière des pneus usagés [19]. Ces installations se concentrent sur le recyclage des pneus pour en extraire des matériaux réutilisables, tels que le caoutchouc recyclé et les parties métalliques constituant les pneus.

## 1. Pneus entiers

Les pneus entiers sont le plus souvent utilisés pour les domaines d'applications suivantes :

- Dans le domaine du génie civil notamment pour la construction de remblais de route et d'ouvrages de soutènement. L'une des techniques les plus employées est le procédé du PNEUSOL. Comme illustré dans la figure 1.6 [1] , ce procédé consiste à superposer des couches de pneus de poids lourds reliés entre eux et remplis de matériaux de remblai. Cette technique permet la réalisation d'ouvrages de soutènement, de remblais légers, d'ouvrages absorbant l'énergie comme protection contre les chutes de blocs et de répartiteurs de contraintes au-dessus de conduites enterrées [5].



FIGURE 1.6 – Chantier Pneusol à Bou-smail.

- Dans le domaine de l'agriculture, notamment en France, les pneus sont souvent réutilisés pour le maintien des bâches d'ensilage [7]. La figure 1.7 illustre le processus d'ensilage des pneus [20]. L'ensilage est un procédé de conservation des fourrages humides en l'absence d'oxygène et en milieu acide, principalement utilisé pour le stockage du maïs, de l'herbe ou d'autres plantes fourragères destinées à l'alimentation animale. Les bâches d'ensilage sont utilisées pour recouvrir les tas de fourrage dans un conditionnement sans air.



FIGURE 1.7 – Processus d'ensilage des pneus.

## 2. Pneus déchiquetés

Les pneus déchiquetés peuvent être utilisés comme matériaux de remblai léger dans la construction de routes ou comme sous-couches drainantes dans les Centres d'Enfouissement Technique (CET), en raison de leurs propriétés drainantes, de leur compressibilité et de leur faible masse volumique [21].

En tant que matériaux de remblai légers, les pneus déchiquetés réduisent le poids total de la structure routière, ce qui peut être avantageux sur des sols compressibles ou instables. De plus, leur capacité drainante contribue à une meilleure gestion des eaux pluviales aidant à prévenir les problèmes d'inondation et de saturation du sol dans les CET [21].

## 3. Poudrettes

Issues du broyage des pneus usagés pour obtenir des particules de caoutchouc dont la dimension est inférieure à 1mm [5][22], les poudrettes constituent une matière intéressante. Leur coût de revient est relativement faible et elles présentent plusieurs propriétés intéressantes telles qu'une bonne résistance à la compression [21].

Ces poudrettes peuvent être obtenues par différentes méthodes, notamment par broyage mécanique ou cryogénique, qui implique la fragilisation du caoutchouc à froid [7].

Les poudrettes de pneus sont incorporées dans de nouveaux produits en caoutchouc ou dans d'autres polymères où elles jouent un rôle de renfort. Elles sont également utilisées dans la fabrication des revêtements de sols industriels et sportifs, des dalles de revêtement, des sols amortissants et des aires de jeux. De plus, elles sont intégrées dans la réalisation de matériaux d'isolation phonique. Ces poudrettes sont également utilisées dans diverses applications telles que les aires de jeu pour enfants, les pistes de course et dans le béton pour améliorer ses caractéristiques mécaniques [7][23].

## 4. Granulats

Les granulés de caoutchouc, de taille supérieure à celle des poudrettes, offrent une polyvalence d'utilisation. Ils peuvent être agglomérés à l'aide de résines, colorés ou non, et permettent de réaliser facilement des feuilles et des plaques par moulage. Ces granulés sont adaptés à une variété d'applications telles que les aires de jeux nécessitant une surface amortissante, les pavés anti-dérapants et les revêtements de terrains de sport pour réduire les nuisances sonores [5].

### 1.2.4 Impacts des pneus sur l'environnement

L'accumulation croissante de pneus usagés constitue une problématique environnementale majeure à l'échelle mondiale, dont l'Algérie n'est pas exemptée. En 2018, l'Agence Nationale des Déchets (AND) recensait déjà près de 290 millions de tonnes de pneus usagés sur le territoire national [24] avec un taux de recyclage actuel de seulement 7 à 10% pour les déchets spéciaux, dont font partie les pneus usagés (information recueillie auprès du ministère de l'environnement et des énergies renouvelables le 27/05/2024). Des chiffres alarmants qui témoignent de l'ampleur du défi à relever et de l'insuffisance des efforts déployés.

L'élimination de ces déchets pose des enjeux environnementaux et sanitaires considérables. L'incinération, souvent envisagée comme solution de facilité, s'avère particulièrement néfaste. En effet, la combustion des pneus libère dans l'atmosphère des substances toxiques et des gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone, contribuant ainsi à la pollution atmosphérique et au réchauffement climatique [25][26].

L'abandon des pneus usagés dans la nature n'est pas non plus sans conséquences. Ces déchets encombrants défigurent les paysages, perturbent les écosystèmes et représentent un risque pour la santé des sols et de la végétation. Leur nature non biodégradable aggrave encore la situation, les condamnant à une accumulation inexorable dans l'environnement [25][26].

## **1.3 Stabilité des sols**

### **1.3.1 Définition de la stabilité des sols**

La stabilité d'un sol peut être définie comme la capacité de son arrangement de solides et de vides à résister aux forces de dégradation, qu'elles soient d'origine mécanique ou chimique [27]. En d'autres termes, il s'agit de la capacité du sol à maintenir son intégrité structurelle face aux sollicitations extérieures telles que la compression, la dilatation, l'érosion ou encore les processus de dissolution et de décomposition chimique.

### **1.3.2 Facteurs influençant la stabilité des sols**

La stabilité des sols est une propriété physique qui peut être influencée par plusieurs facteurs pouvant être d'origine naturelle ou d'activités humaines [28] :

#### **1.3.2.1 La texture du sol**

La texture du sol, également connue sous le nom de composition du sol, est une caractéristique fondamentale qui reflète la répartition des différentes tailles de particules dans le sol. Elle est généralement déterminée par la proportion relative des trois fractions granulaires principales : l'argile (la fraction la plus fine), le limon et le sable (la fraction la plus grossière).

#### **1.3.2.2 La matière organique du sol**

La matière organique du sol est le résultat de processus biologiques complexes impliquant la pédofaune (les organismes vivant dans le sol) et la flore. Elle peut également provenir de l'apport de matières organiques telles que le fumier, les engrais ou les amendements organiques ainsi que les résidus de cultures et les racines des plantes.

La teneur en matière organique du sol est souvent estimée en mesurant la teneur en carbone organique du sol car le carbone est un élément constitutif majeur de la matière organique.

### 1.3.2.3 Les forces mécaniques

Les forces mécaniques et hydrauliques exercées sur le sol sont largement influencées par les conditions météorologiques. Elles régissent les cycles de contractions-gonflements, également connus sous le nom de dessiccation-humectation, ainsi que les cycles de gels-dégels.

- Les cycles de contractions-gonflements se produisent lorsque le sol subit des variations d'humidité, passant de conditions humides à sèches et vice versa. Lorsque le sol se dessèche, il a tendance à se contracter ce qui peut entraîner des fissures et des déformations. En revanche, lorsqu'il absorbe de l'eau, il se gonfle ce qui peut également affecter sa structure et sa stabilité.
- Les cycles de gels-dégels se produisent dans les régions où les températures chutent en dessous de zéro degré Celsius. L'eau présente dans le sol gèle ce qui peut provoquer une expansion et exercer des pressions sur les particules du sol. Lorsque la glace fond, le sol peut se contracter à nouveau. Ces cycles répétés de gel et de dégel peuvent fragiliser la structure du sol entraînant des processus tels que le soulèvement des chaussées et le développement de fissures.

### 1.3.2.4 L'activité humaine

La transformation des terres et les modifications dans leur utilisation, leur couverture et leur gestion sont des phénomènes anthropiques qui ont commencé il y a plusieurs millénaires. Ces activités, telles que les pratiques agricoles, l'urbanisation, l'exploitation minière et d'autres activités humaines, ont eu un impact profond sur les écosystèmes entraînant des changements significatifs dans la structure des sols et déclenchant une série de processus physico-biologiques.

## 1.3.3 Mécanismes de stabilisation des sols

### 1.3.3.1 Définition de la stabilisation

La stabilisation des sols fait référence à la modification des propriétés du système terre-eau-air afin d'obtenir des caractéristiques permanentes qui répondent à des besoins spécifiques. En d'autres termes, il s'agit de l'ensemble des procédés visant à améliorer les caractéristiques des sols pour les rendre adaptés à une application particulière [29].

### 1.3.3.2 But de la stabilisation

La stabilisation des sols a pour but [30] :

- D'améliorer la compacité en réduisant le volume des vides entre les particules solides ;
- D'obstruer les vides existants qui peuvent être éliminés ;
- De renforcer les liaisons entre les particules et d'améliorer celles déjà présentes pour accroître la résistance mécanique.

### 1.3.3.3 Techniques de stabilisation

Les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées sont [30] :

- La stabilisation mécanique ;
- La stabilisation thermique ;
- La stabilisation chimique.

#### 1. La stabilisation mécanique :

Les techniques de stabilisation mécanique des sols sont [30] :

- \* **Le compactage** : consiste à réduire la porosité du sol en expulsant l'air emprisonnée.
- \* **Le drainage** : plusieurs procédés sont utilisés tel que les tranchées drainantes et les drains de sables verticaux.
- \* **La substitution** : consiste à éliminer la couche gonflante du sol.
- \* **L'application de fortes pressions** : consiste à appliquer des pressions supérieures à celle de la pression de gonflement afin d'éviter le gonflement du sol.
- \* **La pré-humidification** : consiste à augmenter la teneur en eau du sol jusqu'à la saturation ; deux techniques sont utilisées ; le simple arrosage par jet et la création de bassin au-dessus du sol.

#### 2. La stabilisation thermique :

Une augmentation de la température peut améliorer la résistance d'un sol notamment pour le cas des argiles. Cette augmentation de température réduit la répulsion électrique entre les particules favorisant ainsi un écoulement de l'eau interstitielle en raison du gradient thermique appliqué [31].

#### 3. La stabilisation chimique :

Elle consiste à utiliser des produits chimiques ou des solutions salines ou des liants afin d'augmenter la concentration ionique de l'eau libre et de réduire les phénomènes d'échanges indésirables [32].

On distingue deux familles de stabilisants chimiques :

- Les hydrophobes ;
- Les liants : Ces derniers se divisent eux aussi en deux grandes familles [32] :
  - a. Les liants hydrauliques : Il s'agit de substances minérales qui, lorsqu'elles entrent en contact avec l'eau, forment des réseaux cristallins enchevêtrés, offrant ainsi une cohésion accrue et la possibilité de se lier au squelette minéral . Ils sont caractérisés par leur fort impact sur ses propriétés physiques et mécaniques au fil du temps [33]. Les principaux liants hydrauliques existants dans l'industrie sont le ciment, la chaux, les cendres volantes, la pouzzolane . . . .
  - b. Les liants organiques : Il s'agit de substances semblables à de la colle qui sont des composés organiques capables de bien adhérer au squelette du matériau . Les principaux liants organiques existants dans l'industrie sont le goudron, les résines naturelles, les polymères, le bitume . . . .

Dans notre étude, nous cherchons à stabiliser le sol en utilisant de la poudrette de caoutchouc et des granulats de pneus, puis à comparer ces résultats avec ceux obtenus en utilisant de la chaux, qui est le mécanisme de stabilisation le plus courant et le plus efficace.

Le processus de stabilisation à la chaux repose sur deux objectifs principaux [33] :

- Améliorer la maniabilité du sol en réduisant l'indice de plasticité et en maîtrisant les caractéristiques de changement de volume ;
- Augmenter la résistance du sol traité à long terme .

## 1.4 Essais géotechniques

### 1.4.1 Définition des essais géotechniques

La géotechnique est un domaine d'étude spécialisé portant sur les propriétés physiques, mécaniques et hydrauliques des sols et des roches, ainsi que sur leurs applications dans le domaine de la construction civile [34].

Elle se divise généralement en trois branches principales : la mécanique des sols, la mécanique des roches et l'ingénierie des fondations. Ces disciplines permettent d'évaluer la capacité portante des sols, de prédire leur comportement sous différentes charges et contraintes et de concevoir des fondations sûres et durables pour les structures [34].

Au cours de notre travail, nous nous intéresserons à deux types d'essais : l'essai Proctor et l'essai œdométrique.

### 1.4.2 Essai Proctor

#### 1.4.2.1 Définition de l'essai Proctor

En 1933, Ralph Roscoe Proctor, un ingénieur américain, a publié une série d'articles dans l'Engineering News Record portant sur des essais de compactage des sols.

Ces essais consistaient à mesurer la masse volumique sèche d'un sol disposé en couches dans un moule spécifique, appelé moule Proctor [34].

L'essai Proctor est un essai géotechnique qui vise à étudier l'influence de la teneur en eau sur un sol spécifique lors d'un processus de compactage normalisé. Pour ce faire, le sol est compacté selon la norme NF P 94-093, afin de déterminer les caractéristiques de compactage de ce dernier [35]. Ces caractéristiques sont la masse volumique sèche maximale du sol ( $\gamma_{d_{max}}$ ) et la teneur en eau optimale ( $W_{opt}$ ).

Ces caractéristiques sont déterminées à partir de deux types d'essais : l'essai Proctor Normal et l'essai Proctor Modifié [34].

#### **1.4.2.2 Principe de l'essai**

L'essai Proctor consiste à humidifier le sol à au moins 5 teneurs en eau puis à le compacter dans un moule de volume déterminé [36].

Dans l'essai Proctor Normal, le sol est réparti en trois couches et chaque couche est compactée à l'aide d'une dame de 2,49 Kg chutant d'une hauteur libre de 305 mm.

En revanche, l'essai Proctor Modifié implique que le sol soit réparti en cinq couches et compacté avec une énergie de compactage supérieure à celle utilisée dans l'essai Proctor Normal à l'aide d'une dame de 4,535 Kg chutant d'une hauteur libre de 457mm.

La figure 1.8 présente les différentes caractéristiques des essais Proctor Normal et Proctor Modifié [36].

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de la dame	2 490 g	2 490 g	<p>3 couches, à raison de :</p> <p>25 coups par couche      56 coups par couche</p>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	
Essai Proctor modifié	Masse de la dame	4 535 g	4 535 g	<p>5 couches, à raison de :</p> <p>25 coups par couche      56 coups par couche</p>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm	
	Nombre de couches	5	5	
	Nombre de coups par couche	25	56	

FIGURE 1.8 – Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié.

Le choix du type de moule (moule Proctor ou CBR) est imposé par la granularité du matériau et l'utilisation envisagée des résultats de l'essai [36].

Dans notre étude, nous avons utilisé un moule CBR, qui se compose de plusieurs éléments cruciaux pour garantir des résultats précis et fiables :

- Le moule proprement dit : C'est la partie principale du dispositif conçue pour contenir l'échantillon de sol à tester. Sa forme cylindrique permet de garantir des conditions de compactage uniformes.
- L'embase : Cette partie constitue la base du moule et assure le maintien de la stabilité pour le compactage de l'échantillon.
- Le disque d'espacement : Placé au-dessus de l'embase, le disque d'espacement assure une hauteur spécifique pour l'échantillon de sol à l'intérieur du moule.
- La rehausse : C'est la partie supérieure du moule qui vient compléter la structure et permet de fermer hermétiquement le dispositif pendant le compactage de l'échantillon.

La figure 1.9 illustre un schéma du dispositif expérimental du moule CBR [36].



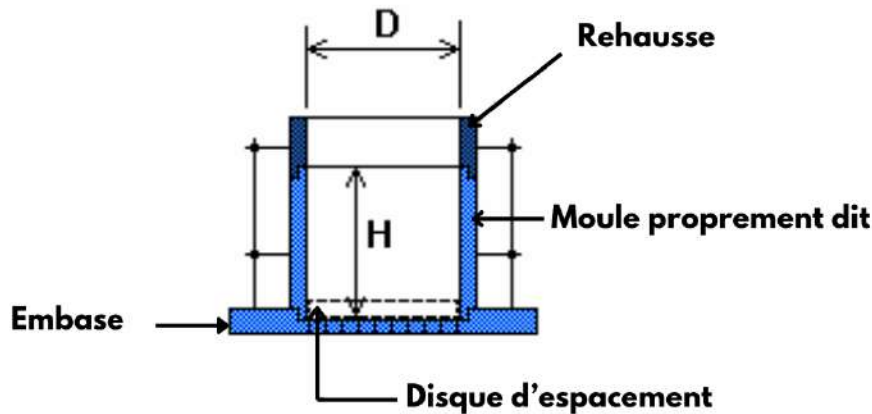


FIGURE 1.9 – Dispositif expérimental du moule CBR.

### 1.4.2.3 Interprétation théorique de l'essai Proctor

Les données recueillies lors de l'essai Proctor fournissent des informations cruciales pour élaborer la courbe de variation de la masse volumique en fonction de la teneur en eau, également connue sous le nom de courbe Proctor.

Cette courbe illustre comment la masse volumique du sol évolue en réponse à différentes teneurs en eau, fournissant ainsi des indications précieuses sur les propriétés de compactage du sol. Parmi les paramètres clés dérivés de cette courbe figure la teneur en eau optimale ( $W_{opt}$ ), qui représente le niveau d'humidité idéal pour obtenir la masse volumique maximale du sol ( $\gamma_{d_{max}}$ ) lors du compactage.

La figure 1.10 illustre un exemple représentatif de la courbe Proctor [36].

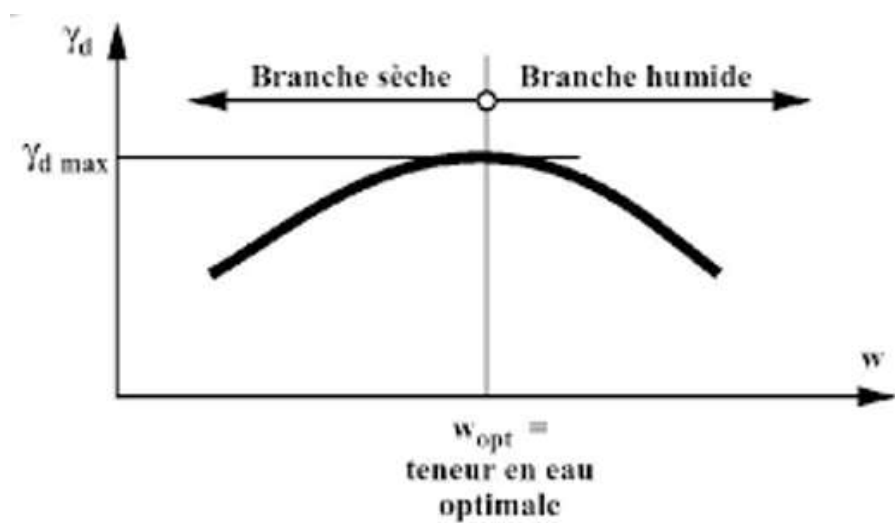


FIGURE 1.10 – Exemple représentatif de la courbe Proctor.

### 1.4.3 Essai œdométrique

#### 1.4.3.1 Définition de l'essai

L'essai œdométrique, introduit pour la première fois en 1970 par HUDER et AMBERG, est utilisé pour évaluer les phénomènes de tassement et de gonflement des sols au fil du temps [37]. Cet essai s'effectue selon la norme ISO 17892-5.

#### 1.4.3.2 Principe de l'essai

L'essai œdométrique consiste à appliquer des charges verticales et axiales par paliers sur un échantillon de sol préalablement taillé dans un anneau cylindrique.

L'essai œdométrique peut être réalisé sur des éprouvettes de sol remanié, c'est-à-dire sur un sol qui a été extrait, perturbé et reconstitué pour l'essai ou sur des éprouvettes de sol non remanié, c'est-à-dire un sol qui a été prélevé et conservé intact dans son état naturel.

#### 1.4.3.3 Interprétation théorique du test œdométrique

À partir de cet essai, plusieurs courbes peuvent être établies pour chaque échantillon testé. Dans le cas de notre étude, nous nous sommes intéressées à la courbe des indices des vides aussi appelée diagramme de contrainte de compression. Cette courbe offre une représentation visuelle de la variation de la hauteur de l'échantillon à chaque étape de chargement ou de déchargement [38]. La figure 1.11 illustre un exemple représentatif de la courbe de compression de l'essai œdométrique [38].

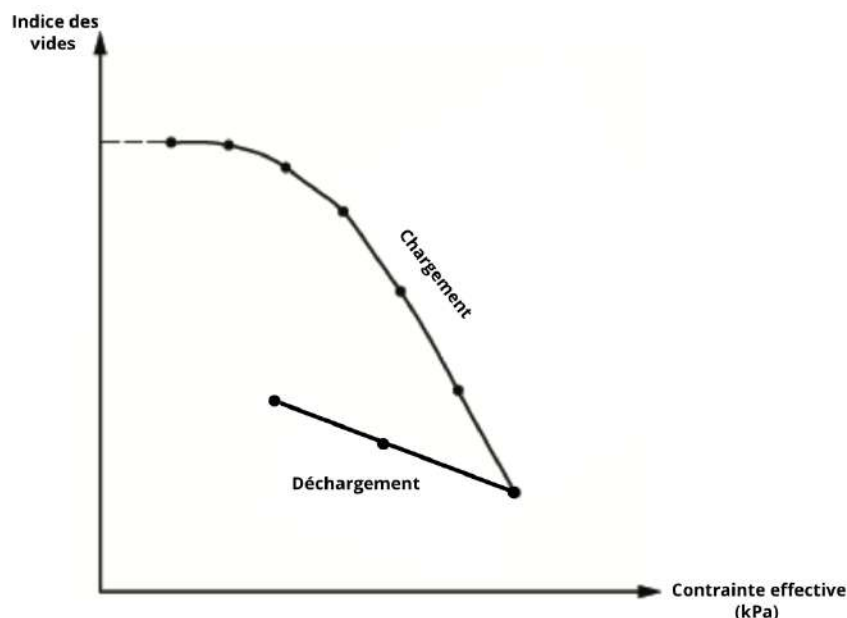


FIGURE 1.11 – Exemple représentatif de la courbe de compression de l'essai œdométrique.

#### 1.4.3.4 Les paramètres œdométrique

Les sols présentent une diversité de réactions face aux sollicitations de chargement et de déchargement. En effet, chaque type de sol peut manifester des comportements spécifiques lorsqu'il est soumis à des contraintes. Dans le cadre de l'essai œdométrique, effectué sur des échantillons non remaniés, plusieurs paramètres de tassement et de gonflement peuvent être déduits. Parmi ces paramètres, on peut notamment citer [39] :

- Les paramètres de compressibilité : mesurent la capacité du sol à se déformer sous l'effet des charges appliquées ;
- Le coefficient de consolidation : caractérise la rapidité avec laquelle le sol se consolide en réponse à une charge ;
- La contrainte apparente de pré-consolidation ou la résistance du matériau ;
- Le coefficient de consolidation secondaire ;
- Les paramètres de gonflement.

#### 1.4.3.5 Description de l'appareillage

L'œdomètre, inventé au début du XXe siècle, est un appareil d'essai utilisé au laboratoire pour réaliser des essais de compressibilité sur des éprouvettes de sol cylindriques indéformables [39][40]. Ces éprouvettes ont leur paroi interne en contact direct avec l'éprouvette.

Dans les œdomètres, l'enceinte cylindrique rigide qui entoure l'éprouvette empêche toute dilatation radiale du sol. Ainsi, les déformations observées résultent uniquement de la pression exercée par le piston de manière verticale ou axiale.

L'enceinte cylindrique contenant l'échantillon est appelée la cellule œdométrique. Elle se compose de [39][40] :

- L'anneau œdométrique contenant l'échantillon de sol.
- Les plaques interstitielles supérieure et inférieure, également appelées pierres poreuses, qui assurent le drainage des deux faces de l'anneau.
- Le corps de la cellule fabriqué en un métal étanche et résistant à la corrosion.
- Le capot de chargement permettant le chargement de la cellule.

La cellule est positionnée sur le cadre de chargement qui est un dispositif mécanique utilisant un système de poids pour appliquer la charge, lequel est assisté d'un bras de levier pour augmenter les efforts appliqués [39][40]. Ce dernier doit être solidement fixé et stable pour éviter toute vibration. Les figures 1.12 et 1.13 présentent respectivement un schéma du dispositif expérimental de l'essai œdométrique et un schéma représentatif du cadre de chargement.

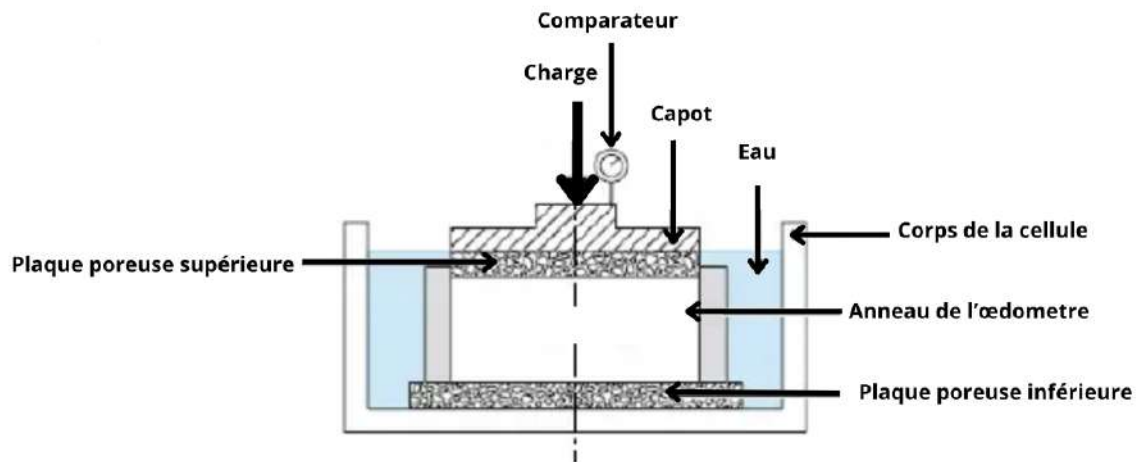


FIGURE 1.12 – Schéma du dispositif expérimental de l'essai œdométrique.

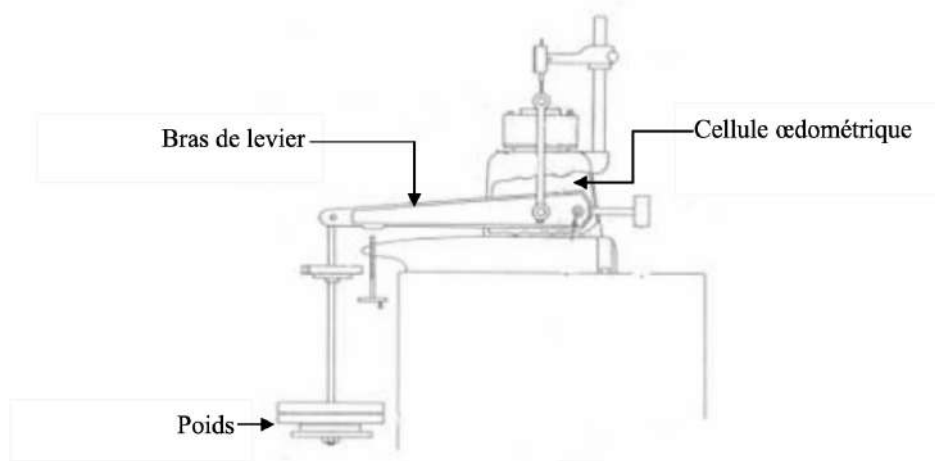


FIGURE 1.13 – Système de chargement mécanique – cadre de chargement.

## 1.5 La matière organique du sol

Les sols, en tant qu'écosystèmes complexes, interagissent étroitement avec les autres éléments de l'environnement, notamment l'eau et l'air [41].

Ils se composent généralement de quatre éléments fondamentaux : les particules minérales, la matière organique, l'eau et l'air.

### 1.5.1 Définition de la matière organique du sol

La matière organique du sol (MOS) regroupe tous les composants organiques, qu'ils soient vivants ou morts présents dans le sol [41]. Elle peut provenir soit d'une origine récente, liée au développement du sol, soit d'une origine ancienne associée à la formation de la roche [42].

La MOS est ainsi composée d'éléments principaux qui sont tous essentiels à la nutrition des plantes : le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote. Elle inclut également des éléments secondaires comme le soufre, le phosphore, le potassium, le calcium et le magnésium ainsi que des oligoéléments [41].

### 1.5.2 Rôles et fonctions de la MOS

La matière organique du sol exerce plusieurs fonctions essentielles notamment l'amélioration des propriétés physiques du sol et l'augmentation de sa qualité globale [41]. Elle agit en modifiant la structure du sol pour [42] :

- Favoriser sa capacité de rétention en eau assurant ainsi une hydratation adéquate pour la croissance des plantes tout en limitant les pertes par évaporation ;
- Améliorer sa perméabilité favorisant une infiltration efficace de l'eau ;
- Renforcer sa stabilité structurale contribuant à une meilleure aération et à un drainage efficace tout en réduisant les risques d'érosion et de tassement.

# Chapitre 2

## Méthodologie expérimentale

### 2.1 Matériaux utilisés

#### 2.1.1 Le sol

Les échantillons de sol que nous avons examinés dans notre étude ont été prélevés dans la région de Saoula, une commune de la wilaya d'Alger, dans la banlieue sud de la ville, comme le montre la figure 2.1.

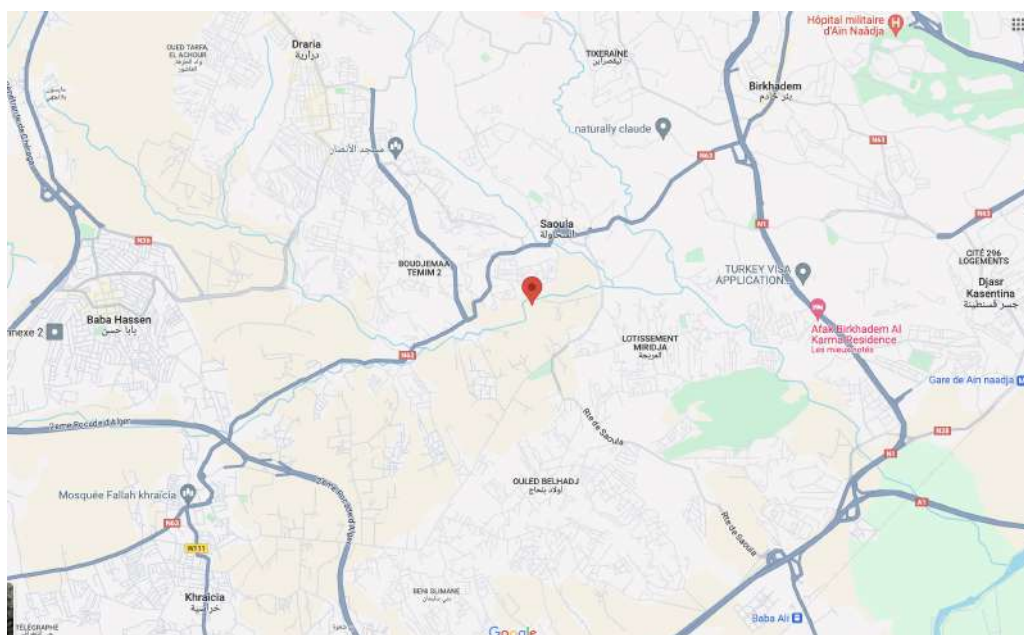


FIGURE 2.1 – Localisation du lieu de prélèvement de l'échantillon

Ces échantillons ont été collectés sur un chantier routier dédié au « parachèvement de la réalisation de l'évitement de la ville de Saoula RN63 » reliant la ville de Birkhadem à celle de Khraicia.

Le prélèvement a été réalisé avec une pelle, permettant ainsi de récupérer exclusivement la partie fine du sol nécessaire à nos analyses.

Ce choix de chantier s'est fait en raison de sa proximité géographique et de son accessibilité facilitant ainsi le processus de collecte des échantillons.

## 2.1.2 Les granulats et la poudrette de pneus

Pour notre recherche, nous avons choisi d'utiliser de la poudrette et des granulats de pneus fournis par la société Recytech, une entreprise algérienne dédiée au recyclage et à la valorisation des pneus usagés.

Leur site de production est situé le long de la route reliant Hammam Ksena à Seddara, dans la commune d'El-Hachimia, localisée dans la Wilaya de Bouira.

La poudrette utilisée présente les caractéristiques suivantes :

- **SBR** : copolymère des "Styrène Butadiène Rubber" ou caoutchouc styrène butadiène ;
- **Densité** :  $600 \text{ kg/m}^3$  ;
- **Couleur** : Noire ;
- **Granulométrie** : allant de 0 à 0,8mm.

Les granulats utilisés présentent les caractéristiques suivantes :

- **SBR** : copolymère des Styrène Butadiène Rubber ;
- **Densité** :  $600 \text{ kg/m}^3$  ;
- **Couleur** : Noir ;

Le tableau 2.1 présente la répartition granulométrique des granulats :

TABLE 2.1 – Répartition granulométrique des granulats

Tamis	<1,25	<2	<2,5	<3,15	<4	Total
Poids retenue	1,91	70,09	365,89	61,27	0	499,16
% retenue	0,382	14,018	73,178	12,254	0	99,832
% passants cumulés	0	0,382	14,4	87,578	99,832	

La figure 2.2 illustre la courbe granulométrique des granulats de pneus :

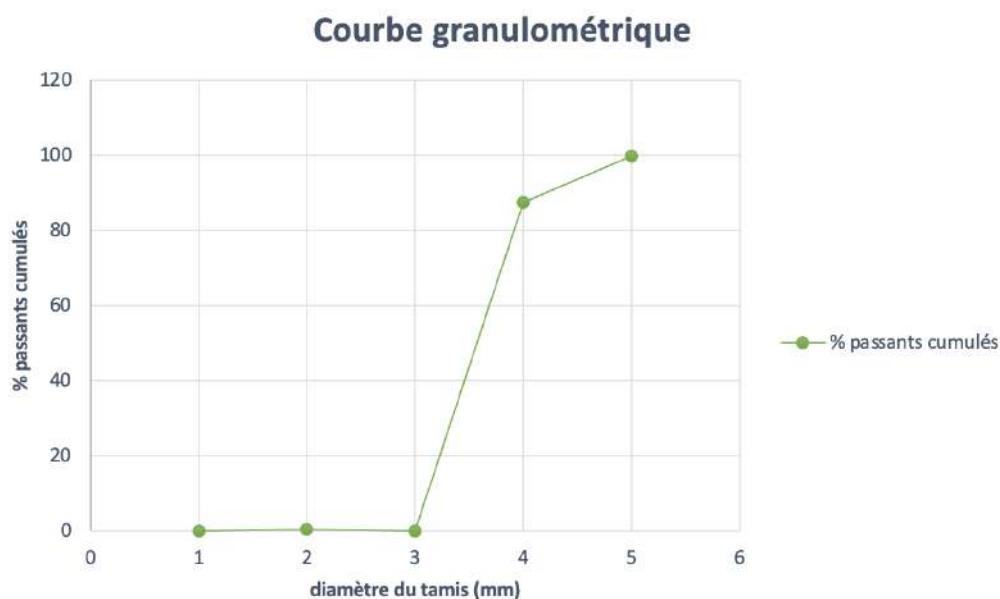


FIGURE 2.2 – Courbe granulométrique des granulats de pneus usagés.

### 2.1.3 La chaux

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé de la chaux éteinte provenant de la région de Berriane, une commune de la Wilaya de Ghardaïa, comme agent de stabilisation des sols.

La chaux éteinte, également connue sous le nom d'hydroxyde de calcium, est un matériau largement employée dans l'industrie de la construction et du génie civil à cause de ses propriétés bénéfiques pour améliorer les caractéristiques des sols.

## 2.2 Protocole expérimental

Notre travail a été scindé en deux parties distinctes. Dans la première partie, nous nous sommes concentrés sur l'identification du sol étudié. Cela implique de caractériser les propriétés mécaniques et les composants chimiques du sol brut avant tout traitement. Nous avons réalisé une série d'analyses et de tests pour déterminer la nature du sol, sa composition granulométrique, sa plasticité et d'autres caractéristiques pertinentes.

La seconde partie de notre étude est consacrée au traitement du sol en vue d'améliorer ses propriétés pour des applications spécifiques. Nous avons opté pour deux types de stabilisants : la chaux agissant en tant que stabilisant chimique et les déchets de pneus (granulats et poudrette), utilisés pour leur potentiel dans l'amélioration des caractéristiques du sol brut. L'objectif était de rendre le sol plus adapté à des usages particuliers.

Au cours de cette étape, deux tests essentiels ont été réalisés : le test Proctor et le test œdométrique.

### 2.2.1 Identification du sol

Dans un premier temps, des essais ont été réalisés pour identifier, classer et évaluer l'état du sol. Les tests effectués sur l'échantillon de matériau comprennent :

- L'analyse granulométrique par tamisage ;
- Les limites d'Atterberg ;
- Le proctor modifié : ce test sera abordé dans la section consacrée au traitement du sol ;
- La détermination des indices CBR après immersion ;
- L'équivalent de sable ;
- L'essai de bleu de méthylène ;
- L'analyse chimique sommaire ;
- La détermination de la teneur pondérale en matières organiques.

#### 2.2.1.1 Analyse granulométrique

##### 1. But de l'analyse

La granulométrie des particules, ou distribution granulométrique, est l'une des caractéristiques physiques les plus importantes des sols. Elle permet de déterminer la répartition dimensionnelle en poids des particules d'un matériau, ce qui est essentiel pour la classification des sols.



## 2. Principe de l'analyse

Le principe de l'essai granulométrique par tamisage consiste à fractionner un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes en utilisant une série de tamis. L'essai s'effectue selon la norme NF EN ISO 17892-4 :2016 comme suit :

- Déterminer le diamètre maximal des particules du sol à analyser pour établir la quantité de sol à tamiser ;
- Peser la quantité de sol à tamiser ;
- Laver le sol à analyser en utilisant des tamis de 0,08 mm et 0,063 mm d'ouverture ;
- Laisser décanter le sol et le tamisât du tamis de 0,063 mm ;
- Placer le sol dans une étuve à 105°C pendant 24 heures ;
- À la sortie de l'étuve, peser le sol. La différence de masse représente la pollution du sol ;
- Assembler une série de tamis disposés en ordre décroissant de taille d'ouverture, du tamis le plus gros au tamis le plus fin, le tableau 2.2 illustre la série de tamis classée par ordre décroissant ;

TABLE 2.2 – Série de tamis classés par ordre décroissant

Diamètre des ouvertures des tamis (mm)
80
63
50
31,5
20
10
5
2
1
0,400
0,200
0,100
0,080
0,063

- Secouer mécaniquement la série de tamis pour permettre aux particules de passer à travers les tamis en fonction de leur taille ;
- Peser le sol retenu sur chaque tamis qu'on notera refus.

### 3. Expression des résultats

Le résultat de l'analyse granulométrique est calculé selon la loi suivante :

$$f_n = 100 - \frac{R_n}{m} \times 100$$

Avec :

$f_n$  : pourcentage massique du refus cumulés ou la fraction passante à travers le tamis de n ouverture (%).

$R_n$  : Masse du refus mesuré avec  $R_n = R_{n-1} + R_{n-2} + \dots$  (g)

$m$  : masse sèche totale (g).

La détermination du taux des éléments inférieurs à 2 mm ainsi que des fines inférieures à 80  $\mu\text{m}$  est effectuée à l'aide du logiciel **Soltest**. Pour ce faire, on saisit les valeurs des diamètres des tamis ainsi que les pourcentages de refus correspondants.

#### 2.2.1.2 Limites d'Atterberg

##### 1. But de l'essai

Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques qui permettent de marquer les seuils entre différents états de consistance du sol, à savoir :

- Limite de plasticité notée ( $w_L$ ) : cette constante marque le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique ;
- Limite de liquidité notée ( $w_P$ ) : cette constante marque le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide.

##### 2. Principe de l'essai

L'essai s'effectue en deux phases selon la norme NF EN ISO 17892-12 :

###### - Recherche de la limite de liquidité par la méthode du cône tombant :

- \* Imbiber environ 300 g de sol afin de pouvoir récupérer 200 g de sol tamisé. Lors du tamisage à l'aide d'un tamis à ouverture de 0,4 mm, nous obtenons ainsi une masse d'environ 200 g de sol tamisé ;
- \* Laver le sol tamisé sur un tamis de 2mm d'ouverture reposant sur un tamis de 0,4mm ;
- \* Afin de laver les particules retenues sur les tamis, verser une quantité minimale d'eau distillée jusqu'à ce que l'eau qui s'égoutte du tamis de 0,4 mm, ou de valeur la plus proche, soit claire à vue ;
- \* Recueillir tous les matériaux lavés ;
- \* Sécher le matériau dans une étuve ;
- \* Laisser poser le liquide de lavage puis filtrer afin de récupérer que les particules solides ;
- \* Malaxer la totalité du tamisât afin d'obtenir une pâte bien homogène ;

- \* Remplir une coupelle métallique avec le sol tout en veillant à ne pas inclure de bulles d'air puis raser avec une règle à raser afin d'obtenir une surface lisse et plane ;
- \* Mettre en place le récipient sur l'appareil puis amener la pointe du cône de type 30°/80 en contact avec la surface de la coupelle ;
- \* Noter la position initiale du cône ;
- \* Faire chuter le cône et le relâcher après 5sec ;
- \* Noter la pénétration ;
- \* Prélever un échantillon dans la zone de pénétration du cône afin de déterminer la teneur en eau ;
- \* Répéter l'opération 4 fois sur le même échantillon de sol en changeant la teneur en eau.

- *Recherche de la limite de plasticité :*

- \* Prélever environ 20g de l'échantillon de sol préalablement préparé puis former une boulette ;
- \* Rouler la boulette sur une plaque lisse de façon à obtenir un cylindre d'environ 3mm de diamètre et 10cm de longueur ;
- \* Lorsque le rouleau se fissure et se divise en deux parties, prélever un morceau et déterminer sa teneur en eau ;
- \* Répéter l'opération une seconde fois.

### 3. Expression des résultats

Les résultats de l'essai de détermination des limites d'Atterberg à savoir les limites de liquidité ( $w_L$ ) et de plasticité ( $w_P$ ) représentent les moyennes des teneurs en eau.

A partir de ces limites, on peut déterminer l'indice de plasticité noté  $I_P$  et qui est calculé comme la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité :

$$I_P = w_L - w_P \quad (2.1)$$

Les résultats sont exprimés en pourcentage arrondi au nombre entier.

#### 2.2.1.3 Détermination des indices CBR après immersion

##### 1. But de l'essai

La détermination des indices CBR (California Bearing Ratio) après immersion a pour objectif d'évaluer la portance d'un sol utilisé comme support ou comme constituant d'une chaussée en tenant compte des variations du régime hydrique. En d'autres termes, cet essai simule la pression exercée par les pneumatiques sur le sol. L'essai vise à :

- Établir une classification des sols conformément au Guide des Terrassements Routiers (GTR).
- Évaluer la traficabilité des engins de terrassement à travers l'Indice de Portance Immédiat (IPI).
- Déterminer l'épaisseur des chaussées c'est-à-dire le dimensionnement des chaussées.

## 2. Principe de l'essai

L'essai CBR consiste à poinçonner des échantillons de sol compactés selon la norme NF P 94-078. L'échantillon est soumis à un poinçonnement par l'application d'un piston cylindrique de 4,9 cm de diamètre à une vitesse constante de 1,27 mm/min. On mesure ensuite la relation entre l'effort de poinçonnement et l'enfoncement du piston.

Cet essai doit être précédé par l'essai Proctor (modifié dans le cadre de notre étude) pour déterminer la teneur en eau optimale à utiliser comme teneur en eau de compactage pour l'essai CBR. Il est ensuite réalisé selon les étapes suivantes :

- Compacter le sol dans les mêmes conditions que pour l'essai Proctor ;
- Positionner le disque de gonflement, les surcharges ainsi que le dispositif de mesure de gonflement comme illustré dans la figure 2.3 ;

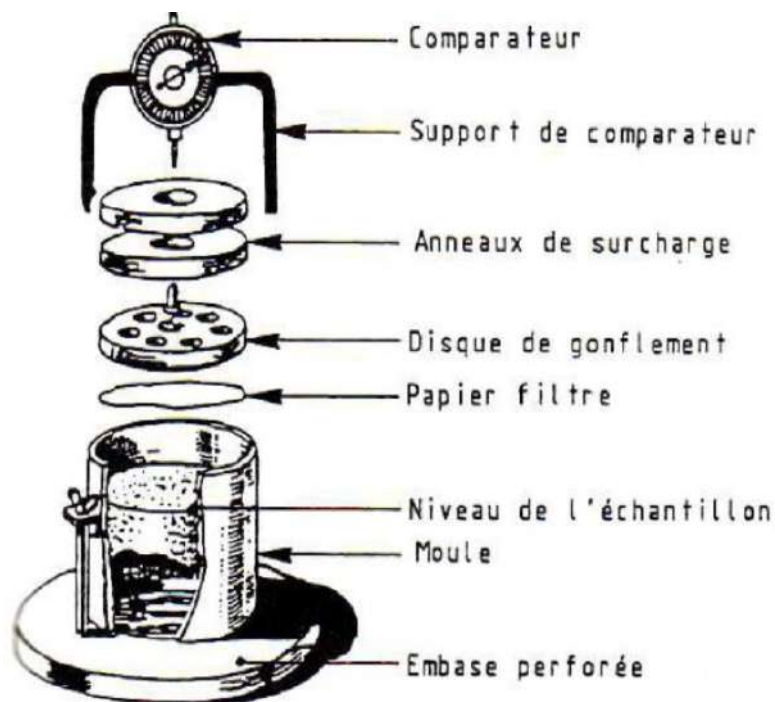


FIGURE 2.3 – Schéma du montage de l'éprouvette de l'essai CBR après immersion

- Immerger l'éprouvette dans un bassin rempli d'eau de manière à ce qu'elle soit recouverte par une hauteur d'eau d'au moins 20mm. L'objectif de cette immersion est de simuler les pires conditions hygrométriques que le sol pourrait rencontrer dans des situations réelles.
- Après 4 jours d'immersion, relever la valeur du gonflement atteint indiqué sur le comparateur ;
- Retirer le moule du bassin et laisser égoutter ;
- Placer le moule sur la presse en veillant à bien centré le piston de poinçonnement ;
- Exécuter le poinçonnement en notant les forces nécessaires pour les enfoncements suivants : 0.625mm, 1.25mm, 2mm, 2.5mm, 5mm, 7.5mm, 10mm et 12.5mm ;
- Prélever un échantillon à la fin de l'essai afin de déterminer la teneur en eau finale.

### 3. Expression des résultats

L'indice CBR ( $I_{CBR}$ ) est par convention, la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$I(2,5) = \frac{\text{Effort de pénétration à } 2,5\text{mm d'enfoncement (KN)}}{13,35} \times 100 ;$$

$$I(5) = \frac{\text{Effort de pénétration à } 5\text{mm d'enfoncement (KN)}}{19,93} \times 100 .$$

A noter que la capacité portante du sol est d'autant meilleure que l'indice CBR est élevé.

Pour l'indice CBR mesuré après immersion, on calcule également le gonflement linéaire relatif (G) comme suit :

$$G = \frac{\delta h}{H} \times 100$$

Avec :

$\delta h$  : variation de hauteur mesurée (mm), cette variation est indiquée par le comparateur et est mesurée après 4 jours d'immersion.

$H$  : hauteur initiale de l'éprouvette.

#### 2.2.1.4 Équivalent de sable

##### 1. But de l'essai

Cet essai, également connu sous le nom de détermination des caractéristiques géométriques des granulats, permet d'évaluer la propreté du sable utilisé dans la composition du sol. Il vise à déterminer la proportion relative des poussières fines nuisibles ou d'éléments argileux présents dans les sols ou agrégats fins.

##### 2. Principe de l'essai

Cet essai, conforme à la norme NP EN 933-8, vise à séparer les fines (granulats passant au tamis de 0,063 mm) du sable pour évaluer la propreté du matériau.

- Tamiser 120 g d'échantillon de sol à l'aide d'un tamis d'ouverture de 5 mm ;
- Remplir l'éprouvette de solution lavante jusqu'au premier repère ;
- Ajouter l'échantillon de sol, frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette afin d'éviter les bulles d'air et favoriser le mouillage du sol ;
- Laisser reposer 10 minutes ;
- Boucher l'éprouvette avec un bouchon en caoutchouc ;
- Placer l'éprouvette horizontalement sur la machine à vibrer.
- Activer la machine pour effectuer 90 vibrations en 30 secondes ;
- Retirer l'éprouvette et la remettre en position verticale ;
- Ôter le bouchon et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavante ;
- Rincer les parois de l'éprouvette ;
- Enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette pour laver le sable et permettre la remontée des éléments argileux ;

- Effectuer de légers mouvements rotatoires tout en remontant lentement et sans mouvent brusque le tube laveur ;
- Lorsque le niveau du liquide atteint le second trait de repère, retirer complètement le tube ;
- Laisser reposer pendant 20min ;
- Mesurer à l'aide d'une règle la hauteur  $h_1$  entre le niveau du floculant du fond de l'éprouvette ;
- Abaisser avec précaution le piston à l'intérieur de l'éprouvette jusqu'à atteindre le sédiment ;
- Bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston ;
- Déterminer la hauteur  $h_2$  en mesurant la distance entre la face intérieure de la tête du piston et la face supérieure du manchon.

La figure 2.4 illustre un schéma du dispositif de l'équivalent de sable et du mesurage de  $h_1$  et  $h_2$  .

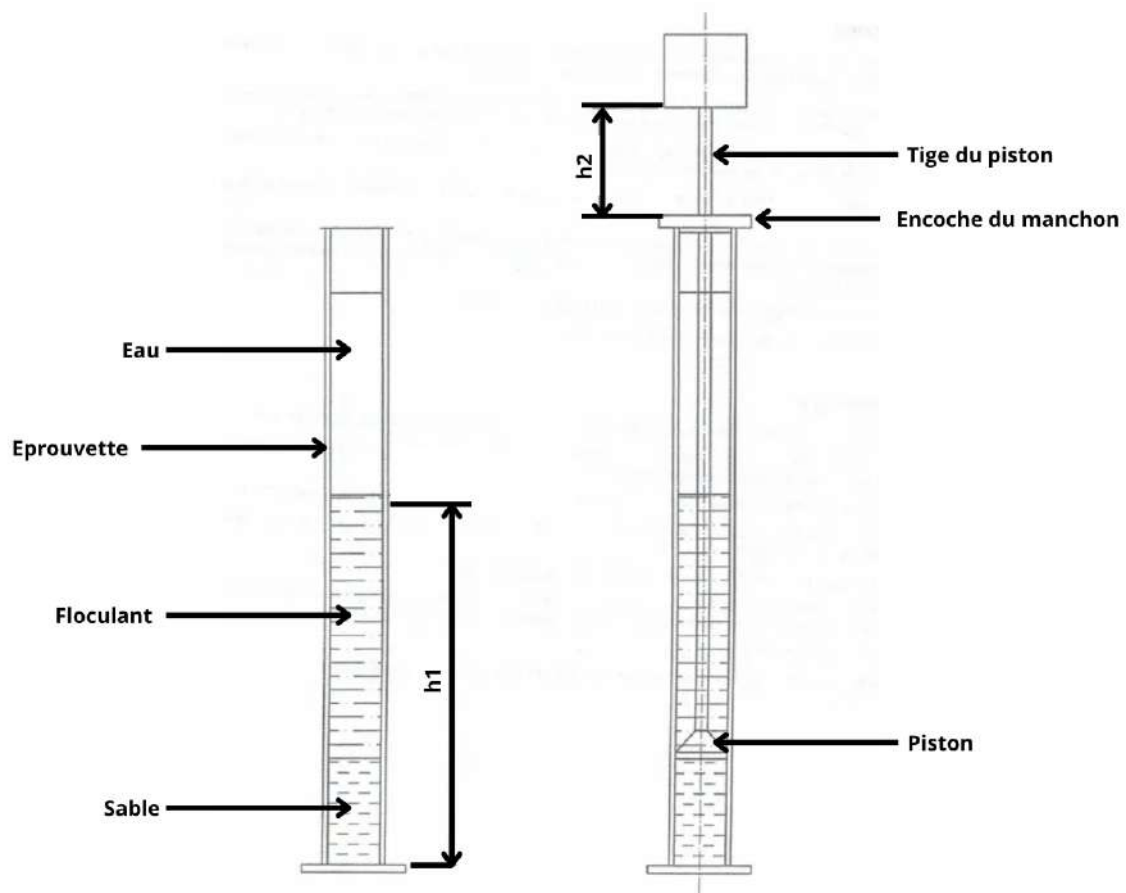


FIGURE 2.4 – Schéma du dispositif de l'équivalent de sable et du mesurage de  $h_1$  et  $h_2$  .

### 3. Expression des résultats

La détermination de l'équivalent de sable ( $ES$ ) se fait comme suit :

$$ES(\%) = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

Avec :

$h_2$  : Distance entre le niveau du floculant et le fond de l'éprouvette ;

$h_1$  : Distance entre la face intérieure de la tête du piston et la face supérieure du manchon.

### 2.2.1.5 Essai au bleu de méthylène

#### 1. But de l'essai

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins constituant le sol à adsorber du bleu de méthylène à la surface interne et externe des particules. C'est une méthode pour mesurer, d'une façon indirecte, la surface spécifique.

#### 2. Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer, par dosage, la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cet essai est réalisé conformément à la norme NF P 94-068 et se déroule comme suit :

- Tamiser environ 200g de sol sec à l'aide d'un tamis de 2mm d'ouverture, on notera cette masse  $M_1$  ;
- Remplir un bécher avec 500 ml d'eau distillée puis ajouter la masse  $M_1$  de l'échantillon de sol ;
- Placer les ailettes de l'agitateur dans le bécher ;
- Homogénéiser le mélange à 700 tr/min pendant environ 5min ou jusqu'à disparition visuelle des agrégats des particules et des accumulations sur les parois du bécher ;
- Réduire la vitesse de l'agitateur à 400 tr/min ;
- Remplir une burette graduée avec la solution de bleu de méthylène de concentration de 10g/L ;
- Introduire dans la suspension 5ml de solution de bleu de méthylène puis laisser l'agitateur tourner pendant 1 min pour permettre l'adsorption du bleu de méthylène sur les particules de sol ;
- Prélever à l'aide d'une baguette en verre une goutte de suspension sur un papier filtre, la tache se compose d'un dépôt central bleu sombre entourée d'une zone humide incolore ;
- Mesurer le diamètre du dépôt central, il doit être compris entre 8 et 12mm ;
- L'absence d'une auréole bleu clair autour du dépôt sombre signifie que la quantité de bleu de méthylène ajoutée est insuffisante pour saturer toutes les particules du sol, le test est alors considéré comme négatif ;
- Procéder à des injections successives de 5ml de solution de méthylène et répéter le test à la tache jusqu'à obtention d'une auréole bleu clair, le test est dit alors positif ;
- Laisser se poursuivre l'adsorption du bleu de méthylène dans le sol sans ajout de solution mais en maintenant une agitation constante de 400 tr/min ;
- Réaliser le test de la tâche de minute en minute ;
- Si l'auréole bleu clair disparaît au bout de 5min, procéder à un nouvel ajout de 1 à 2ml solution de bleu de méthylène, chaque ajout est suivi d'un test à la tâche de minute en minute ;

- Si l'auréole bleu clair réapparaît et persiste au-delà de 5min après une injection, le dosage est alors terminé ;
- Lire sur la burette le volume de bleu de méthylène nécessaire pour atteindre la saturation afin de déterminer la valeur de bleu de méthylène du matériau.

### 3. Expression des résultats

Pour les matériaux dont le  $D_{max}$  est inférieur à 5mm, le calcul de  $VBS$  est exprimé :

$$VBS = \frac{B}{m_0} \times 100$$

Avec :

$VBS$  : valeur de bleu de méthylène d'un sol exprimée en grammes de bleu pour 100g de matériau sec ;

$B$  : masse de bleu introduite, avec  $B = V \times 0,01$  où  $V$  est le volume de bleu introduit et 0,01 la concentration du bleu en  $g/ml$  ;

$m_0$  : Masse sèche de la prise d'essai.

#### 2.2.1.6 Détermination de la teneur pondérale en matière organique

##### 1. But de l'essai

Cet essai permet de déterminer la teneur en matières organiques de la fraction granulométrique inférieure ou égale à 2mm du sol.

##### 2. Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer la perte de masse d'un échantillon préalablement séché, après calcination dans un four à une température de 405°C. Cet essai est réalisé conformément à la norme XP P 94-047 et se déroule comme suit :

- Sécher un échantillon de sol dans une étuve à 105°C ;
- Tamiser le sol séché à l'aide d'un tamis de 2mm d'ouverture puis prélever un échantillon de 200g ;
- Broyer le tamisât ;
- Prélever un échantillon de 50g de sol broyé et le placer dans un creuset préalablement pesé à vide. Noter la masse du creuset comme étant  $m_0$  ;
- Peser le creuset avec son contenu, cette masse est notée  $m_1$  ;
- Placer le creuset dans le four et élever la température du four progressivement jusqu'à atteindre une température entre 450° et 500°C ;
- Après 3 heures, retirer le creuset du four et laisser refroidir ;
- Peser le creuset et son contenu, cette masse est notée  $m_2$  .



### 3. Expression des résultats

La teneur en matière organique de la fraction granulométrique inférieure à 2 mm est calculée comme la moyenne arithmétique des  $n$  échantillons d'essai et est arrondie au nombre entier.

Dans notre cas, n'étant basé que sur un seul échantillon d'essai, la teneur en matière organique est déterminée directement à partir de cette prise d'essai.

$$C_{MOC} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0}$$

Avec :

$C_{MOC}$  : teneur en matière organique par calcination exprimée en pourcentage (%);

$m_0$  : masse creuset vide;

$m_1$  : masse creuset + sol sec;

$m_2$  : masse creuset + sol calciné.

#### 2.2.1.7 Analyse chimique sommaire

##### 1. But de l'essai

L'analyse chimique sommaire des matériaux a pour objectif de déterminer la composition chimique globale des échantillons de sol ou d'autres matériaux de construction.

Cette analyse permet d'identifier les éléments et composés présents en quantités significatives. Dans le cadre de notre étude, l'analyse porte spécifiquement sur les sulfates, les chlorures, les carbonates et l'anhydride carbonique.

##### 2. Principe de l'essai

Cet essai est réalisé selon un protocole spécifique au laboratoire LCTP. Il consiste à doser les composés chimiques présents dans une solution contenant le sol. Chaque composé est analysé selon une méthode spécifique. Le processus s'effectue comme suit :

###### - *Les sulfates*

- \* Prélever un échantillon de sol d'environ 1g, noter la masse exacte  $PE$ , et le mettre dans un bécher de 500ml;
- \* Ajouter 100ml d'acide chlorhydrique dilué à 20%;
- \* Porter la solution à ébullition en couvrant le bécher d'un verre de montre;
- \* Filtrer la solution à travers un filtre de type bande blanche ou rouge;
- \* Rincer le filtre à l'eau bouillante et récupérer environ 100ml de filtrat noté solution  $A$ ;
- \* Verser 100ml de solution  $A$  dans un bécher et porter à ébullition tout en agitant la solution;
- \* Précipiter la solution à l'aide de 50ml de chlorure de baryum ( $BaCl_2$ ) dosé à 10% puis laisser reposer pendant 12 heures;

- \* Filtrer la solution à travers un filtre de type bande bleu, puis rincer plusieurs fois à l'eau distillée bouillante ;
- \* Peser un creuset en platine, noter cette masse  $b$ , puis y placer le filtre ;
- \* Placer le creuset et son contenu dans un four à  $950^{\circ}\text{C}$  pendant 1 heure ;
- \* A sa sortie du four, peser le creuset, noter cette masse  $a$ .

#### - *Les chlorures*

- \* Prélever un échantillon de 1g du sol et le placer dans un bécher de 250ml ;
- \* Ajouter 100ml d'eau distillé et chauffer la solution pendant 10 minutes ;
- \* Filtrer la solution à travers un filtre de type bande blanche ou noire, puis rincer le filtre à l'eau distillée ;
- \* Ajouter 5 à 10 gouttes de dichromate de potassium ( $K_2Cr_2O_4$ ) comme indicateur coloré de fin de réaction ;
- \* Titrer la solution avec une solution de nitrate d'argent ( $AgNO_3$ ) à l'aide d'une burette graduée jusqu'à l'apparition d'une couleur rouge brique ;
- \* Noter le volume  $V$  de nitrate d'argent utilisé pour le dosage.

#### - *Les carbonates et l'anhydride carbonique*

- \* Prélever un échantillon de 0,5g de sol ;
- \* Placer 0,5g de carbonate de calcium pur ( $CaCO_3$ ) dans un flacon de calcimètre et le remplir avec de l'eau distillée ;
- \* Ajouter dans un tube de calcimètre de l'acide chlorhydrique ( $HCl$ ) jusqu'au trait de graduation ;
- \* Immerger le tube dans le flacon et le fermer ;
- \* Placer le flacon dans le calcimètre ;
- \* Agiter le flacon ;
- \* Noter le volume de gaz  $V_0$  indiqué sur le tube du calcimètre ;
- \* Introduire l'échantillon de sol dans un autre flacon et répéter les mêmes étapes ;
- \* Noter le volume  $V_1$  indiqué sur le tube du calcimètre.

### 3. Expression des résultats

#### - Pourcentage en sulfates

Le pourcentage en sulfates est, par convention, calculé selon le mode opératoire du LCTP comme suit :

$$(\%) CaSO_4, 2H_2O = \frac{(a-b) \times 184,23}{PE}$$

Avec

$(\%)CaSO_4, H_2O$  : pourcentage en sulfates ;

$a$  : Masse creuset + sol calciné ;

$b$  : Masse du creuset vide ;

$PE$  : Masse nette de l'échantillon.

#### - Pourcentage en chlorure

Le pourcentage en chlorure est, par convention, calculé selon le mode opératoire du LCTP comme suit :

$$(\%) NaCl = V \times 0,585$$

Avec :

$(\%) NaCl$  : pourcentage en chlorure ;

$V$  : Volume des nitrates d'argent utilisé pour le titrage.

#### - Pourcentages en carbonates et en anhydride carbonique

Les pourcentages en carbonate et en anhydride carbonique sont, par convention, calculés selon le mode opératoire du LCTP comme suit :

$$(\%) CaCO_3 = \frac{V_1}{V_0} \times 100 ;$$

$$(\%) CO_2 = 0,44 \times \frac{V_1}{V_0} \times 100$$

Avec :

$CaCO_3$  : pourcentage en carbonate ;

$CO_2$  : pourcentages en anhydride carbonique ;

$V_0$  : volume du carbonate de calcium dans le tube ;

$V_1$  : volume de l'échantillon de sol dans le tube.

## 2.3 Traitement du sol

Afin d'évaluer l'effet de l'utilisation de la poudrette et des granulats de pneus usés sur le traitement des sols, une série de tests a été réalisée sur des sols traités avec différents pourcentages de ces matériaux, variant de 1% à 8%. Ces tests comprenaient des essais Proctor, des essais œdométriques et des déterminations de la teneur en matières organiques. Ensuite, une série de tests a été effectuée en utilisant différents pourcentages de chaux, un agent traditionnellement utilisé pour le traitement des sols, afin de comparer les résultats obtenus avec ceux des sols traités à la poudrette et aux granulats de pneus.

### 2.3.1 Essai Proctor modifié

Dans notre étude, nous nous concentrons sur l'évaluation des propriétés de compactage du sol dans le contexte d'un chantier routier. Ce type d'ouvrage exige une résistance adéquate du sol pour supporter les charges importantes induites par le trafic routier.

Le test Proctor modifié est choisi pour sa capacité à simuler des conditions de compactage plus proches de celles rencontrées sur le terrain offrant ainsi une meilleure représentativité des performances du sol sous contrainte.

De plus, l'utilisation du moule CBR est pertinente en raison de sa compatibilité avec la granulométrie spécifique du sol étudié.

#### 2.3.1.1 But de l'essai

L'essai Proctor modifié permet de déterminer, en compactant le matériau, la teneur en eau optimale.

#### 2.3.1.2 Matériel utilisé

- Moule CBR (figure 2.5) ;



FIGURE 2.5 – Moule CBR

- Balance de marque OHAUS (figure 2.6);



FIGURE 2.6 – Balance

- Dame Proctor automatique de marque MATEST (figure 2.7);



FIGURE 2.7 – Dame Proctor automatique

- Étuve de marque BINDER (figure 2.8).



FIGURE 2.8 – Étuve

### 2.3.1.3 Test sur le sol brut

#### 1. Préparation des échantillons

- Sécher le sol dans une étuve à 105°C pendant 48h afin de bien déshydrater le sol ;
- A sa sortie de l'étuve, le sol est tamisé à 20mm, la figure 2.9 illustre une photo le sol à sa sortie de l'étuve avant tamisage ;



FIGURE 2.9 – Échantillon de sol après séchage à l'étuve avant tamisage

- Diviser le sol en 5 parts égales de 6kg chacune ;
- Humidifier les échantillons à une teneur en eau variant généralement entre 6% et 14%. Pour certains tests, la teneur en eau peut aller jusqu'à 18%.

## 2. Exécution de l'essai

- Peser le moule et la base ;
- Placer le disque d'espacement au fond du moule CBR et la rehausse ;
- Placer un papier filtre au fond du moule sur le disque d'espacement afin de faciliter le démoulage ;
- Introduire le moule CBR dans le compacteur automatique ;
- Introduire une quantité de sol dans le moule de manière à atteindre le tiers de la hauteur du moule ;
- Démarrer le compactage automatique : 56 coups par couche comprenant huit séquences de sept coups, six approximativement tangents à la périphérie et le 7e au centre ;
- Après compactage de la dernière couche, retirer le moule du compacteur automatique, retirer la rehausse ;
- Arasé l'excédent avec une règle à raser en partant du centre vers la périphérie du moule, la figure 2.10 illustre le moule Proctor arasé prêt à être pesé ;



FIGURE 2.10 – Moule arasé

- Retirer le disque d'espacement puis peser le moule avec le matériau et la base du moule ;
- Extraire le matériau du moule puis prélever un échantillon représentatif ;
- Peser l'échantillon extrait puis le placer dans l'étuve pendant 24h à 105°C afin de déterminer sa teneur en eau (figure 2.11) ;



FIGURE 2.11 – Échantillons de sol étuvés pour déterminer la teneur en eau

- A sa sortie de l'étuve, peser l'échantillon et faire les calculs ;
- Ces étapes sont répétées sur chacune des cinq parts humidifiées.

La figure 2.12 résume les étapes d'exécution de l'essai Proctor [43] :

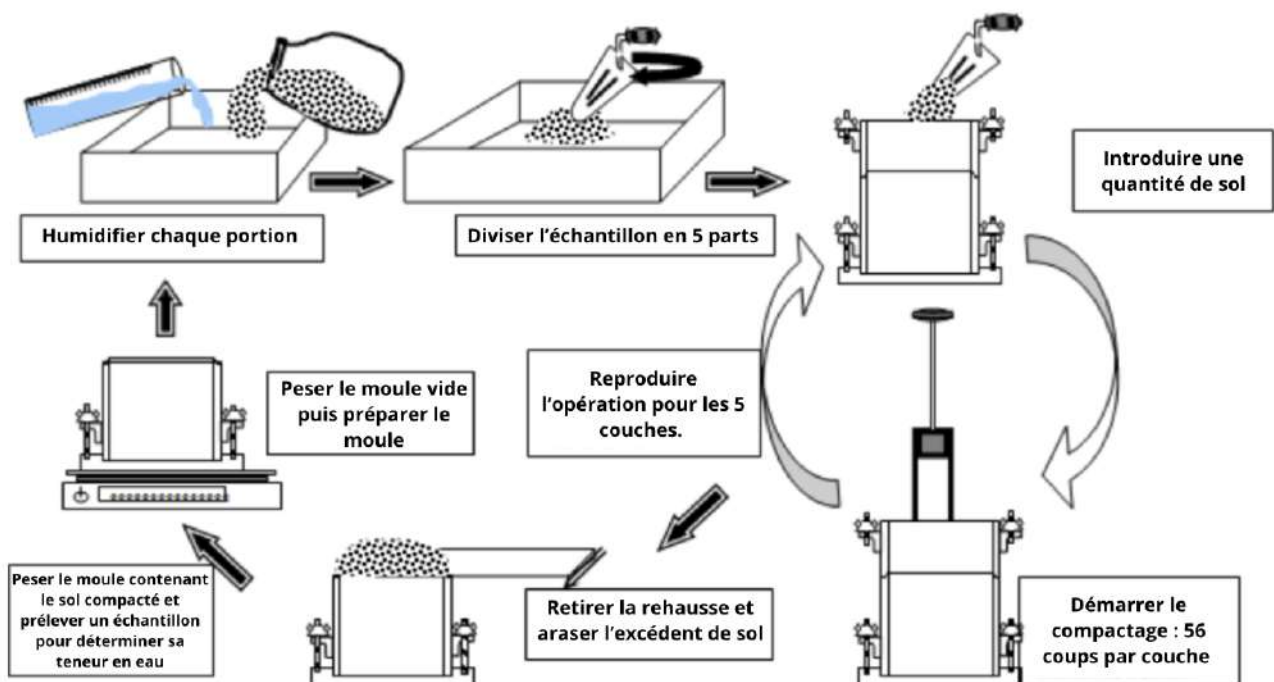


FIGURE 2.12 – Procédure de l'essai Proctor

#### 2.3.1.4 Test sur le sol traité

Pour l'ajout de poudrette de pneus, de granulats de pneus, ou de la chaux, suivre les mêmes étapes mentionnées précédemment jusqu'à l'étape d'humidification du matériau. À ce stade, on doit :

- Incorporer les différents pourcentages de poudrette de pneus, de granulats de pneus, et de chaux dans chacune des cinq parties du matériau ;



- Mélanger soigneusement pour assurer une homogénéisation complète du mélange ;
- Procéder à l'humidification du mélange ;
- Commencer l'exécution de l'essai selon les protocoles standard.

Les différents pourcentages ainsi que les poids correspondants sont indiqués dans le tableau 2.3.

TABLE 2.3 – Poids à ajouter correspondant aux différents pourcentages à incorporer

Pourcentage d'ajout (%)	Masse à ajouter (gr)
1	60
2	120
4	240
8	480

### 2.3.1.5 Expression des résultats

Pour chaque moule, on doit déterminer :

- $La\ masse\ du\ sol\ humide(gr) = masse\ totale\ humide + masse\ du\ moule$
- $Masse\ volumique\ humide\ (t/m^3) = \frac{masse\ du\ sol\ humide}{100 + teneur\ en\ eau} \times \frac{1}{volume\ du\ moule}$  ;
- $Masse\ d'eau(gr) = masse(sol\ humide + tare) - masse(sol\ sec + tare)$  ;
- $Masse\ du\ sol\ sec(gr) = masse(sol\ sec + tare) - masse\ de\ la\ tare$  ;
- $La\ teneur\ en\ eau\ W = \frac{masse\ d'eau}{masse\ du\ sol\ sec}$  ;
- $La\ masse\ du\ sol\ sec\ contenu\ dans\ le\ moule(gr) = \frac{masse\ du\ sol\ humide}{100 + W} \times 100$  ;
- $La\ masse\ volumique\ du\ matériau\ sec(t/m^3) = \frac{masse\ du\ sol\ humide}{100 + W} \times \frac{1}{volume\ du\ moule}$  .

La détermination de la teneur en eau optimale  $W_{opt}$  ainsi que la densité sèche maximale  $\gamma d_{max}$  se font avec le logiciel **Soltest**.

### 2.3.2 Essai œdométrique

Dans notre étude, nous avons mené des essais œdométriques pour évaluer comment le sol se déforme sous des charges verticales. Ces essais sont cruciaux pour prédire le tassement du sol en particulier dans des projets comme la construction de routes.

En utilisant un œdomètre, nous pouvons reproduire les contraintes axiales réelles rencontrées sur le terrain ce qui nous donne des informations précieuses sur la compressibilité du sol.

### 2.3.2.1 But de l'essai

L'objectif de cet essai est d'évaluer les propriétés de compressibilité d'un sol en vue de prédire son tassement sous l'effet des charges appliquées. Cette démarche vise à comprendre comment le sol se déforme en réaction aux contraintes exercées.

A partir de cet essai, on s'intéresse aux paramètres suivants :

- Les indices de vides ;
- L'indice de compression ( $C_c$ ) ;
- L'indice de gonflement ( $C_s$ ) ;
- La compressibilité.

### 2.3.2.2 Matériel utilisé

- Trousse coupante (figure 2.13) ;



FIGURE 2.13 – Trousse coupante

- Plaques poreuses (figure 2.14) ;



FIGURE 2.14 – Plaques poreuses supérieures et inférieures

- Cellules œdométriques (figure 2.15);



FIGURE 2.15 – Cellule œdométrique

- Œdomètre (figure 2.16);



FIGURE 2.16 – Œdomètre ou cadre de chargement

- Poids (figure 2.17) ;



FIGURE 2.17 – Poids des contraintes de chargement

- Balance de marque OAHUS (figure 2.18) ;



FIGURE 2.18 – Balance

### 2.3.2.3 Préparation des échantillons

- Peser la quantité d'eau à ajouter à l'échantillon selon les calculs suivants :

$$m(eau) = \gamma d_{max} \times m(sol) \quad (2.2)$$

Où :

$m(eau)$  : masse de l'eau à ajouter

$\gamma d_{max}$  : densité sèche ou masse volumique sèche obtenue à partir de l'essai Proctor

$m(sol)$  : masse du sol séché prélevé

- Humidifier le sol ;
- Peser le sol à introduire dans la trousse coupante selon les calculs suivants :

$$m(sol\ humide) = \gamma h \times V \quad (2.3)$$

Où :

$\gamma h$  : Densité humide ou masse volumique humide avec  $\gamma h = \gamma d_{max} \times (W_{opt} + 100)$

$W_{opt}$  : Teneur en eau optimale obtenue à partir de l'essai Proctor ;

$V$  : Volume de la trousse coupante, avec  $V = 73,150ml$

- Remplir la trousse coupante tout en veillant à bien compacter l'échantillon à l'intérieur (figure 2.19) ;



FIGURE 2.19 – Trousse coupante remplie et arasée

- Araser les deux faces supérieure et inférieure de la trousse, les extrémités doivent être planes et arasées ;
- Aligner la plaque poreuse inférieure, le papier filtre, la trousse coupante et la plaque poreuse supérieure à l'intérieur de la cellule œdométrique (figure 2.20) ;



FIGURE 2.20 – Cellule œdométrique avec la trousse coupante

- Placer la cellule sur le cadre de chargement (figure 2.21) ;



FIGURE 2.21 – Cellule œdométrique placée sur le cadre de chargement et mise en contact avec le comparateur.

- Mettre à niveau le bras de levier ;
- Mettre en contact le comparateur avec le haut de la cellule ;
- Saturer la cellule avec de l'eau.

#### 2.3.2.4 Exécution de l'essai

- Lancer le logiciel « *CLISP STUDIO* »
- Introduire les conditions initiales : hauteur et diamètre de la trousse coupante respectivement 20mm et 70mm ainsi que la teneur en eau de l'échantillon (obtenue par le Proctor) et le poids de l'échantillon ;

- 
- Choisir la séquence des contraintes à appliquer (les paliers de chargement et de déchargement) :
    - \* 6 KPa correspondant à 200 g ;
    - \* 14 KPa correspondant à 500 g ;
    - \* 27 KPa correspondant à 1 Kg (ajout de 500g) ;
    - \* 53 KPa correspondant à 2 Kg (ajout de 1 Kg) ;
    - \* 131 KPa correspondant à 5 Kg (ajout de 3 Kg) ;
    - \* 261 KPa correspondant à 10 Kg (ajout de 5 Kg) ;
    - \* 520 KPa correspondant à 20 Kg (ajout de 10 Kg) ;
    - \* 261 KPa correspondant à 10 Kg (retrait de 10 Kg) ;
    - \* 131 KPa correspondant à 5 Kg (retrait de 5 Kg) ;
    - \* 6 KPa correspondant à 200 g (retrait de 5 Kg et ajout de 200 g).
  
  - Ajouter le premier poids sur le plateau de chargement de manière à faire croître graduellement la pression appliquée à l'échantillon ;
  - Changer de paliers c'est-à-dire augmenter la contrainte verticale lorsqu'on observe un gonflement de l'échantillon ou bien lorsqu'on observe aucun changement dans la hauteur, ce changement est inférieur ou égal à 5 mm pendant 4 heures ;
  - A la fin de l'essai (approximativement 15 jours après le début de l'essai), retirer l'excédent d'eau dans la cellule ;
  - Retirer puis démonter la cellule ;
  - Peser l'échantillon ;
  - Placer à l'étuve l'échantillon pendant 4h à 107°C, peser puis replacer dans l'étuve pendant une heure ;
  - Peser de nouveau, si la différence entre les deux pesées successives est inférieure à 0,1%, ce qui indique que l'échantillon a atteint une masse constante, nous déterminons alors la teneur en eau finale.

### 2.3.3 Détermination de la teneur en matière organique

Cet essai est réalisé conformément à la norme XP P 94-047 et permet de déterminer la teneur en matières organiques dans la fraction granulométrique inférieure ou égale à 2 mm du sol. Les étapes d'exécution de cet essai ont été détaillées précédemment dans la section relative à l'identification du sol.

#### 2.3.3.1 Expression des résultats

La teneur en matière organique de la fraction granulométrique inférieure à 2 mm est calculée comme la moyenne arithmétique des  $n$  échantillons d'essai et est arrondie au nombre entier.

Dans notre cas, n'étant basé que sur un seul échantillon d'essai, la teneur en matière organique est déterminée directement à partir de cette prise d'essai.

$$C_{MOC} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0}$$

Avec :

$C_{MOC}$  : teneur en matière organique par calcination exprimée en pourcentage (%);

$m_0$  : masse creuset vide;

$m_1$  : masse creuset + sol sec;

$m_2$  : masse creuset + sol calciné.



# Chapitre 3

## Résultats et discussions

### 3.1 Résultats des essais d'identification du sol

Les essais réalisés sur l'échantillon de sol ont donné les résultats regroupés dans les tableaux 3.1 et 3.2 :

TABLE 3.1 – Résultats des essais d'identification du sol

Essais	Résultats
Analyse granulométrique	$D_{max} = 50 \text{ mm}$ Taux des éléments $< 2\text{mm} = 66,37\%$ Taux des fines ( $< 80 \mu\text{m}$ ) = 66,37%
Limites d'Atterberg	$w_L = 28\%$ $w_P = 17\%$ $I_P = 11\%$
Essai Proctor	$\gamma d_{max}(t/m^3) = 2,01$ $W_{opt}(\%) = 8,14$
Essai CBR	$I_{CBR} = 35\%$
Équivalent de sable	$ES = 35\%$
Valeur de bleu de méthylène	$VBS = 0,49\text{g pour }100\text{g de matériau sec}$
Teneur en matière organique	3%

TABLE 3.2 – Résultats des essais d'identification du sol pour l'analyse chimique sommaire

Analyse chimique sommaire	
Sulfates ( $CaSO_4, H_2O$ )	Traces
Chlorures ( $NaCl$ )	0,35%
Carbonates ( $CaCO_3$ )	43,10%
Anhydride carbonique ( $CO_2$ )	18,97%

Les analyses d'identification du sol ont révélé un matériau de sous-classe  $F_{11}$ , caractérisé comme un sol faiblement organique. Son comportement géotechnique est assimilable à la sous-classe  $B_5$ , correspondant à des sables et graves très silteux.

En effet, le matériau présente un taux de matières organiques qui permet de le classer comme un sol faiblement organique avec des caractéristiques mécaniques insuffisantes ( $CBR < 40\%$ ). De plus, sa mise en œuvre est difficile et nécessite généralement un traitement avec un réactif approprié, tel que la chaux.

## 3.2 Influence de l'ajout de la chaux

### 3.2.1 Influence de l'ajout sur les paramètres de Proctor

La figure 3.1 regroupe les courbes Proctor des différents essais Proctor effectués sur le sol brut et sur le sol à différents pourcentages de chaux variant de 1 à 8%.

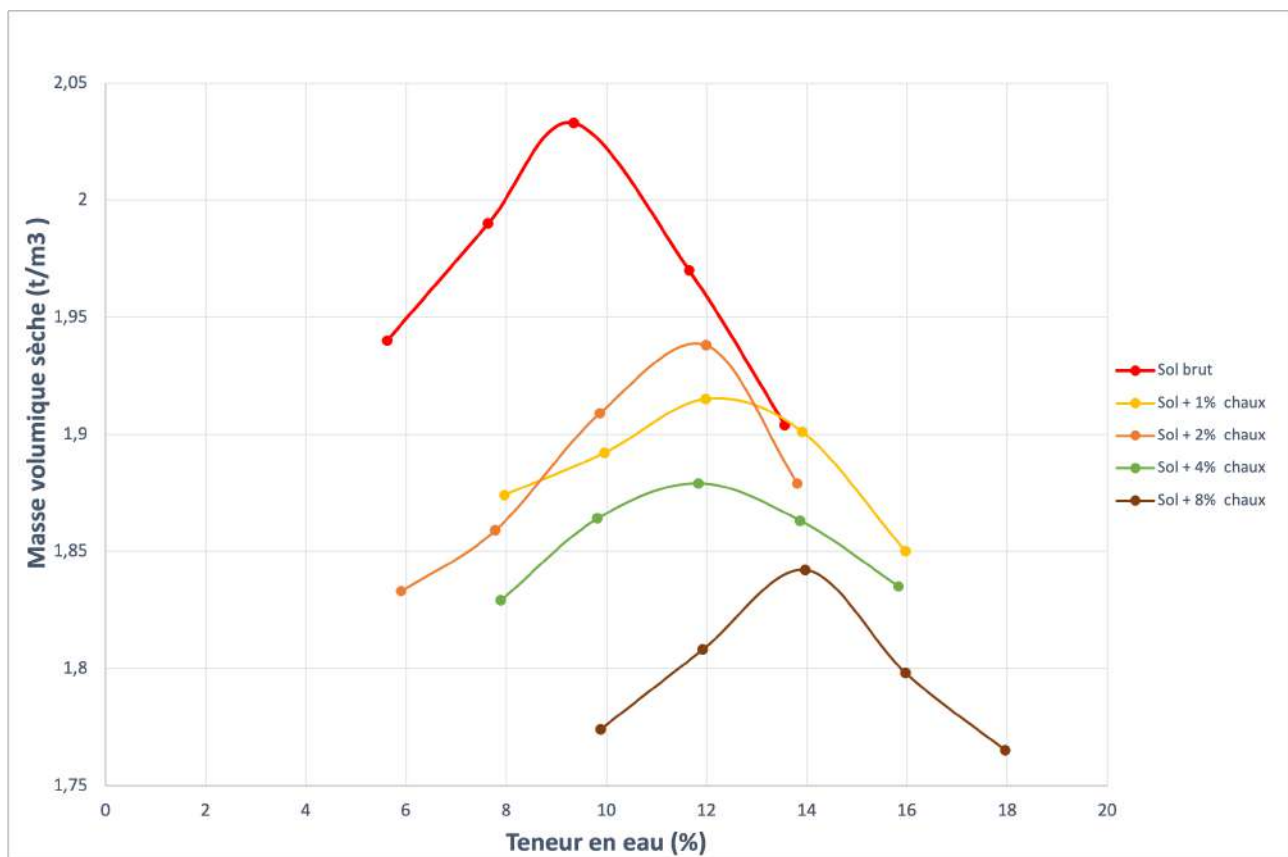


FIGURE 3.1 – Courbes Proctor - Variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau lors de l'ajout de la chaux.

D'après l'analyse des différentes courbes et en les comparant avec la courbe Proctor du sol brut, il est clair que l'ajout de la chaux influence significativement les paramètres Proctor du sol. Les courbes des échantillons traités à la chaux se situent en dessous et à droite de la courbe du sol non traité. Cela indique une diminution de la masse volumique sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimale.

Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés dans diverses études sur les essais de compactage de sols stabilisés par la chaux. Ainsi, FIROOZI [44] a observé que l'ajout de la chaux à des sols augmente la teneur en eau optimale et réduit la densité sèche maximale. De même, F. SARIOSSEIRI et B. MUHUNTHAN [45] ont montré que l'introduction de chaux dans des sols de l'État de Washington entraîne une diminution de la densité sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimale.

On peut expliquer ce comportement comme suit :

- L'ajout de la chaux modifie les propriétés physiques du sol par des réactions chimiques avec les composants argileux, provoquant des échanges cationiques et la floculation. L'agrégation des particules de sol, qui en résulte, modifie ainsi la granulométrie et augmente l'espace occupé par les particules. Les études de BASMA et TUNCER [46], et RAO et SHIVANANDA [47], ont montré des comportements similaires.
- La densité de la chaux, étant inférieure à celle du sol, réduit la densité globale du mélange.
- Les réactions pouzzolaniques et de cimentation entre les particules d'argile et de la chaux augmentent la teneur en eau optimale du sol en renforçant son affinité pour l'eau.

## 3.2.2 Influence de l'ajout sur les paramètres œdométrique

### 3.2.2.1 Influence sur la courbe œdométrique

La figure 3.2 regroupe les courbes œdométriques du sol traité avec différents pourcentage de chaux et montre la variation des indices de vides en fonction des contraintes en  $\sigma kPa$ .

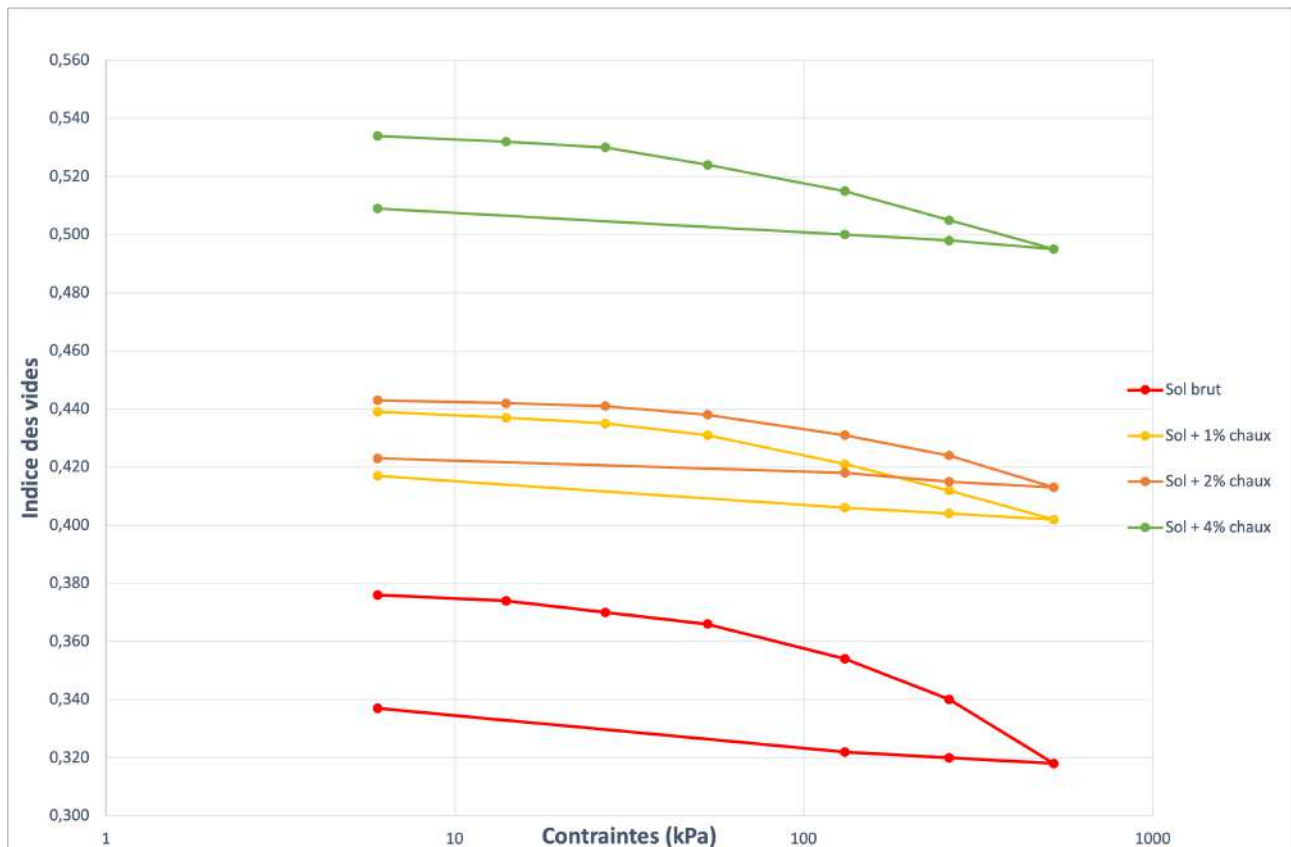


FIGURE 3.2 – Courbes œdométrique - variation des indices de vide en fonction des contraintes à différents pourcentages de chaux.

On observe l'existence de deux phases distinctes dans les résultats des essais œdométriques : la phase de chargement, correspondant à la compression de l'échantillon qui se traduit par une diminution de l'indice des vides et la phase de déchargement, correspondant au gonflement de l'échantillon et qui entraîne une augmentation de l'indice des vides.

On remarque aussi que les courbes des échantillons traités avec la chaux se situent au-dessus de celle du sol non traité. Cela indique une augmentation des indices des vides aussi bien à l'état initial qu'à l'état final.

L'analyse des courbes œdométriques montre que le sol brut présente l'indice des vides le plus faible (0,337) en comparaison avec les échantillons de sol traités à la chaux. Les échantillons traités à 1% et 2% de chaux ont enregistré des indices de vides similaires et qui sont de l'ordre de 0,44. Quant à l'échantillon de sol traité avec 4% de chaux, on remarque qu'il a présenté l'indice des vides le plus élevé (0,51).

### 3.2.2.2 Influence sur les indices de compression et de gonflement

La figure 3.3 illustre la variation des indices de compression et de gonflement en fonction du pourcentage de la chaux ajoutée.

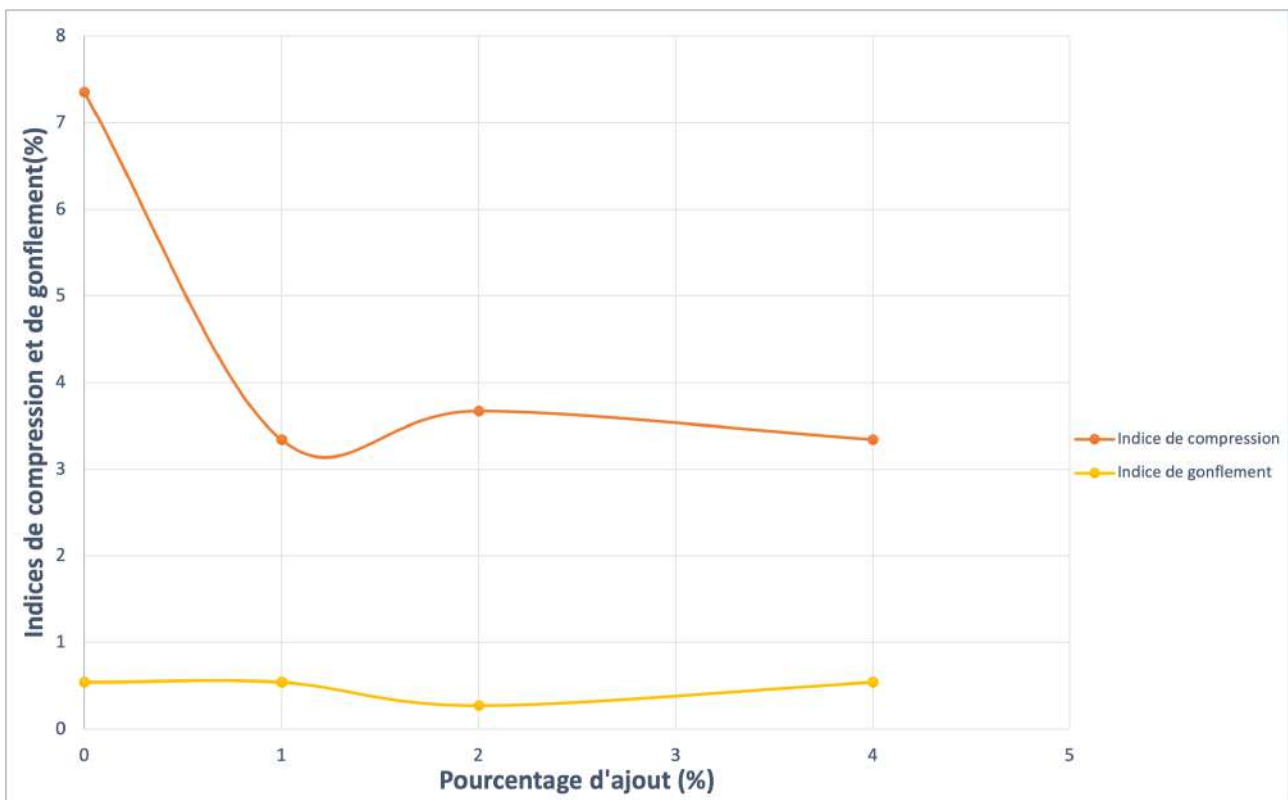


FIGURE 3.3 – Variation des indices de compression et de gonflement en fonction du pourcentage de la chaux ajoutée.

D'après la figure 3.3, le sol brut a présenté un indice de compression de 7,35%. L'ajout de 1% de chaux a réduit sensiblement cet indice jusqu'à atteindre 3,34%. Cette réduction de l'indice de compression peut être expliquée par la formation de liaisons entre les particules de sol et la chaux réduisant ainsi la surface spécifique du sol et sa capacité à se déformer sous charge.

Cependant, lors de l'ajout de 2 et 4% de la chaux, on remarque que l'indice de compression du sol demeure stable. On peut conclure que l'effet significatif de la chaux sur le traitement du sol afin de réduire sa compressibilité se limite à 1%.

L'analyse de la courbe des indices de gonflement révèle quant à elle une stabilisation de l'indice de gonflement lors de l'ajout de la chaux comparé à l'indice de gonflement du sol brut.

Cette stabilisation s'expliquerait par la nature du sol qui est lui-même non gonflant à cause de sa structure et sa composition qui limitent sa capacité d'absorption d'eau et donc sa dilation. Par conséquent, l'influence de la chaux sur son potentiel de gonflement est minimale.

### 3.2.2.3 Influence sur la compressibilité

La figure 3.4 présente les courbes de la variation de la compressibilité lors du chargement en fonction des contraintes effectives pour le sol brut et pour des sols additionnés de trois pourcentages de chaux : 1%, 2%, et 4%.

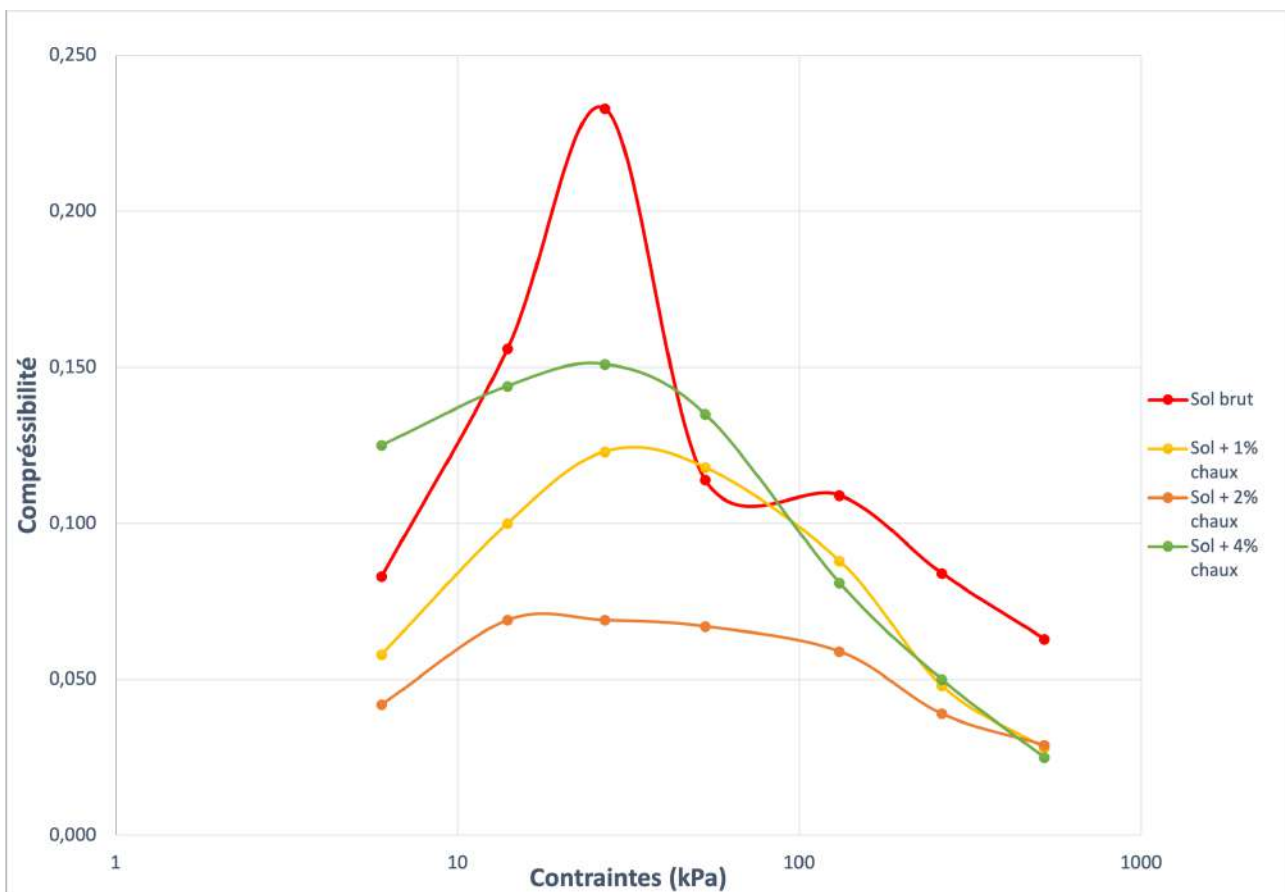


FIGURE 3.4 – Variation de la compressibilité en fonction des contraintes effectives à différents pourcentages de chaux

Les courbes de compressibilité des différents sols (sol brut et sols traités) présentent la même allure. Une augmentation progressive de la compressibilité avec l'accroissement des contraintes jusqu'à atteindre un maximum à 40 kPa, puis une diminution. Effectivement, l'augmentation de la contrainte favorise la réorganisation et l'arrangement des particules de sol et donc son compactage (maximum de compressibilité). Une fois ce maximum est atteint l'augmentation de la contrainte n'a aucun effet sur les particules de sol qui sont déjà entassées.

L'étude de l'effet de la chaux sur la compressibilité des sols, quant à elle, révèle une diminution de la compressibilité du sol après ajout de la chaux. Le sol brut a enregistré une compressibilité de 23%. Cette proportion a été réduite à 12% après ajout de 1% de chaux et puis à 7% après ajout de 2% de chaux. L'ajout de 4% de chaux accroît la compressibilité de nouveau. On peut dire que le traitement du sol à la chaux enregistre un optimum qui est 2% de chaux, dans notre sol.

En conclusion, sous l'effet de contraintes, ces sols traités montrent une capacité à réduire leur compressibilité, illustrant l'efficacité de la chaux en tant qu'agent stabilisateur dans des conditions de contraintes élevées.

### 3.3 Influence de l'ajout des granulats de pneus usagés

#### 3.3.1 Influence de l'ajout sur les paramètres de Proctor

La figure 3.5 regroupe les courbes Proctor des différents essais Proctor effectués sur le sol brut et sur le sol avec différents pourcentages de granulats de pneus usés.

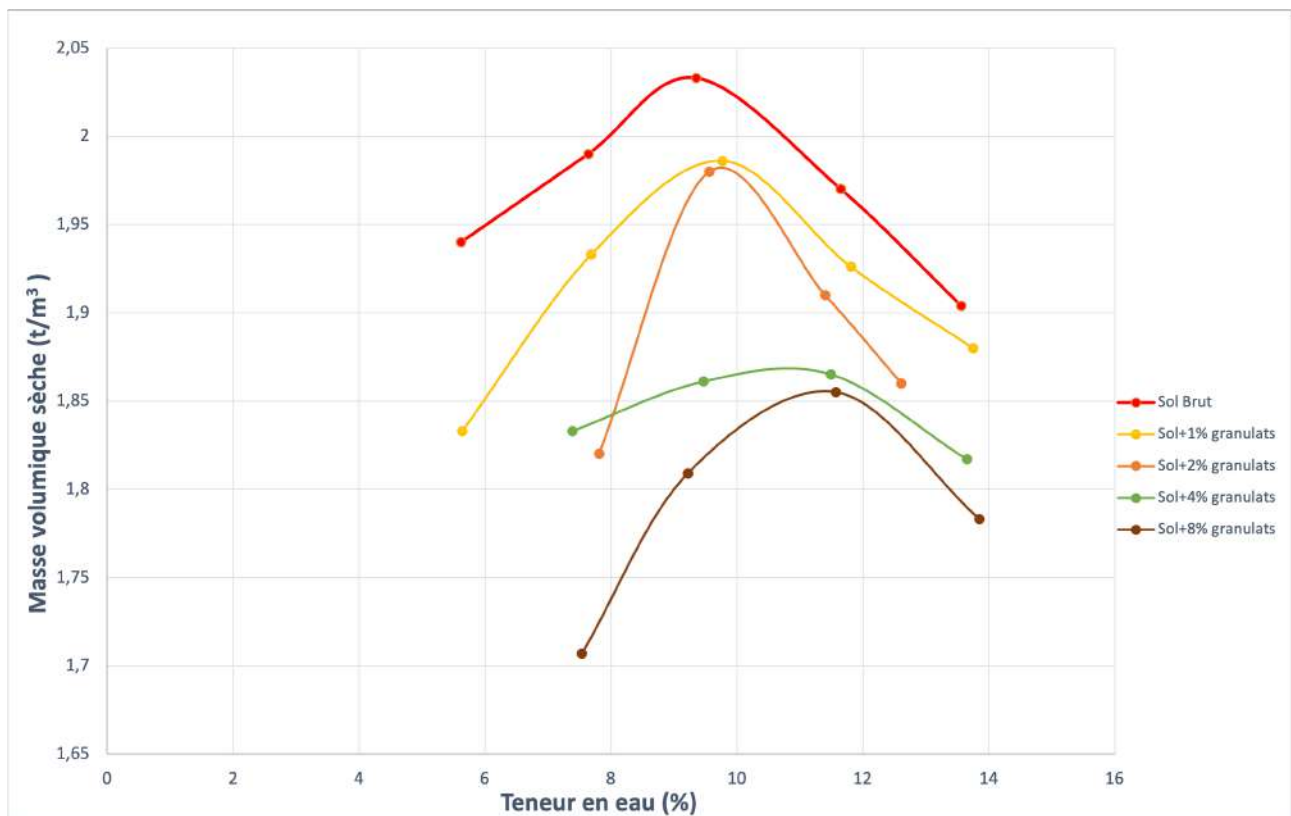


FIGURE 3.5 – Courbes Proctor - Variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau lors de l'ajout des granulats de pneu.

L'analyse des différentes courbes, comparées à celle du sol brut selon l'essai Proctor, montre clairement que l'ajout de granulats de pneus usés modifie de manière significative les paramètres Proctor du sol. On remarque qu'il y a une diminution de la masse volumique sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimale.

Il est observé aussi que les courbes correspondant à de faibles pourcentages d'ajout se rapprochent davantage de la courbe Proctor, tandis que celles associées à des pourcentages plus

élevés d'ajout s'en éloignent. En d'autres termes, à mesure que le pourcentage d'ajout augmente, la teneur en eau nécessaire pour atteindre l'optimum de compactage selon la méthode Proctor augmente également et les propriétés du sol sont ainsi modifiées de manière plus significative. La masse volumique sèche enregistrée a été réduite de  $2,033 \text{ t/m}^3$  (pour le sol brut) à  $1,855 \text{ t/m}^3$  après ajout de 8% de granulats

La diminution de la masse volumique sèche du sol peut s'expliquer par l'incorporation de granulats de pneus dont la densité est nettement inférieure à celle du sol. Lorsque des granulats de pneus sont ajoutés, ils remplacent une partie des particules de sol plus denses ce qui réduit la densité globale du mélange sol-granulats.

### 3.3.2 Influence sur les paramètres œdométrique

#### 3.3.2.1 Influence sur la courbe œdométrique

La figure 3.6 regroupe les courbes œdométriques (ou courbes de compressibilité à l'œdomètre) et illustre la variation des indices de vides en fonction des contraintes en  $\sigma kPa$ .

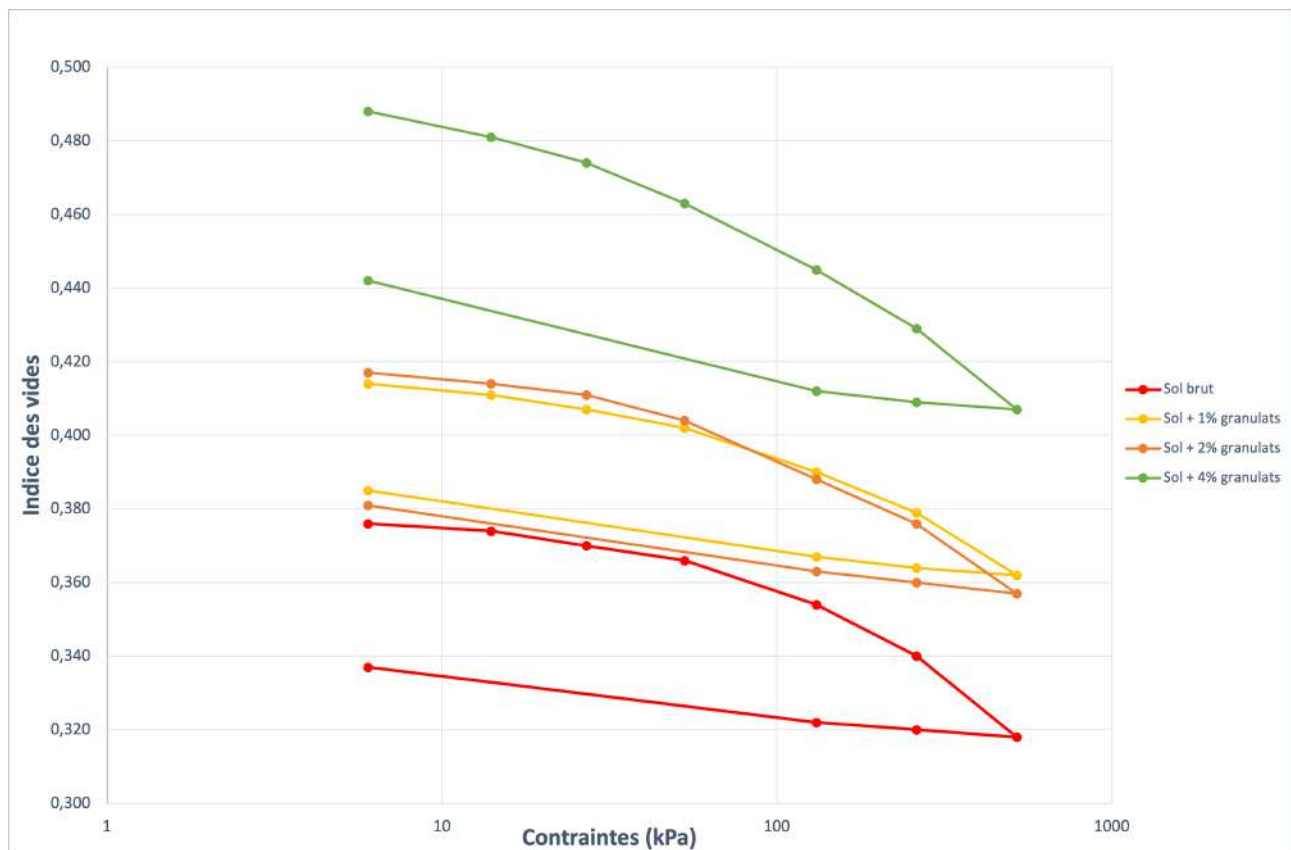


FIGURE 3.6 – Courbes œdométriques - variation des indices de vide en fonction des contraintes à différents pourcentages de granulats de pneus.

L'analyse comparative des courbes œdométriques illustre que les courbes des échantillons traités avec les granulats de pneu se situent au-dessus de celle du sol non traité. Cela indique une augmentation des indices des vides aussi bien à l'état initial qu'à l'état final.

Cette augmentation des indices des vides peut s'expliquer par la granulométrie grossière et la forme irrégulière des granulats de pneus ce qui entraîne une augmentation des espaces interstitiels et empêche ainsi un arrangement compact et efficace des particules de sol.

Les granulats de pneus, en raison de leur taille et de leur forme, ne s'imbriquent pas aussi bien que les particules de sol plus fines et plus uniformes créant ainsi plus de vides dans la structure du sol.

### 3.3.2.2 Influence sur l'indice de compression et de gonflement

La figure 3.7 illustre la variation des indices de compression et de gonflement en fonction du pourcentage de granulats ajoutés.

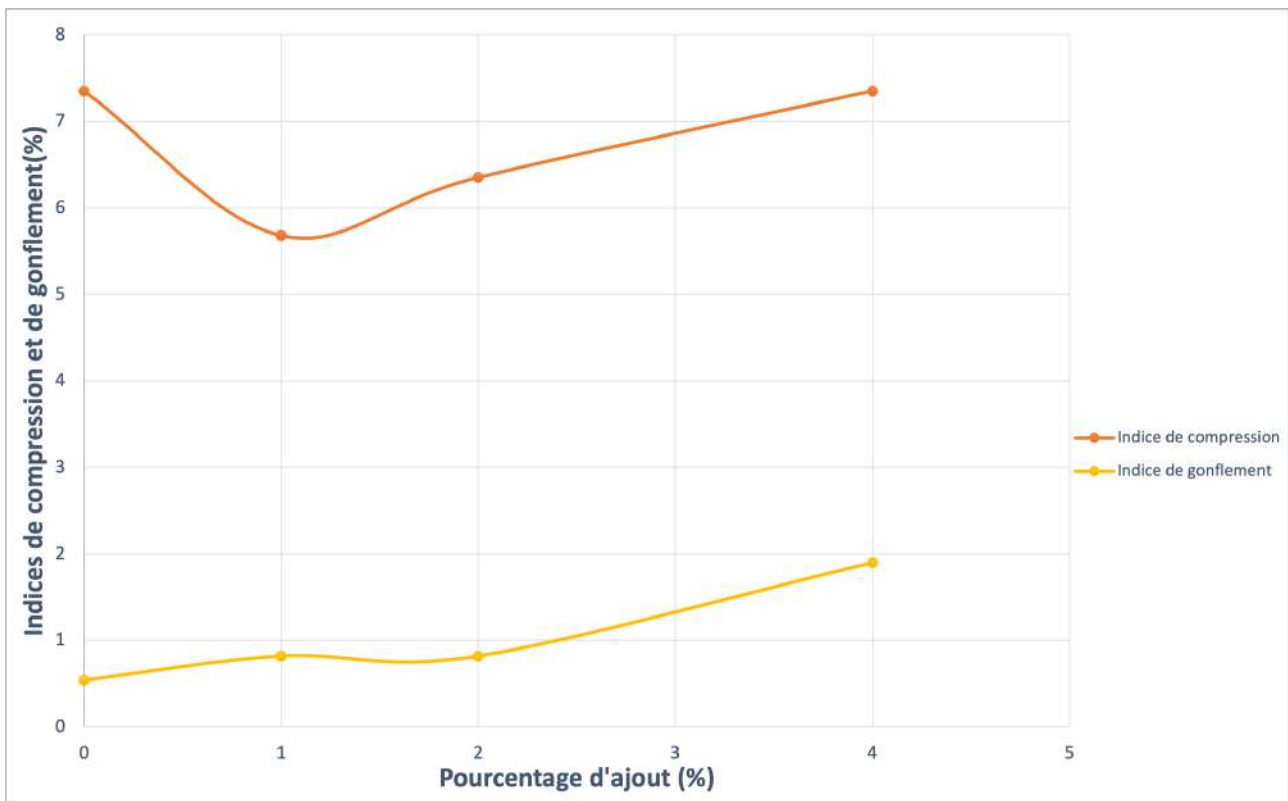


FIGURE 3.7 – Variation des indices de compression et de gonflement en fonction du pourcentage des granulats ajoutés.

L'observation de la courbe des indices de compression révèle une réduction maximale de cet indice après ajout de 1% de granulats. Le sol brut a enregistré un indice de compressibilité de 7,4% qui s'est réduit à 5,6% après ajout de 1% de granulats. Au-delà de 1%, l'indice de compressibilité accroît de nouveau.

La diminution de l'indice de compression pourrait s'expliquer par l'effet de remplissage initial. Les granulats de pneus ont la capacité de combler les vides entre les particules du sol, diminuant ainsi les frictions entre ces particules. Cette réduction des frictions facilite la compaction du sol conduisant à une diminution de l'indice de compression.

En revanche, lors de l'ajout d'un pourcentage de granulats supérieur à 1%, la structure du sol sera influencée par le comportement caoutchoutique des granulats de pneus usés qui conservent leurs excellentes propriétés élastiques.

L'analyse de la courbe des indices de gonflement révèle quant à elle une légère augmentation de l'indice de gonflement lors de l'ajout des granulats par rapport à l'indice de gonflement du sol brut.



L'augmentation des indices de gonflement pourrait s'expliquer par la perméabilité des granulats qui, en agissant comme des réservoirs d'eau, augmentent ainsi la capacité du sol à retenir l'eau.

Cependant, pour de faibles pourcentages d'ajout (1% et 2%), il y a une stabilisation de l'indice de gonflement

### 3.3.2.3 Influence sur la compressibilité

La figure 3.8 présente les courbes de la variation de la compressibilité en fonction des contraintes effectives pour le sol brut et pour des sols additionnés de trois pourcentages de granulats de pneus : 1%, 2%, et 4%.

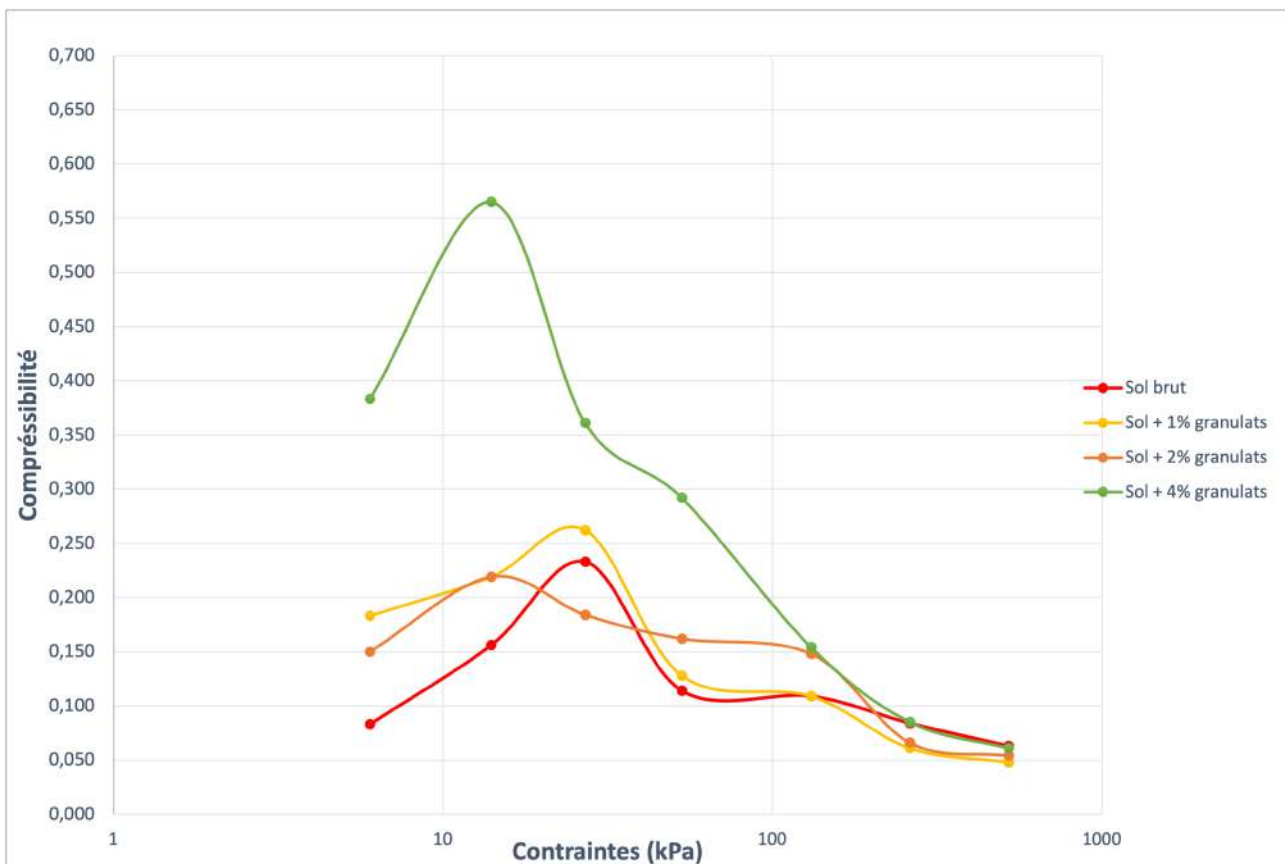


FIGURE 3.8 – Variation de la compressibilité en fonction des contraintes effectives lors de l'ajout des granulats de pneus

Les courbes de compressibilité du sol brut et des sols traités présentent la même allure. Une augmentation progressive de la compressibilité avec l'accroissement des contraintes jusqu'à atteindre un maximum puis une diminution. L'augmentation de la contrainte favorise le réarrangement des particules de sol et donc son entassement d'où un maximum de compressibilité. Une fois ce maximum atteint, l'augmentation de la contrainte n'a aucun effet sur les particules de sol qui sont déjà amassées.

Cependant, les sols traités à 2 et 4% enregistrent un maximum de compressibilité à 14 kPa de contrainte alors que le sol brut et le sol traité à 1% de granulats enregistrent un maximum de compressibilité à 27 kPa de contrainte.

Une autre caractéristique a été enregistrée. L'ajout de 4% de granulats de pneus modifie considérablement la structure interne du sol entraînant ainsi une augmentation initiale de la compressibilité.

Cependant, sous des contraintes plus élevées, les granulats contribuent à une reconfiguration rapide et plus stable de la structure du sol ce qui explique la diminution rapide de la compressibilité et sa stabilisation ultérieure.

Les granulats en grande quantité agissent non seulement comme des éléments de remplissage mais aussi, comme des points d'ancrage qui renforcent la structure du sol sous des contraintes élevées.

### 3.4 Influence de l'ajout de la poudrette de pneus usagés

#### 3.4.1 Sur les paramètres de compactage

La figure 3.9 regroupe les courbes Proctor des différents essais Proctor effectués sur le sol brut et sur le sol avec différents pourcentages de poudrette de pneus usés.

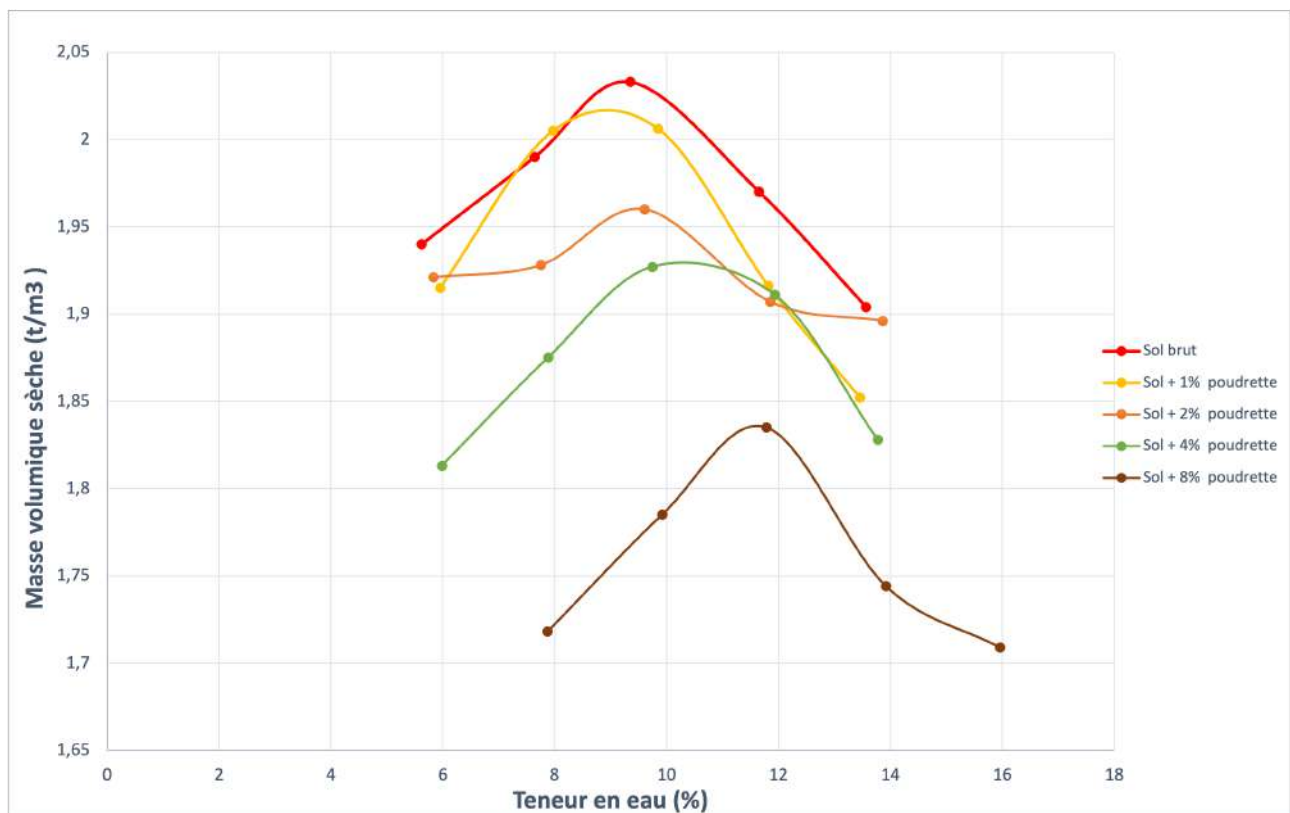


FIGURE 3.9 – Courbes Proctor - Variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau lors de l'ajout de la poudrette de pneu.

L'analyse des différentes courbes, en comparaison avec celle du sol brut selon l'essai Proctor, révèle clairement que l'ajout de poudrette de pneu modifie de manière significative les paramètres Proctor du sol.

On observe une diminution progressive de la densité sèche maximale des sols traités à la poudrette. Le minimum de masse volumique sèche,  $1,83 \text{ t/m}^3$ , a été enregistré pour le sol traité à 8% de poudrette.

### 3.4.2 Influence sur les paramètres œdométriques

#### 3.4.2.1 Influence sur la courbe œdométrique

La figure 3.10 regroupe les courbes œdométriques ou courbes de compressibilité à l'œdomètre et illustre la variation des contraintes en  $\sigma \text{ kPa}$  en fonction des indices de vides lors de l'ajout de la poudrette de pneus.

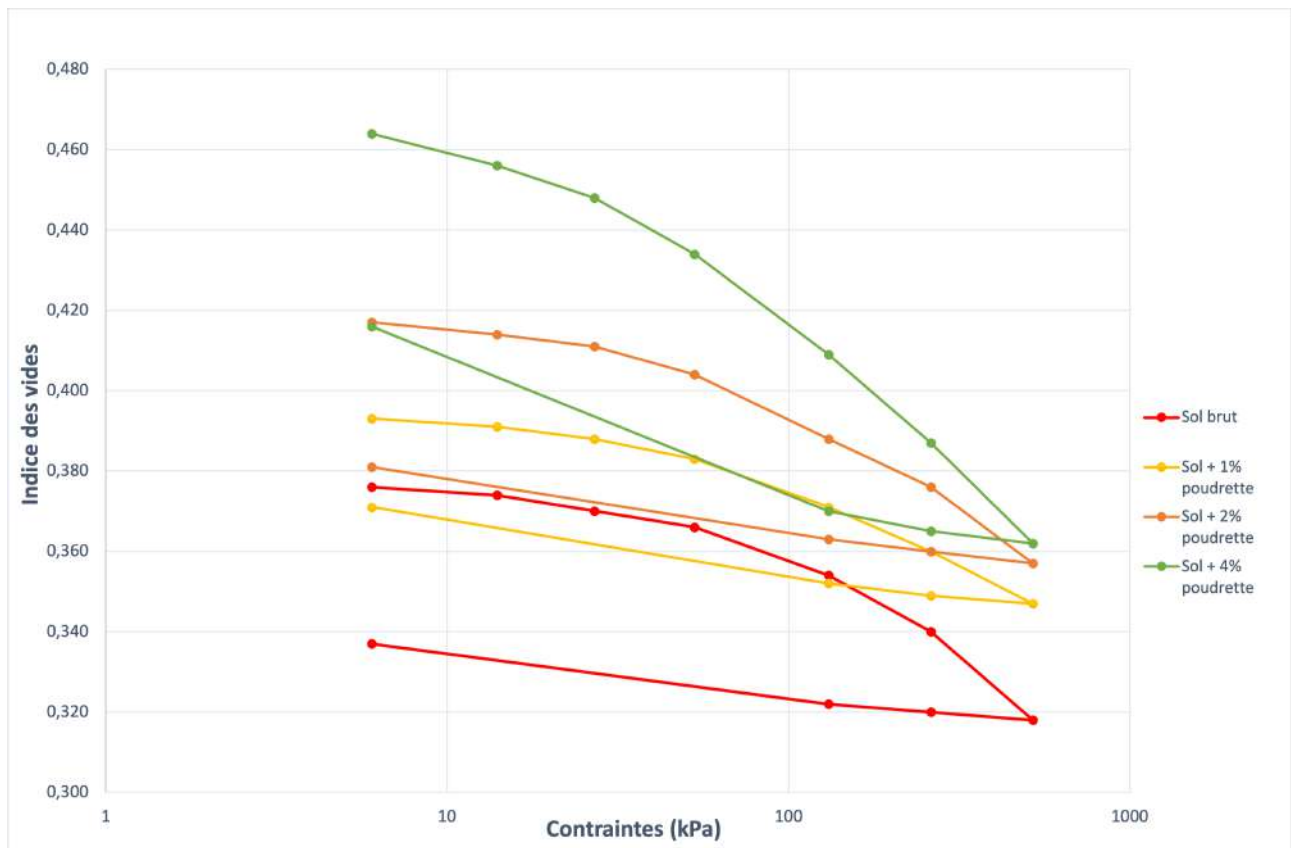


FIGURE 3.10 – Courbes œdométrique - variation des indices de vide en fonction des contraintes effectives lors de l'ajout de la poudrette de pneus.

L'analyse comparative des courbes œdométriques illustre que les courbes des échantillons traités avec la poudrette de pneus se situent au-dessus de celle du sol non traité. Cela indique une augmentation des indices des vides aussi bien à l'état initial qu'à l'état final.

#### 3.4.2.2 Influence sur les indices de compression et de gonflement

La figure 3.11 illustre la variation des indices de compression et de gonflement en fonction du pourcentage de granulats ajouté.

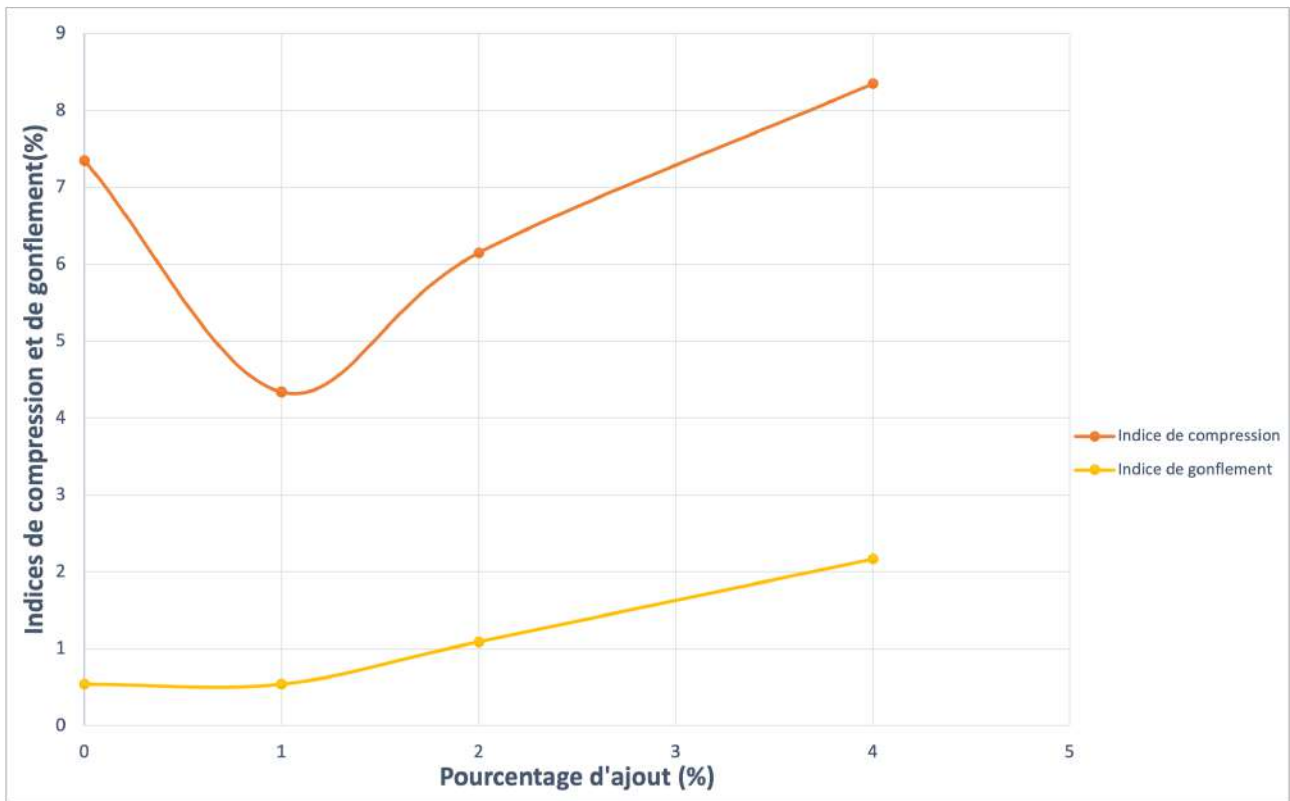


FIGURE 3.11 – Variation des indices de compression et de gonflement en fonction du pourcentage de poudre ajoutée.

L'analyse de la courbe de variation des indices de compression montre une similarité avec celle obtenue pour les sols traités aux granulats de pneus.

On note que l'indice de compression enregistre une réduction maximale après ajout de 1% de granulats. Cet indice a diminué de 7,4% (valeur enregistrée par le sol brut) à 4,4% après ajout de 1% de poudre. Au-delà de 1%, l'indice de compressibilité accroît de nouveau.

En ce qui concerne l'indice de gonflement, le sol traité à 1% de poudre présente un indice de gonflement similaire à celui du sol brut. Au-delà de 1%, l'ajout de la poudre de pneus provoque une augmentation de l'indice de gonflement. La poudre, bien que réduisant initialement la compressibilité, peut retenir plus d'eau ou créer des micro-espaces qui permettent un léger gonflement sous l'effet de la contrainte.

### 3.4.2.3 Influence sur la compressibilité

La figure 3.12 illustre la variation de la compressibilité en fonction des contraintes effectives pour des échantillons de sol brut et des sols traités avec différents pourcentages de poudre de pneus (1%, 2%, et 4%).

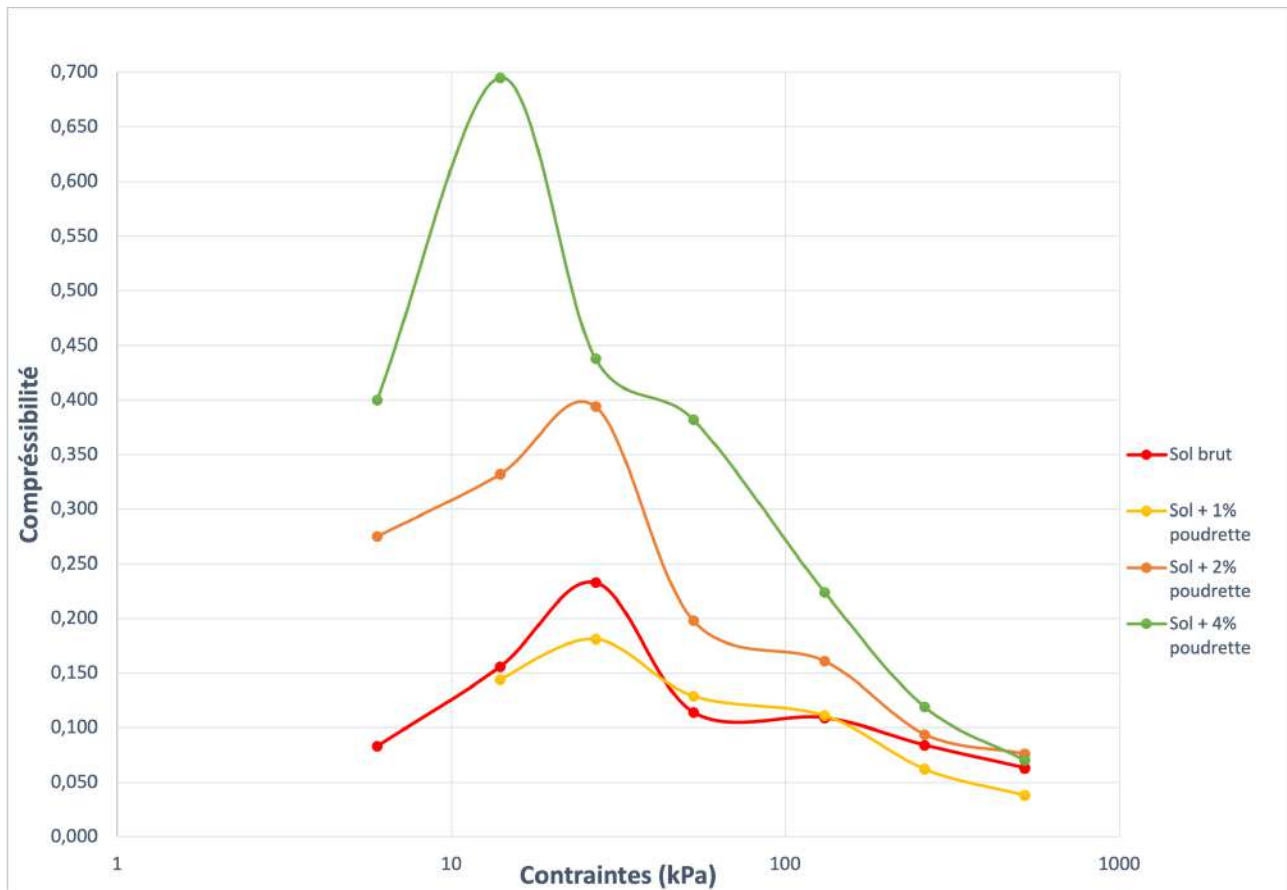


FIGURE 3.12 – Variation de la compressibilité en fonction des contraintes effectives lors de l'ajout de la poudre de pneus

Les courbes de compressibilité du sol brut et des sols traités présentent la même allure. Une augmentation progressive de la compressibilité avec l'accroissement des contraintes jusqu'à atteindre un maximum puis une diminution.

Le sol traité à 4% de poudre a enregistré un maximum de compressibilité à 18 kPa de contrainte alors que le sol brut et les sols traités à 1 et 2% de poudre ont enregistré un maximum de compressibilité à 40 kPa de contrainte.

Tout comme l'ajout de granulats de pneus, l'ajout de la poudre a amélioré nettement les caractéristiques du sol en termes de compression.

### 3.5 Influence du traitement sur la teneur en matière organique

La figure 3.13 illustre la variation de la teneur en matière organique de la fraction granulométrique inférieure ou égale à 2mm du sol en fonction du pourcentage d'ajout de poudre, de granulats et de chaux.

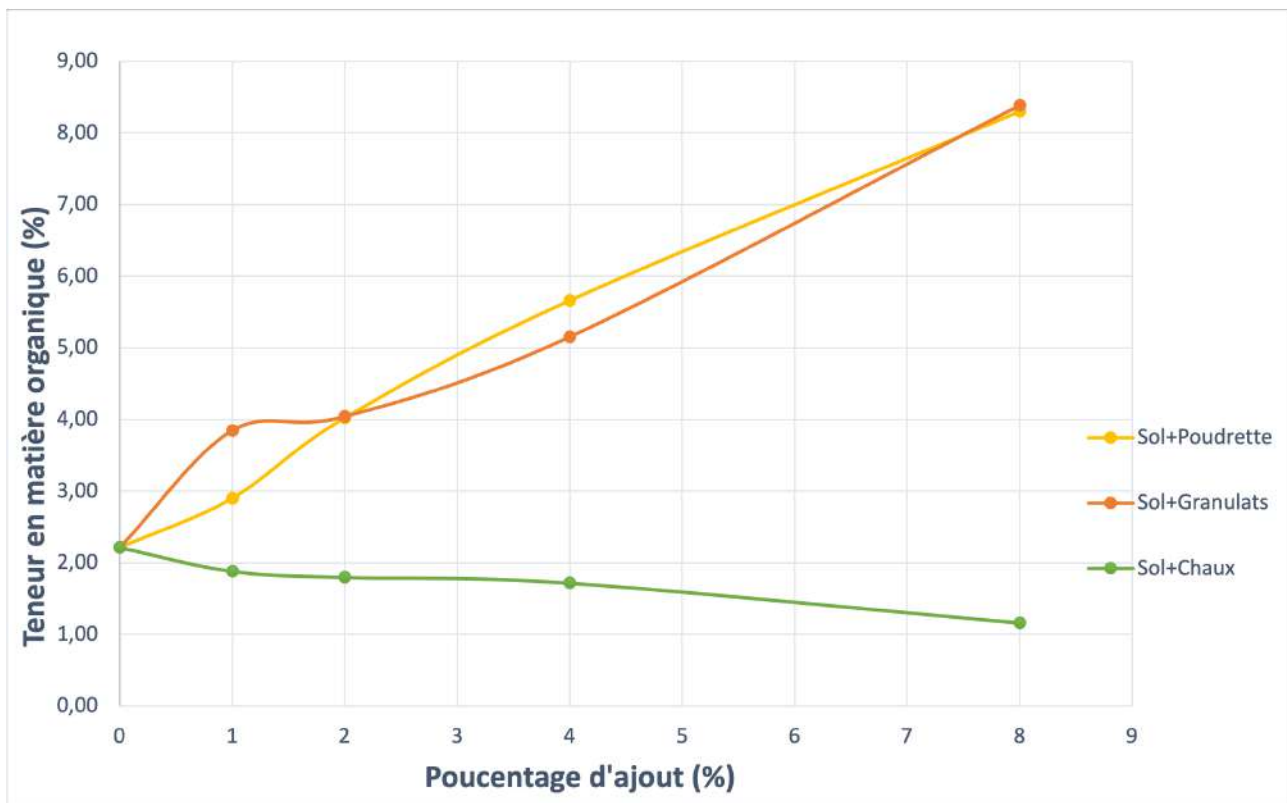


FIGURE 3.13 – Variation de la teneur en matière organique du sol en fonction du pourcentage d'ajout.

L'analyse des différentes courbes montre une augmentation de la teneur en matière organique suite à l'ajout de la poudrette et des granulats des pneus usés. Cette augmentation de la MO s'expliquerait par :

- La présence des fibres textiles, tels que le nylon ou le polyester, qui peuvent se décomposer lentement dans le sol en libérant des composés organiques qui contribuent à l'augmentation de la MO.
- La décomposition de quelques composés organiques du caoutchouc naturel composant des pneus.

Par contre, on remarque une légère diminution de la teneur en MO avec l'ajout progressif de la chaux. Ceci peut être dû à la formation de complexes chaux-matières organiques ce qui empêche la dégradation de la matière organique. Ou bien à l'augmentation du pH du sol (due à l'ajout de la chaux qui est une base) perturbant ainsi les micro-organismes acidophiles responsables de la décomposition de la matière organique

En résumé, l'incorporation de poudrette et de granulats dans le sol peut effectivement augmenter sa teneur en matière organique (MO) sur le court terme, tandis que la chaux peut avoir un effet inverse.

## 3.6 Étude comparative des trois traitements

### 3.6.1 Comparaison des résultats du test Proctor

Les figures 3.14 et 3.15 présentent les courbes de variation de la teneur en eau optimale et de la densité sèche max en fonction du pourcentage d'ajout pour trois types de traitement : granulats de pneus, poudrette de pneus et chaux. Les pourcentages d'ajout varient de 1 à 8%.

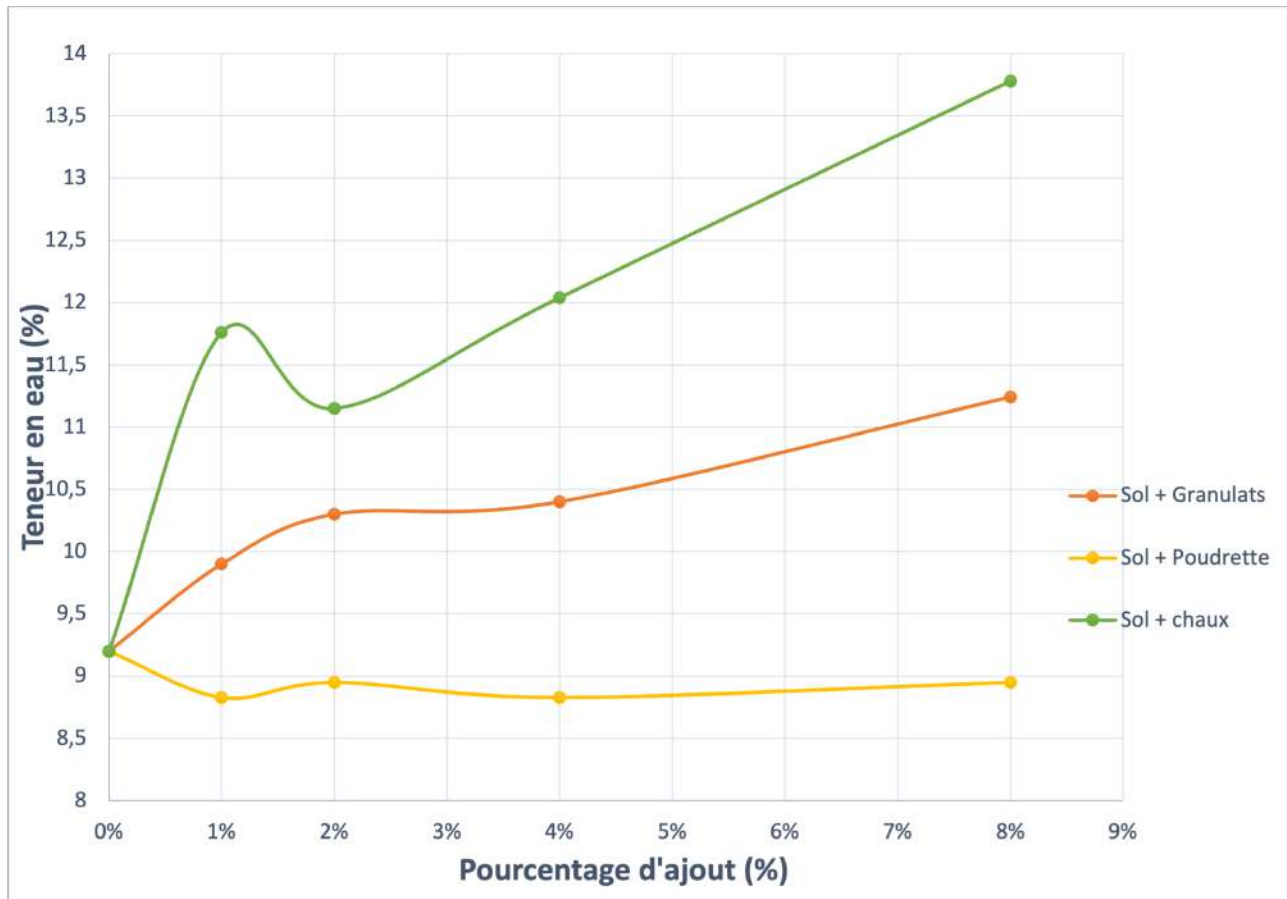


FIGURE 3.14 – Variation de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage d'ajout

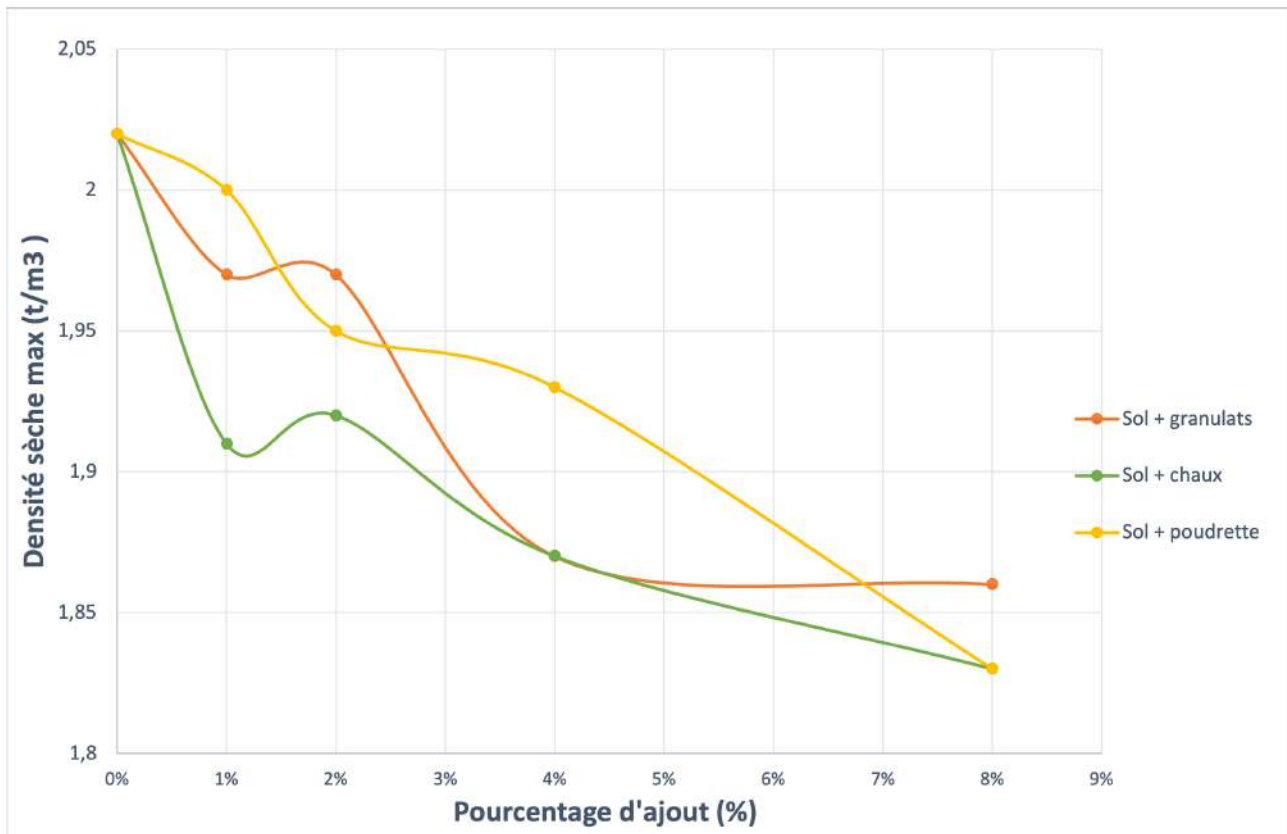


FIGURE 3.15 – Variation de la densité sèche maximale en fonction du pourcentage d'ajout

L'analyse comparative de ces courbes révèle plusieurs tendances distinctes. Les granulats de pneus montrent une augmentation progressive de la teneur en eau, accompagnée d'une diminution de la densité sèche à des pourcentages élevés. En revanche, la poudrette de pneus présente une légère diminution initiale de la teneur en eau, suivie d'une augmentation régulière. La chaux, quant à elle, présente une évolution semblable à celle de la poudrette, seulement que la teneur en eau absorbée est meilleure lors de l'ajout de la chaux.

Les sols traités avec des granulats et de la poudrette de pneus manifestent une augmentation progressive de la teneur en eau à partir de 4%, indiquant une amélioration de la capacité de rétention d'eau avec l'augmentation du pourcentage d'ajout. Parmi les deux, les granulats de pneus montrent les meilleurs résultats, avec une augmentation plus significative de la teneur en eau et une diminution de la densité sèche par rapport à la poudrette de pneus.



### 3.6.2 Comparaison des résultats œdométriques

Les figures 3.16 et 3.17 présentent les courbes de variation de la teneur en eau optimale et de la densité sèche max en fonction du pourcentage d'ajout pour trois types de traitement : granulats de pneus, poudrette de pneus et chaux. Les pourcentages d'ajout varient de 1 à 8%.

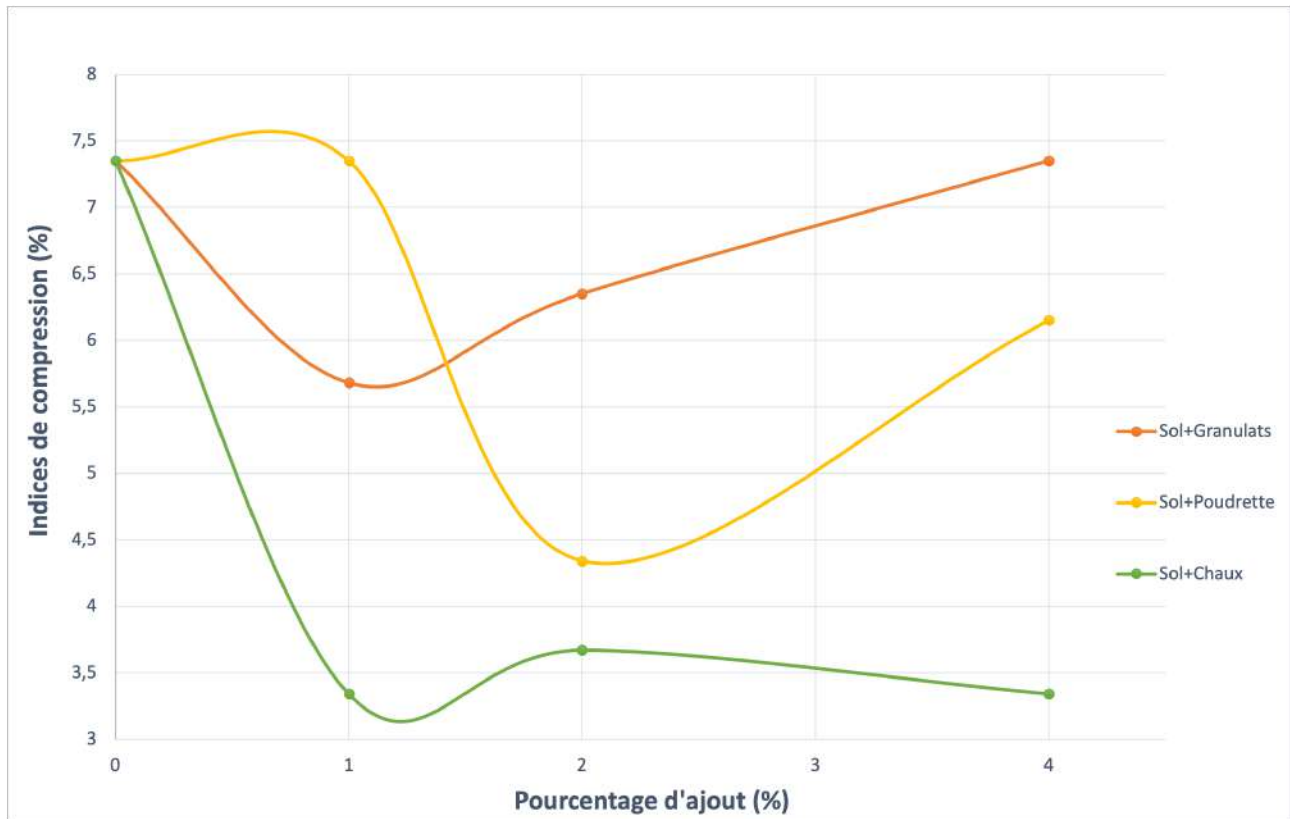


FIGURE 3.16 – Variation des indices de compression en fonction des pourcentages ajoutés

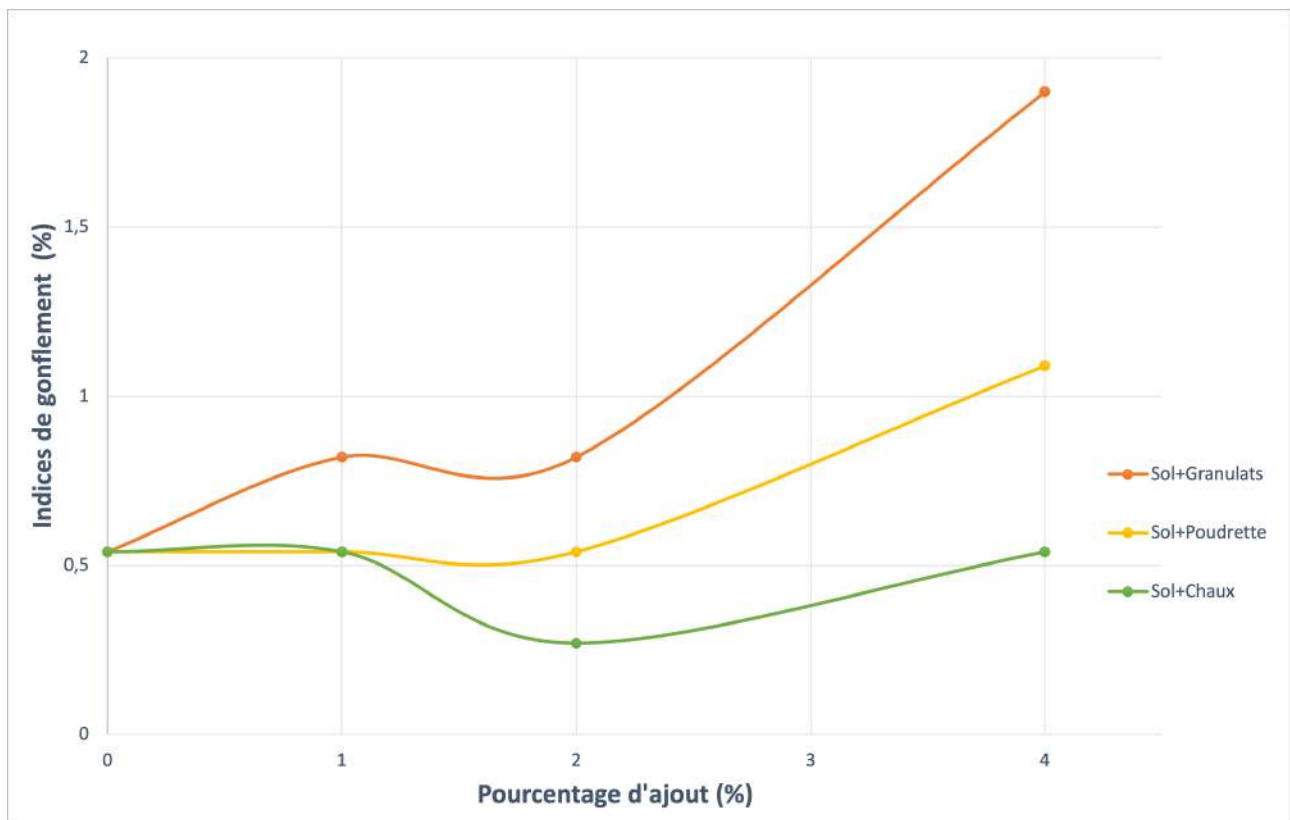


FIGURE 3.17 – Variation des indices de gonflement en fonction des pourcentages ajoutés

D'après la figure 16, on remarque que l'ajout des différents liants réduit les indices de compression des sols. Cette réduction est limitée à l'ajout de 1 % de charge. Au-delà de cette valeur on enregistre une nette augmentation des indices de compression.

En revanche, le sol traité à la poudrette des pneus présente d'abord une stabilisation après ajout de 1 % de poudrette suivie d'une augmentation. Quant au sol traité aux granulats, on peut noter une augmentation légère de l'indice de gonflement après ajout de 1 % de granulats suivie d'une stabilisation (après ajout de 2 % de granulats). A 4% de granulats, on note une importante augmentation de l'indice de gonflement.

La chaux, quant à elle, améliore continuellement l'indice de gonflement en l'assurant constant. D'après la figure 3.17, on remarque une stabilisation de cet indice pour les sols traités à la chaux.

Les sols traités avec un faible pourcentage de poudrette (1%) manifestent une stabilisation de l'indice de compression et un rapprochement de l'indice de gonflement par rapport aux indices observés avec l'ajout de la chaux.

# Conclusion générale

L'objectif de ce travail était d'évaluer l'effet de l'utilisation des granulats et de la poudrette de pneus usagés sur la stabilité des sols. En utilisant ces matériaux comme agents de traitement, nous avons cherché à améliorer les propriétés mécaniques des sols, tout en les comparant avec la chaux. Pour ce faire, nous avons mené deux principaux types d'essais : l'essai Proctor et l'essai œdométrique.

L'essai Proctor nous a permis d'évaluer l'influence des granulats, de la poudrette de pneus et de la chaux sur la densité maximale sèche et la teneur en eau optimale du sol.

Les résultats de l'essai Proctor ont montré que l'ajout de granulats et de poudrette de pneus influence de manière significative la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale des sols. Les granulats de pneus, en particulier, ont démontré une augmentation progressive de la teneur en eau optimale à mesure que leur pourcentage d'ajout augmente, tout en diminuant la densité sèche. La poudrette de pneus, quant à elle, a présenté une légère diminution initiale de la teneur en eau optimale suivie d'une augmentation régulière indiquant une capacité de rétention d'eau améliorée.

L'essai œdométrique, quant à lui, a permis d'étudier le comportement du sol sous charge et de mesurer son tassement.

Les résultats ont révélé des tendances distinctes en fonction des matériaux utilisés. La poudrette de pneus, à de faibles pourcentages (1%), a montré une stabilisation notable de l'indice de compression et une diminution de l'indice de gonflement, suggérant son potentiel en tant que stabilisant alternatif. Les granulats ont, cependant, présenté une augmentation initiale des indices de compression et de gonflement, bien que des pourcentages plus élevés (4%) aient conduit à une réduction de ces indices, mais sans atteindre les performances de la chaux.

La chaux, utilisée comme référence, a démontré une amélioration continue et significative des indices de compression et de gonflement, dès les premiers pourcentages d'ajout. Cette amélioration est attribuable à la réactivité chimique de la chaux, qui forme des composés stabilisants avec les argiles du sol, améliorant ainsi de manière plus durable les propriétés mécaniques du sol.

Ces résultats encourageants ouvrent la voie à une valorisation durable des granulats et de la poudrette de pneus usagés dans le domaine du génie civil. On peut en conclure que les granulats améliorent de manière significative les caractéristiques de compactage des sols. Leur ajout permet une meilleure densité du sol et une plus grande stabilité, ce qui est crucial pour des applications comme les remblais routiers et les fondations.

En parallèle, la poudrette de pneus montre une amélioration notable des propriétés œdométriques du sol, surtout à de faibles pourcentages d'ajout. Cela signifie qu'elle contribue à la réduction de l'indice de gonflement et à la stabilisation de l'indice de compression, ce qui suggère un potentiel stabilisant alternatif.

L'utilisation de ces matériaux alternatifs, notamment les granulats, pourrait réduire la dépendance aux stabilisants chimiques tout en améliorant la stabilité et les performances globales des sols. Les granulats de pneus usagés, grâce à leur capacité d'absorption des chocs, offrent des avantages spécifiques pour des applications telles que les remblais routiers et les fondations. Cette capacité d'absorption des chocs améliore non seulement la durabilité des infrastructures, mais atténue également les effets des charges dynamiques, augmentant ainsi la stabilité des sols.

En intégrant ces matériaux, il est possible de minimiser l'impact environnemental tout en promouvant une approche plus écologique dans les projets de construction. Cette démarche innovante présente un double avantage : valoriser des déchets autrement difficiles à gérer et améliorer les propriétés mécaniques des sols, essentielles pour la durabilité des infrastructures.

En somme, cette recherche pave la voie à de nouvelles méthodes de traitement des sols utilisant des matériaux recyclés. Elle offre également des solutions potentielles pour la gestion durable des déchets de pneus usagés, intégrant ainsi des pratiques de génie civil plus respectueuses de l'environnement.

Pour approfondir cette recherche, plusieurs perspectives s'ouvrent :

- Effectuer ces tests sur des sols instables tels que la vase et la marne afin de mieux comprendre l'influence du traitement avec des granulats et de la poudrette de pneus ;
- Réaliser des essais complémentaires tels que l'essai de cisaillement et la détermination de l'indice CBR ;
- Effectuer un test d'absorption sur les granulats de pneus ;
- Expérimenter avec des granulométries supérieures pour les granulats de pneus afin de déterminer si cela améliore davantage les propriétés mécaniques des sols traités ;
- Étudier l'impact à long terme de l'utilisation des pneus sur la santé des écosystèmes afin d'évaluer les effets environnementaux durables, y compris la dégradation des matériaux dans le sol et leur interaction avec la faune et la flore locales.

Ces perspectives permettent non seulement d'améliorer les connaissances scientifiques dans ce domaine, mais aussi de développer des solutions pratiques pour une gestion plus écologique et durable des sols.

# Bibliographie

- [1] H. Trouzine, A. Asroun, N. Asroun, F. Belabdelouhab, and N. Thanh Long. "problématique des pneumatiques usagés en algérie". *Revue « Nature Technologie»*, n° 05 :28–35, 2011.
- [2] Citeo. Citeo. <https://www.citeo.com>. Consulté le 07/06/2024.
- [3] Novethic. La thaïlande renvoie aux touristes les déchets laissés dans ses parcs naturels. <https://www.novethic.fr/actualite/environnement/dechets/isr-rse/la-thaïlande-renvoie-aux-touristes-les-dechets-laises-dans-ses-parcs-naturels-149053.html>. Consulté le 07/06/2024.
- [4] Site de l'office national des statistiques (ons) d'algérie. <https://www.ons.dz/spip.php?rubrique19>. Consulté le 20/06/2024.
- [5] F. Sadaka. "Étude de la dégradation contrôlée des poly-diènes : application au recyclage des déchets pneumatiques". Thèse de doctorat de l'Université du Mans, 2010.
- [6] Michelin. Le pneu cet inconnu / michelin– les fonctions du pneu. <https://toutsurlepneu.michelin.com/le-pneu-cet-inconnu-les-fonctions-du-pneu>. Consulté le 06/03/2024.
- [7] M. Ourak. "valorisation énergétique et chimique des huiles de pyrolyse des pneus usagés". Thèse de doctorat de l'IMT Atlantique Nantes, 2021.
- [8] S. Boukour. "caractéristiques physico-mécaniques et durabilité des éco-composites cimentaires à base de granulats de caoutchouc issus de pneus usagés". Thèse de doctorat de l'Université du 8 mai 1945, Guelma, 2017.
- [9] J. Foucard. Rôle du pneumatique dans le phénomène d'adhérence. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, Réf 4520-PP, 2005.
- [10] Eco Terra Beds. All about hevea brasiliensis - eco terra beds. <https://ecoterrabeds.com/blogs/eco-terras-healthy-sleep-blog/all-about-hevea-brasiliensis>. Consulté le 30/04/2024.
- [11] J.C. Brosse, D. Derouet, I. Campistron, and D. Reyx. Le caoutchouc naturel-chimie d'une hydrocarbure polymère. *L'actualité chimique*, novembre-décembre :45–51, 2002.
- [12] Caoutchouc synthétique. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Caoutchouc\\_synthétique#/media/Fichier:SBR.svg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Caoutchouc_synthétique#/media/Fichier:SBR.svg). Consulté le 11/05/2024.
- [13] L. Moulin. "vapo-thermolyse des pneus usagés, valorisation du noir de carbone récupéré, relation procédé-produit". Thèse de doctorat de l'École des Mines d'Albi-Carmaux, 2018.
- [14] S. Gherib. "effet du noir de carbone et de la silice sur le comportement à la coupure des élastomères chargés". Thèse de doctorat de l'Université du 8 mai 1945, Guelma, 2010.
- [15] Noir de carbone, Date de consultation 11/05/2024.
- [16] A. Bennani. "Élaboration, comportement et durée de vie en fatigue du caoutchouc naturel renforcé de silice". Thèse de doctorat de l'École des Mines de Paris, 2006.
- [17] Décret exécutif n° 06-104 du 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux (jora n°13), 2006.
- [18] N. Roche. "comportement vibro-acoustique de matériaux et structures à base de poudrette de pneumatiques recyclés". Thèse de doctorat de l'École Centrale de Lyon, 2010.
- [19] Ministère de l'Environnement et energie renouvelable. Liste des collecteurs 2024, 2024. Consulté le 13 juin 2024.

- 
- [20] P. Collet. Rep pneumatiques : la collecte des pneus d'ensilage et la reprise par les distributeurs entrent en jeu. <https://www.actu-environnement.com/ae/news/decret-rep-pneumatiques-reprise-distributeur-pneus-ensilage-41298.php4>, 2023. Consulté le 09/05/2024.
- [21] S. Seghar. "dévulcanisation des caoutchoucs par micro-onde : influence des liquides ioniques". Thèse de doctorat de l'Université de François-Rabelais de Tours, 2015.
- [22] CIDRES (Centre Internationale de Recherche et Développement sur l'Élevage en zone Suro-humide) Maquette Mariam Ouédraogo. *Techniques de conservation des fourrages par voie humide*. Mars 2005.
- [23] A. Chettah. "comportement vibro-acoustiques des structures élaborées à partir de poudre de pneus recyclés". Thèse de doctorat de l'Université de Reims, 2008.
- [24] Déchets pneumatiques. <https://and.dz/site/wp-content/uploads/PU.pdf>. Consulté le 20/06/2024.
- [25] A. Makhlof. L'économie circulaire et l'industrie du ciment en algérie : Situation présente et opportunités futures. *Journal de l'Économie Circulaire et Développement Durable*, 1(2), Décembre 2021.
- [26] A. Beferrag. "contribution à l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons de sable de dunes". Thèse de doctorat de l'Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [27] B. Algayer. "variabilité à court terme de la stabilité structurale des sols et processus physico-chimiques associés". Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans, 2012.
- [28] M. Tojerow. "influence des systèmes agricoles sur la stabilité des sols et investigation des techniques permettant de la quantifier". Mémoire de fin d'étude de l'Université de Liège, 2022.
- [29] H. Gheddache. "stabilisation des sols à la chaux et à chaud". Mémoire de fin d'étude de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [30] Z. Belabbaci. "stabilisation des sols gonflants". Thèse de doctorat de l'Université Aboubekr Belkaïd de Tlemcen, 2014.
- [31] F. Haroun. "stabilisation des sols problématiques à l'aide d'additifs (poudre de marbre calciné et déchets de pneus)". Mémoire de fin d'étude de l'Université 08 mai 1945 de Guelma, 2021.
- [32] L. Lokmane. "Étude expérimentale des techniques de traitement d'une chaussée souple". Mémoire de fin d'étude de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2018.
- [33] A.A. Driss and M. Ghrici. Effet de la chaux sur la stabilisation des propriétés géotechniques d'un sol argileux. In *8ème symposium international sur la construction en zone sismique*, Chlef, 2018.
- [34] V. Robitaille and D. Tremblay. *Mécanique des sols : théorie et pratique*. Modulo Éditeur, 1997.
- [35] Y. Atlan. Catalogue des essais géotechniques exécutés au laboratoire géotechnique d'Orléans. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/78-SGN-178-GEG.pdf>. Consulté le 21/04/2024.
- [36] Norme NF P 94-093. Sols : Reconnaissance et essais — détermination des références de compactage d'un matériau — essai proctor normal - essai proctor modifié, 17 octobre 2014.
- [37] M.E.A. Ziani and A. Ziouche. "analyse des techniques de détermination des modules de déformation en géotechnique". Mémoire de fin d'étude de l'Université Aboubakar Belkaïd de Tlemcen, 2013.
- [38] Norme ISO/TS17892-5. Reconnaissance et essais géotechniques - essais de sol au laboratoire - partie 5 : Essai à l'œdomètre sur sol saturé, 2004.
- [39] M.K. Gueddouda. "comportement hydromécanique des sols compactés : application à la conception d'une barrière ouvragés 'sable de dune - bentonite'". Thèse de doctorat de l'Université Aboubekr Belkaïd de Tlemcen, 2011.
-

- [40] L. Arabet. "modélisation numérique du tassement et de la consolidation des sols sous l'œdomètre". Mémoire de fin d'étude de l'Université 20 aout 1955 de Skikda, 2010.
- [41] M.D.E. Merabtene. "Étude de la variation du stock de carbone organique (sco) des sols forestiers en fonction de la couverture végétale : cas de la région de sidi bel abbes". Thèse de doctorat de l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, 2022.
- [42] R. Lefevre. "matière organique du sol : dynamique de (dé)stabilisation". Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2015.
- [43] Essai laboratoire, schéma essai proctor. <https://essai-laboratoire.blogspot.com/2013/03/schema-essai-proctor.html>. Consulté le 20/06/2024.
- [44] AA. Firoozi, C. Guney Olgun, AA. Firoozi, and MS. Baghini. Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8 :article number 26, 2017.
- [45] F. Sariosseiri and B. Muhunthan. Effect of cement treatment on geotechnical properties of some washington state soils. *Engineering Geology*, 104(1-2) :119–125, 2009.
- [46] AA. Besma and ER. Tuncer. Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays. *Transportation Research Record*, (1295) :52–61, 1991.
- [47] S. Rao and P. Shivananda. Compressibility behaviour of lime-stabilized clay. *Geotechnical and Geological Engineering*, 23 :309–319, 2005.