



Département Génie des Procédés et de l'Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

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

Valorisation des déchets pneumatiques par transformation et recyclage matière

Amine ACHEBA & Bouchra HABILI

Présenté et soutenu publiquement le 08/07/2025

Composition du jury :

Président :	M. NAMANE Abdelkader	Prof, ENP, Alger
Promotrices :	Mme. YAHIA Zohra	Doctorante, ENP, Alger
	Mme. BELHANECHÉ Naima	Prof, ENP, Alger
Examineurs :	Mme. AROUA Sadjia	MCA, ENP, Alger
	Mme. IRINISLIMANE Ratiba	MCA, UMBB, Boumerdès
Invité :	M. HEDJAL Tahar Rached	Chef de service, LCTP

ENP 2025



Département Génie des Procédés et de l'Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

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

Valorisation des déchets pneumatiques par transformation et recyclage matière

Amine ACHEBA & Bouchra HABILI

Présenté et soutenu publiquement le 08/07/2025

Composition du jury :

Président :	M. NAMANE Abdelkader	Prof, ENP, Alger
Promotrices :	Mme. YAHIA Zohra	Doctorante, ENP, Alger
	Mme. BELHANECHÉ Naima	Prof, ENP, Alger
Examineurs :	Mme. AROUA Sadjia	MCA, ENP, Alger
	Mme. IRINISLIMANE Ratiba	MCA, UMBB, Boumerdès
Invité :	M. HEDJAL Tahar Rached	Chef de service, LCTP

ENP 2025

الملخص

في إطار التنمية المستدامة و تـمـيـن النـفـاـيـات، يركـز هـذا العـمـل عـلى اسـتـخـدام الحـبـيـبـات المـسـتـخـرجـة مـن إعـادـة التـدوير الإطارات المستعملة لتحسين الخصائص الجيوتقنية للتربة، تم إجراء حملة تجريبية من خلال اختبارات بروكتور المعدل، اختبار الأودوميتر، واختبارات القص المباشر، بهدف تحديد سلوك التربة المعالجة، أظهرت النتائج المحصلة أن هذه المواد المعاد تدويرها يمكن أن تحسن بشكل ملحوظ قدرة التحمل، القابلية للانضغاط، و مقاومة القص للتربة. يمثل هذا المنهج بديلا مبتكرا، اقتصاديا و بيئيا، ويساهم في إدارة مسؤولة للنفايات. ويوفر بذلك حلا مستداما للتحديات الحالية المتعلقة باستقرار التربة و تـمـيـن المـواد المـعـاد تـدويرها.

الكلمات المفتاحية: تـمـيـن النـفـاـيـات، تحـسـين التـرـبـة، حـبـيـبـات الإطارات، الاختبارات الجيوتقنية، اختبار البروكتور، اختبار الأودوميتر، اختبار القص.

Abstract

The valorisation of end-of-life tires through their transformation into rubber granulates offers an eco-friendly and sustainable approach to soil stabilization. In response to growing concerns over tire waste and the need for soil improvement, this study explores the integration of recycled rubber into natural soils. A comprehensive experimental program—including modified Proctor, oedometer, and direct shear tests—was conducted to evaluate the mechanical performance of treated soils. Results demonstrate a marked enhancement in compaction characteristics, bearing capacity (CBR), compressibility, and shear strength. These outcomes highlight the potential of rubber granulates as an effective additive for geotechnical applications, addressing both environmental challenges and engineering demands.

Keywords: Waste tires, soil improvement , tire aggregates, geotechnical tests, Proctor test, oedometer test, shear test.

Résumé

Dans une perspective de développement durable et de valorisation des déchets, ce travail porte sur l'utilisation de granulats issus du recyclage des pneus usagés pour améliorer les caractéristiques géotechniques des sols. Une campagne expérimentale a été menée à travers des essais Proctor modifié, œdométriques et de cisaillement direct afin de caractériser le comportement du sol traité. Les résultats obtenus montrent que ces matériaux recyclés peuvent significativement améliorer la portance, la compressibilité et la résistance au cisaillement des sols. Cette approche constitue une alternative innovante, économique et écologique tout en contribuant à une gestion responsable des déchets. Elle offre ainsi une solution durable aux enjeux actuels liés à la stabilité des sols et à la valorisation des matériaux recyclés.

Mots-clés : valorisation des déchets – amélioration des sols – granulats de pneus –essais géotechniques – essai Proctor — essai œdométrique – essai de cisaillement

Table de matières

Liste des tableaux

Table des figures

Introduction générale.....	12
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique.....	15
1.2. Comportement et stabilité des sols.....	25
1.2.1. Constitution d'un sol.....	25
1.2.2. Classification des sols.....	26
1.2.3. Stabilité des sols.....	26
1.2.4. Stabilisation et amélioration des sols.....	27
1.3 Essais géotechniques.....	29
1.3.2 Essai CBR (California Bearing Ratio).....	32
1.3.3 Essai œdométrique.....	34
1.4 Valorisation matière des déchets pneumatiques.....	42
1.4.1 Introduction.....	42
1.4.2 Étapes de transformation des PUNR.....	43
1.4.3 Traitement des PUNR.....	44
1.4.4 Produits issus du recyclage des pneus.....	44
1.4.5 Avantages de valorisation des pneus usagés.....	45
1.4.6 Limites et défis du recyclage des pneus usagés.....	47
1.4.7 Gestion et recyclage des pneus en Algérie – exemple de Recytech.....	48
Chapitre 2 : Méthodologie expérimentale.....	51
2.1 Introduction.....	52
2.2 Origine des matériaux utilisés.....	52
2.3 Protocole expérimental.....	53
2.4 Identification et caractérisation du sol.....	54
2.4.1 Analyse granulométrique par tamisage.....	54
2.4.2 Essai au bleu de méthylène.....	58
2.4.3 Analyse Chimique Sommaire.....	60
2.4.4 Limites d'Atterberg.....	62
2.4.5 Essai proctor modifié.....	66
2.5 Traitement Étude de l'amélioration des performances du sol.....	70
2.5.1 Détermination des indices CBR immédiat et après immersion.....	71

2.5.2	Expression des résultats	75
2.5.2	Essai œdométrique	76
2.5.3	Essai cisaillement	80
Chapitre 3 : Résultats et discussion.....		84
3.1	Résultats des essais caractérisation du sol naturel	85
3.1.1	Analyse granulométrique	85
3.1.2	Limites d'Atterberg	86
3.1.3	Valeur au bleu de méthylène	87
3.1.4	Analyse chimique sommaire	88
3.1.5	Essai Proctor modifié	88
3.1.6	Essai CBR	91
3.1.7	Classification du sol selon GTR.....	100
3.2	Comportement du sol traité par granulats de pneus	100
3.2.1	Influence sur le comportement à la compaction (Proctor)	100
3.2.2	Influence sur la portance (essai CBR).....	101
3.2.3	Influence sur les paramètres œdométriques	104
3.2.4	Influence sur la résistance au cisaillement	107
Bibliographie.....		112

Liste des tableaux

Tableau 3.1: Résultats de l'analyse granulométrique du sol naturel.....	85
Tableau 3.2 : Résultats de l'essai du cône tombant (Limites de liquidité).....	86
Tableau 3.3 : Tableau récapitulatif de l'essai au bleu de méthylène	87
Tableau 3.4 : Résultats de l'analyse chimique sommaire.....	88
Tableau 3.5 : Résultats des pesées et calculs des densités.....	89
Tableau 3.6 : Détermination de la teneur en eau	89
Tableau 3.7 : Densité sèche en fonction de la teneur en eau	90
Tableau 3.8 : Etat initial de l'échantillon (56C)	91
Tableau 3.9 : Poinçonnement (56C).....	91
Tableau 3.10 : Etat initial de l'échantillon (25C)	92
Tableau 3.11 : Poinçonnement (25C).....	92
Tableau 3.12 : Etat initial de l'échantillon (10C)	93
Tableau 3.13 : Poinçonnement (10C).....	93
<i>Tableau 3.14 : Les valeurs essentielles introduites dans le logiciel.....</i>	<i>94</i>
Tableau 3.15 : Etat initial de l'échantillon (56C)	95
Tableau 3.16 : Etat final de l'échantillon après imbibition (56C).....	95
<i>Tableau 3.17 : Poinçonnement (56C).....</i>	<i>96</i>
Tableau 3.18 : Etat initial de l'échantillon (25C)	96
Tableau 3.19 : Etat final de l'échantillon après imbibition (25C).....	97
Tableau 3.20 : Poinçonnement (25C).....	97
Tableau 3.21: Etat initial de l'échantillon (10C)	98
Tableau 3.22 : Etat final de l'échantillon après imbibition (10C).....	98
Tableau 3.23: Poinçonnement (10C).....	99
Tableau 3.24: Les valeurs essentielles introduites dans le logiciel	99
Tableau 3.25 : Les résultats de la cohésion et l'angle de frottement	109

Table des figures

Figure 3.1 : Courbe d'analyse granulométrique	85
Figure 3.2 : Droite de détermination de la limite de liquidité	86
Figure 3.3 : Courbe de compactage du sol brut (essai Proctor modifié)	90
Figure 3.4 : Graphe CBR immédiat (SOLTEST)	94
Figure 3.5 : Graphe CBR après immersion (SOLTEST)	100
Figure 3.6 : Courbes Proctor pour les différents pourcentages d'ajout de granulats de pneus	101
Figure 3.7 : Variation de CBR immédiat et CBR avec immersion	102
Figure 3.8 : Variation des indices de compression et gonflement et en fonction des pourcentages d'ajout	104
Figure 3.9 : Variation de la compressibilité en fonction des contraintes effectives lors de l'ajout des granulats de pneus	105
Figure 3.10 : Courbes œdométriques - variation des indices de compression et de gonflement en fonction du pourcentage des granulats de pneus	106
Figure 3.11 : Courbe cisaillement - droites intrinsèque	107
Figure 3.12 : Courbe cisaillement - variation de la cohésion en fonction des pourcentages d'ajout des granulats	107
Figure 3.13 : Courbe cisaillement - variation de l'angle de frottement en fonction des pourcentages d'ajout des granulats	108

Liste des abréviations et des symboles

Abréviations

- AND : Agence Nationale des Déchets
- BR : Butadiène Rubber
- CBR : Californian Bearing Ratio
- ELTs : End-of-Life Tires (pneus usagés)
- EPDM : Éthylène-Propylène-Diène Monomère
- GTR : Guide des Terrassements Routiers
- HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
- LCTP : Laboratoire Central des Travaux Publics
- NF : Norme Française
- NR : Caoutchouc Naturel
- OTR : Off-The-Road (pneus hors route)
- PUs : Pneus Usagés
- PUR : Pneus Usagés Réutilisables
- PUNR : Pneus Usagés Non Réutilisables
- RHC : Résistance Hydrocarbonée du Caoutchouc
- SBR : Styrene Butadiène Rubber
- SUV : Sport Utility Vehicle (véhicule utilitaire sport)
- TPE : Thermoplastiques Élastomères

Symboles

- $AgNO_3$: Nitrate d'argent
- $BaCl_2$: Chlorure de baryum
- B : Masse de bleu de méthylène
- $CaCO_3$: Carbonate de calcium
- $CaSO_4$: Sulfate de calcium
- C_c : Indice de compression
- C_d : Coefficient de déformation
- C_g : Coefficient ou indice de compression
- Cl^- : Ion chlorure
- CO_2 : Dioxyde de carbone
- VBS : Valeur de bleu sols
- C_s : Indice de recompression
- C_v : Coefficient de Consolidation
- D_{max} : Diamètre maximal des particules
- e : Indice des vides
- f_n : Pourcentage massique du refus cumulé ou fraction passante au tamis
- G : Gonflement linéaire relatif
- HCl : Acide chlorhydrique

- I_{CBR} : Indice CBR
- I_p : Indice de plasticité
- N : Charge verticale
- $NaCl$: Chlorure de sodium
- P_n : Pourcentage massique cumulé des particules passantes au tamis n
- R_n : Masse cumulée des refus sur le tamis n
- s : Surface de cisaillement
- SO_4^{2-} : Ion sulfate
- VBS : Valeur du bleu de méthylène
- w_{opt} : Teneur en eau optimale
- ZnO : Oxyde de zinc
- γ_d : Densité sèche
- γ_{dmax} : Densité sèche maximale
- γ_h : Densité humide
- ε_v : Tassement vertical relatif
- σ : Contrainte normale
- τ : Contrainte de cisaillement
- φ : Angle de frottement interne
- ω_l : Limite de liquidité
- ω_p : Limite de plasticité

Dédicaces

الحمد لله أولاً وأبداً، ربي العظيم الرحيم، الذي غمرني بفضله ووهبني القوة والصبر لأتجاوز كل الصعاب وأصل إلى هذه اللحظة، فلولاها لما استطعت أن أحقق شيئاً. كل النجاح منه، وإليه يعود الحمد والشكر.

Je dédie ce mémoire, avec tout mon amour et ma profonde reconnaissance, à ma chère maman, mon repère, ma lumière, ma force. J'ai tout appris d'elle : la patience, la dignité, l'amour du travail bien fait et la persévérance. Merci pour ton soutien inépuisable, ton amour sans condition et tes prières silencieuses.

Je me dédie également ce travail, à moi-même, à celui que j'étais, à celui que je suis devenu. À celui qui a douté parfois, mais qui n'a jamais abandonné. Ce chemin a été long, semé d'embûches, mais je l'ai traversé avec foi et détermination.

À mes amis, qu'ils soient proches, lointains ou simplement de passage, merci pour votre présence, vos encouragements, vos rires, vos silences aussi, et surtout pour votre sincérité. Vous avez été une source de force tout au long de ce parcours.

Et bien sûr, je tiens à dédier ce mémoire à mon binôme et amie, HABILI Bouchra, avec qui j'ai partagé chaque étape de ce travail. Merci pour ton engagement, ta rigueur, ta patience et ta bonne humeur. Cette aventure n'aurait pas eu la même couleur sans toi.

Enfin, à toutes les personnes qui ont croisé mon chemin, de près ou de loin, et qui ont contribué à ma progression : ce travail vous est aussi dédié. Votre soutien a compté, même dans le silence.

Amine ACHEBA

Dédicaces

À ma chère maman,

Complices depuis toujours, toi qui sais me comprendre sans un mot. Ta tendresse, ton amour et ta bienveillance m'ont portée à chaque étape. C'est à toi que je dédie ce travail, fruit de toutes ces années d'efforts, de doutes et de volonté. Tu as toujours cru en moi, même lorsque moi je doutais. Merci d'avoir été mon plus beau repère. Ce travail est aussi le tien.

À mon papa, mon frère et ma sœur,

Merci pour votre présence constante, votre soutien, vos encouragements si précieux. Papa, merci d'avoir su, par ta présence et tes mots, me redonner le sourire dans les moments difficiles. Mon frère et ma sœur, merci pour les sourires, les fous rires, et votre manière unique de rendre la vie plus douce.

À mes amis,

Ceux qui m'aiment, me supportent, me motivent. Merci pour votre bienveillance, vos mots au bon moment, votre écoute, et vos rappels à profiter de la vie même au milieu des périodes les plus intenses. Ce parcours n'aurait pas eu la même saveur sans vous à mes côtés.

Et enfin,

À Amine, mon binôme, avec qui j'ai partagé trois années de travail, de réussites, de remises en question, mais surtout de complicité et d'amitié. Merci pour ton sérieux, ton engagement, ton soutien infaillible, et pour avoir toujours été là, dans les bons comme dans les moments plus difficiles. Cette aventure, on l'a construite ensemble.

À toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à ce parcours : je vous dédie ce travail.

Bouchra HABI

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements à nos directrices de mémoire, **Madame N. Belhanèche** et **Madame Z. Yahia**, pour leur encadrement rigoureux, leurs conseils éclairés et leur disponibilité constante tout au long de la réalisation de ce travail. Leur soutien et leur exigence scientifique ont été pour nous des sources précieuses de motivation, qui nous ont permis de progresser et de mener à bien ce projet.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à toute l'équipe du **Laboratoire Central des Travaux Publics (LCTP)** pour leur accueil chaleureux, leur accompagnement technique et leur appui tout au long de notre stage. Nous remercions tout particulièrement **Monsieur Mohammed, Yasser, Tarek**, ainsi que **Monsieur TR. Hedjal**, pour leur disponibilité, leur expertise et leur soutien constant, qui ont grandement facilité nos travaux et enrichi notre expérience professionnelle.

Nos remerciements s'adressent aussi à **Monsieur A. Namane**, Professeur à l'École Nationale Polytechnique, pour avoir accepté de présider le jury de soutenance, ainsi qu'à **Madame R. Irinislmane**, Maître de conférences classe A à l'Université de Boumerdès, et **Madame S. Aroua**, Maître de conférences classe A à l'École Nationale Polytechnique, pour avoir accepté d'évaluer notre mémoire. Nous remercions également **Monsieur TR. Hedjal** pour sa participation en tant qu'invité au sein du jury et pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus chaleureux à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet. **Votre soutien, vos encouragements et votre disponibilité ont été essentiels à l'aboutissement de ce travail.**

Amine ACHEBA et Bouchra HABILI

Introduction générale

En raison de la croissance rapide de l'utilisation de l'automobile à l'échelle mondiale, des quantités considérables de pneus usagés sont générées chaque année. Il est estimé qu'environ 2 à 3 milliards de pneus sont jetés chaque année dans le monde entier [1]. Cette accumulation massive rend leur élimination de plus en plus difficile et coûteuse, tout en posant de sérieux risques pour la santé humaine et l'environnement.

À l'échelle mondiale, la gestion des pneus usagés représente ainsi un défi écologique majeur [2]. Ce problème est principalement alimenté par la croissance démographique [3], l'essor de la motorisation et le rythme soutenu de l'industrialisation. Les pneus usagés, en raison de leur nature non biodégradable, peuvent persister dans l'environnement pendant des décennies s'ils ne sont pas correctement traités.

Parallèlement, l'augmentation rapide de la population mondiale et l'urbanisation croissante ont entraîné une forte demande en terrains constructibles, provoquant une raréfaction des sols naturellement aptes à la construction. Dans de nombreuses régions, les terrains encore disponibles présentent des propriétés géotechniques peu favorables. Face à cette situation, le recours à des techniques de traitement et d'amélioration des sols devient indispensable afin d'assurer la stabilité et la durabilité des ouvrages construits sur ces terrains.

Dans une perspective de développement durable, il serait particulièrement judicieux de combiner les techniques de traitement des sols avec le recyclage des pneus usagés. En effet, la valorisation de ces déchets comme agents stabilisants des sols, représente une solution innovante et respectueuse de l'environnement. Une telle approche permettrait non seulement de réutiliser un déchet abondant, mais aussi de rendre constructibles des terrains auparavant considérés comme inadaptés.

Dans ce contexte, l'intégration des granulats de pneus comme agents stabilisants des sols apparaît comme une solution prometteuse, à la fois avantageuse sur le plan environnemental et pertinente pour les applications en ingénierie géotechnique.

Le présent travail a pour objectif d'évaluer l'efficacité de l'utilisation des granulats issus de pneus usagés en tant qu'agents stabilisants pour les sols. Il s'agit d'analyser l'influence de ces matériaux recyclés sur les propriétés mécaniques des sols traités. Dans ce cadre, trois types d'essais ont été réalisés : l'essai Proctor modifié, l'essai œdométrique et l'essai de cisaillement direct. Ces essais permettent de caractériser de manière complète le comportement du sol traité.

Ce mémoire est structuré en 3 chapitres :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique portant sur les pneumatiques, la stabilisation des sols, les principaux essais géotechniques, ainsi que la valorisation des déchets pneumatiques. Il aborde d'abord la problématique des pneus usagés et leur gestion en tant que déchets, puis passe en revue les différentes méthodes de stabilisation des sols. Ensuite, il décrit les principaux essais géotechniques ainsi que les caractéristiques des sols. Enfin, il traite de la valorisation matière des déchets issus des pneumatiques.

Le deuxième chapitre expose en détail la méthodologie adoptée dans le cadre de cette étude. Il présente les matériaux utilisés, le protocole expérimental, ainsi que le processus de traitement du sol. Ce chapitre décrit également la réalisation des essais Proctor, œdométrique et de cisaillement direct, effectués aussi bien sur le sol brut que sur le sol traité.

Le troisième chapitre présente les résultats obtenus et leur interprétation à travers une analyse approfondie de l'effet de l'ajout de granulats de pneus sur les propriétés du sol. Il met en évidence l'évolution des caractéristiques mécaniques en fonction du traitement appliqué. Ce chapitre inclut également une discussion sur les relations entre les différents essais réalisés, en mettant en lumière les corrélations significatives observées entre leurs résultats.

Enfin, les principales conclusions de l'étude sont exposées, accompagnées de quelques pistes proposées pour des recherches futures.

Chapitre 1 :

Synthèse

bibliographique

1.1 Généralités sur les déchets pneumatiques

1.1.1 Définition des déchets

Les déchets sont une conséquence inévitable des activités humaines. Ils désignent tout produit, matériau ou sous-produit devenu inutile pour son détenteur et destiné à être éliminé, parfois même au prix d'un coût. Bien qu'ils puissent contenir des substances similaires à celle des produits utiles, ils perdent leur valeur d'usage selon le contexte. La notion de déchet reste toutefois relative : ce qui est considéré comme un déchet par une personne peut encore avoir une utilité pour une autre. Ainsi, un matériau est qualifié de déchet non pas selon sa nature intrinsèque, mais par la volonté de s'en débarrasser [3].

La terminologie utilisée pour désigner les différents types de déchets et leurs méthodes de traitement varie selon les pays. En droit algérien, un déchet se définit comme tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, ainsi que toute substance, tout produit ou tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, a l'intention de se défaire ou est tenu de se défaire ou de l'éliminer [4].

Malgré cette subjectivité, il est essentiel de définir clairement ce qu'est un déchet, car cette définition conditionne les méthodes de gestion, de traitement et de régulation, afin de préserver la santé publique et l'environnement.

Les déchets peuvent être classés selon plusieurs critères, conformément à l'article 5 de la loi n°01-19 du 12/12/2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets :

- Les déchets dangereux, y compris les déchets spéciaux ;
- Les déchets ménagers et assimilés ;
- Les déchets inertes.

1.1.2 Les pneumatiques et leurs déchets

Les pneumatiques jouent un rôle essentiel dans la mobilité moderne, équipant aussi bien les voitures, motos que les véhicules lourds. Toutefois, à la fin de leur cycle de vie, ces pneus deviennent des déchets appelés pneus usagés (PUs) ou « End-of-Life Tires » (ELTs) en langue anglaise [5].

Ces déchets sont générés une fois que les pneus ne peuvent plus être utilisés, ni rechapés. On estime que près d'un milliard de pneus usagés sont produits chaque année dans le monde, un chiffre en constante augmentation [6].

Dans de nombreux pays, un immense volume de pneus usagés a été stocké, provoquant un impact négatif sur l'environnement comme illustré à la figure 1.1.



Figure 1.1: Stockage des pneus usagés

Les PUs représentent une problématique environnementale majeure lorsqu'ils sont mal gérés, en raison de leur volume, de leur faible biodégradabilité et de leur persistance dans l'environnement. Ils peuvent être source de pollution du sol, de l'eau et de l'air, notamment à cause de leur inflammabilité, de la stagnation d'eau favorisant la prolifération d'insectes, ou encore du risque d'émission de composés toxiques. Néanmoins, ces déchets ne doivent pas être perçus uniquement comme une contrainte, mais plutôt comme une ressource. S'ils sont correctement collectés et valorisés, ils peuvent être réutilisés pour produire de l'énergie ou des matières premières secondaires. Le caoutchouc issu des PUs présente en effet des propriétés intéressantes telles qu'une bonne élasticité, une résistance à la chaleur, à l'humidité, aux agents chimiques, ainsi qu'une capacité d'absorption des chocs et du bruit. Ces caractéristiques permettent leur intégration dans diverses applications : matériaux composites, revêtements de sols sportifs ou aires de jeux pour enfants, ou encore remplissage de pelouses synthétiques. Ainsi, la valorisation des pneus usagés constitue un enjeu clé dans une perspective d'économie circulaire durable [6].

1.1.3 Historique

Les pneus ont énormément évolué depuis l'apparition des pneus radiaux dans les années 1990. À mesure que la conception automobile s'est développée, les pneus se sont aussi considérablement améliorés : ils durent plus longtemps, offrent une conduite plus douce, sont plus silencieux, assurent une meilleure tenue de route et continuent globalement à progresser. Les premiers pneus en caoutchouc apparaissent au milieu du 19^e siècle. Il s'agissait de bandes de caoutchouc pleines fixées sur les roues de charrettes ou de diligences pour amortir un peu les secousses. Les pneus gonflables ont été brevetés dès 1845, mais ces premiers modèles pneumatiques étaient fragiles et vite abandonnés. Tout au long de son évolution, l'industrie du pneumatique a été marquée par de nombreuses avancées technologiques [7] .

En 1888, John Boyd Dunlop, vétérinaire à Belfast, dépose un brevet pour un pneu pneumatique destiné aux bicyclettes, après avoir vu son fils peiner à faire avancer un tricycle sur des pavés.

En 1895, André et Édouard Michelin utilisent des pneus gonflables sur une voiture lors de la course Paris-Bordeaux.

En 1898, la société Goodyear Tire and Rubber Company est fondée, nommée en l'honneur de Charles Goodyear, inventeur du procédé de vulcanisation du caoutchouc. Les premiers essais de motifs de bandes de roulement sur les pneus sont lancés en 1905.

En 1931, DuPont développe avec succès le caoutchouc synthétique, transformant la fabrication des pneus.

En 1948, Michelin introduit en Europe le premier pneu radial, avec des nappes orientées à 90° par rapport à la jante et renforcées par des ceintures en acier sous la bande de roulement. Ces pneus offrent une meilleure durée de vie, une tenue de route améliorée et moins de résistance au roulement, mais coûtent plus cher à produire.

En 1973, l'embargo pétrolier arabe et la hausse du prix de l'essence favorisent les pneus radiaux, plus économiques. Les voitures étrangères, équipées de pneus radiaux, gagnent en popularité. Michelin et Bridgestone s'implantent alors fortement sur le marché américain. Tous les nouveaux véhicules américains sont désormais équipés de pneus radiaux en série dès 1983.

Années 2000, Les fabricants lancent des pneus à faible résistance au roulement, avec des matériaux et gommes spéciales pour réduire la friction et améliorer la consommation de carburant.

Avec l'évolution des pneus, les systèmes de suspension et de direction des voitures ont également dû être adaptés. Les véhicules conçus pour les pneus diagonaux des années 1940-1950 ne sont généralement pas compatibles avec les performances des pneus radiaux modernes. Aujourd'hui, la technologie des pneus continue de progresser avec des modèles tout-terrain, tourisme, hiver et haute performance, bien supérieurs à ceux d'il y a seulement quelques décennies [7].

1.1.4 Composition des pneumatiques

Les pneus sont des produits issus d'une ingénierie complexe. Ils résultent de l'assemblage de plus de 200 composants. Parmi les éléments utilisés dans la fabrication des pneus, on trouve principalement :

- Le caoutchouc (naturel et synthétique) ;
- Le noir de carbone ;
- Des charges inertes (silice amorphe précipitée, alumine) ;
- L'acier ;
- Les câbles textiles et en tissu (nylon, kevlar) ;
- Le soufre, l'oxyde de zinc ;
- Des antioxydants et agents antiozones [8].

La Figure 1.2 montre la composition moyenne des pneus de voitures particulières, qui dépend du type de véhicule et des conditions climatiques régionales [9].

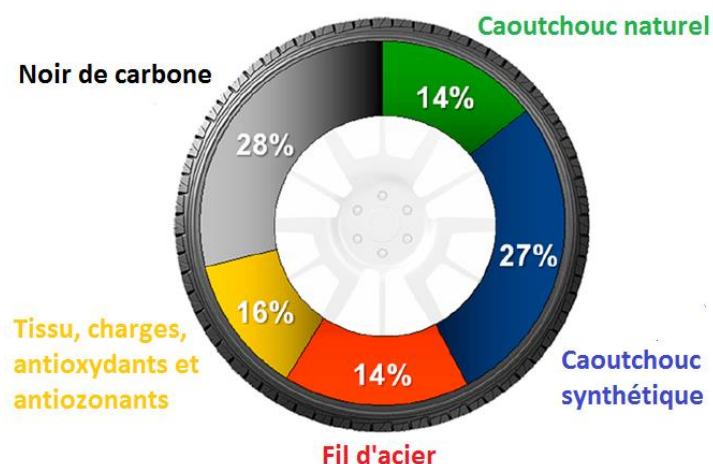


Figure 1.2 : La composition moyenne d'un pneu de voiture de tourisme par poids

Les différents types incluent les véhicules de tourisme (comme le nouveau type sophistiqué "run flat" illustré à la Figure 1.3), SUV, camions et bus, agricoles, et hors-route. La composition générale des pneus est indiquée dans le Tableau 1.1 [10].

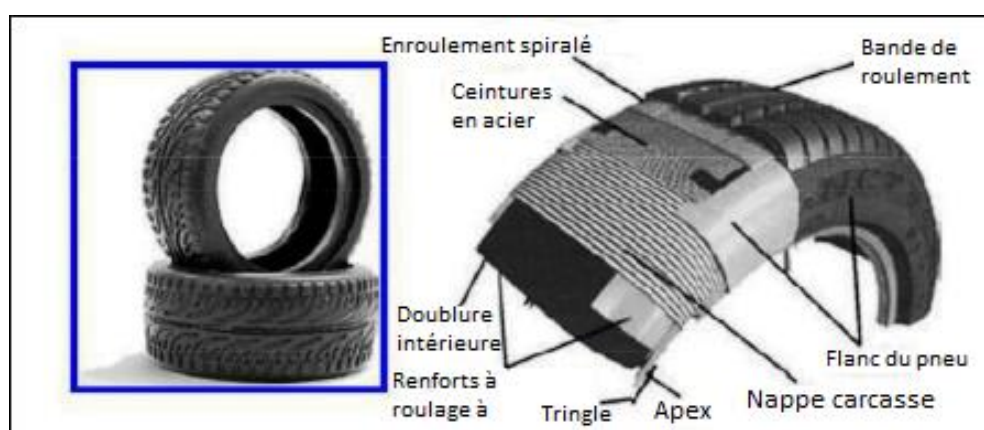


Figure 1.3 : Composants d'un pneu à roulage à plat (Run-flat)

Tableau 1.1: Composition générale d'un pneu

Matériaux de construction	Pourcentage en poids approximatif (%)
Composition hydrocarbonée du caoutchouc (RHC)	48
Noir de carbone et silice	22
Renforts métalliques	15
Huiles, antidégradants, cire, acide stéarique, etc.	8
Tissu	5
Oxyde de zinc (ZnO)	1
Agents de vulcanisation	1

Concernant la composition d'un pneu, les composants en caoutchouc peuvent varier largement. Les pneus pour voitures particuliers ont tendance à être riches en caoutchouc styrène-butadiène (SBR), un caoutchouc à usage général. Les pneus de camions utilisent un mélange 50:50 de SBR et de caoutchouc naturel (NR).

Les pneus OTR sont principalement composés de NR, qui possède une excellente résistance à la fatigue et une grande solidité ; ces pneus sont principalement conçus pour la résistance aux coupures et à l'usure en environnements difficiles [11].

1.1.4.1 Le caoutchouc naturel

Le caoutchouc naturel est un polymère de l'isoprène. Il contient généralement un faible pourcentage d'autres substances, telles que des protéines, des acides gras, des résines et des matériaux inorganiques [12], comme le montre le tableau 1.2. Sa structure chimique générale est représentée à la Figure 1.4.

Tableau 1.2 : Composition du latex de caoutchouc naturel

Composant	Pourcentage (p/p)
Particules de caoutchouc (cis-1,4-polyisoprène)	30-40
Protéines, acides gras, composés azotés	2-3
Lipides	0.1-0.5
Résines	1.5-3.5
Cendres	0.5-1
Glucides/ sucres	1-2
Eau	55-65

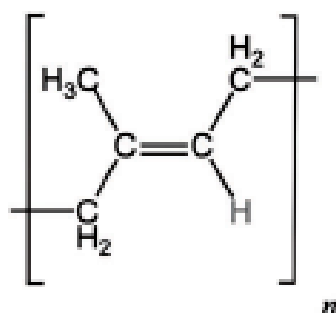


Figure 1.4 : Structure chimique du caoutchouc naturel

Le caoutchouc naturel possède une élasticité élevée, lui permettant de s'étirer sans se rompre puis de retrouver sa forme initiale. Cette propriété provient de sa structure moléculaire (polymères linéaires de haut poids moléculaire) [12].

1.1.4.2 Le caoutchouc synthétique

Le caoutchouc synthétique est un élastomère artificiel, c'est à dire un polymère à longue chaîne possédant des propriétés chimiques, physiques et mécaniques particulières. Ces matériaux se distinguent par une excellente stabilité chimique, une haute résistance à l'abrasion, une grande solidité et une bonne stabilité dimensionnelle. Ces caractéristiques sont généralement obtenues grâce à l'ajout d'agents de réticulation et d'additifs spécifiques. Une propriété importante des élastomères est leur capacité à être étirés jusqu'à au moins deux fois leur longueur initiale, puis à retrouver quasiment leur forme d'origine une fois relâchés, sans déformation permanente. Cette élasticité exceptionnelle en fait des matériaux de choix dans de nombreuses applications. Le caoutchouc synthétique est utilisé comme substitut du caoutchouc naturel notamment lorsque des propriétés techniques améliorées sont nécessaires [13].

Les caoutchoucs synthétiques regroupent :

- Les élastomères réticulables : polybutadiène, polyisoprène, terpolymère éthylène-propylène-diène (EPDM).
- Les élastomères thermoplastiques (TPE) : non réticulés, utilisés dans les pare-chocs de voitures ou les gaines de câbles. Ces matériaux peuvent être broyés et réutilisés. Cependant, ils ne peuvent pas remplacer complètement les caoutchoucs traditionnels car ils ne possèdent pas la large plage de températures de fonctionnement des caoutchoucs thermodurcissables.

Parmi les divers matériaux pétrochimiques de base, l'éthylène, le propylène et le butadiène sont les composants principaux extraits du naphta, et peuvent être classés selon leur séparation thermique et leur récupération. Le caoutchouc styrène-butadiène (SBR) et le caoutchouc polybutadiène (BR), qui sont des produits synthétiques typiques dérivés du butadiène, représentent les produits les plus courants, couvrant plus de 50 % de la demande mondiale en caoutchouc synthétique [14].

1.1.5 Problématique des pneus usagés

L'Algérie est confrontée à un défi croissant concernant l'élimination des pneus usagés. À l'échelle mondiale, plus de 10 milliards de pneus sont jetés chaque année, et en tant que marché automobile majeur en Afrique du Nord, l'Algérie contribue de manière significative à ce chiffre. Bien que les données locales exactes soient limitées, des pays voisins comme l'Égypte et le Maroc rapportent une augmentation annuelle des déchets de pneus de 6 à 8 %, une tendance probablement similaire en Algérie. Cela rend le recyclage des pneus usagés encore plus important dans le pays. Actuellement, la plupart des pneus usagés en Algérie finissent dans des décharges ou sont brûlés illégalement comme illustré dans la figure 1.5, ce qui libère des produits chimiques toxiques tels que les dioxines et les métaux lourds dans l'air et le sol. Par exemple, la combustion à l'air libre émet 20 fois plus de CO₂ que les méthodes légales de recyclage thermique, aggravant ainsi la qualité de l'air et les risques pour la santé publique [15].



Figure 1.5 : Brûlage illégal de pneus usagés en plein air

1.1.5.1 Réglementation

Pour s'inscrire dans une logique de développement durable, il a été nécessaire pour l'Algérie de construire une stratégie nationale de l'environnement, conformément au décret exécutif n° 06-104 du 28 février 2006, les pneus hors d'usage sont classés comme déchets spéciaux de classe « S » sous le code « 16.1.1 », sans aucun critère de dangerosité, selon la réglementation algérienne [16].

La loi algérienne précise que tout producteur et/ou détenteur de déchets est tenu d'assurer ou de faire assurer la valorisation des déchets générés à partir de matières qu'il importe, commercialise ou des produits qu'il fabrique. Lorsque le producteur ou détenteur est dans l'impossibilité d'éviter ou de valoriser ses déchets, il doit assurer, à ses frais, leur élimination de manière écologiquement rationnelle, conformément aux dispositions des articles 7 et 8 de la loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 et de ses textes d'application.

Suite à l'interdiction d'importation des pneus usagés (Arrêté interministériel du 1er juillet 2000), une nouvelle fiscalité a été instaurée imposant une taxe sur les pneumatiques.

En Europe, les pneus hors d'usage sont considérés comme des déchets banals, identifiés sous la rubrique 16 01 03 du Catalogue Européen des Déchets. Il est interdit de les abandonner, de les jeter dans la nature ou de les brûler à l'air libre.

La collecte et le traitement des pneus usagés imposent plusieurs obligations aux acteurs de la filière. Les producteurs doivent collecter, ou faire collecter à leurs frais, les pneus usagés que les distributeurs ou détenteurs mettent à leur disposition, dans la limite des tonnages qu'ils ont mis sur le marché l'année précédente. Ils doivent également assurer la valorisation ou l'élimination de ces pneus.

1.1.5.2 Types de pneus usagés

Selon la réglementation en vigueur sur la sécurité des pneumatiques des véhicules à moteur, les pneus usagés sont classés en deux grandes catégories [17] :

- **Pneus Usagés Réutilisables (PUR)**

Les PUR conservent des caractéristiques techniques suffisantes pour être réutilisés, notamment après rechapage. Leur intégrité structurelle permet une seconde vie en automobile [18].

Le rechapage consiste à remplacer la bande de roulement usée d'un pneu par une neuve, par un procédé de vulcanisation à chaud ou à froid. L'opération comprend plusieurs étapes [19] :

- Enlèvement de la bande de roulement usée (grattage)
- Réparation des dommages superficiels avec une gomme de bourrage
- Application d'une couche adhésive (gomme de liaison)
- Pose de la nouvelle bande de roulement
- Cuisson sous pression (à la vapeur) pour assurer l'adhérence des nouvelles couches

Le rechapage est généralement limité à la zone de roulement ; les flancs et les talons ne sont réparés que si nécessaire. Le caoutchouc synthétique SBR est couramment utilisé pour la fabrication des nouvelles bandes.

- **Pneus Usagés Non Réutilisables (PUNR)**

Les PUNR sont des pneumatiques qui ne peuvent plus assurer leur fonction d'origine, même après tentative de rechapage. Ils sont considérés comme des déchets, mais peuvent néanmoins être valorisés par valorisation matière ou énergétique [20].

Parmi les principales voies de valorisation des PUNR, on peut citer [21] :

- La fabrication de semelles de chaussures
- Les revêtements de sols sportifs
- Les tapis de sol pour véhicules
- L'utilisation comme combustible alternatif dans certaines industries

Ces opérations permettent de prolonger la valeur des matériaux composant les pneus, même lorsqu'ils ne sont plus utilisables en l'état.

1.1.6 Impacts environnementaux

L'industrie du pneu exerce une pression environnementale significative à différentes étapes de son cycle de vie. En 2019, le groupe international d'étude du caoutchouc ou « International Rubber Study Group » a estimé que 14,8 millions de tonnes de caoutchouc avaient été consommées dans le monde, dont 60 % dédiées à la fabrication de pneus. Chaque pneu nécessite entre 23,5 et 141 litres de pétrole pour sa production, illustrant la forte dépendance de cette industrie aux ressources fossiles. On estime que 17 millions de tonnes de pneus en fin de vie sont produits chaque année, soit environ 2,8 milliards de pneus jetés, en supposant un poids moyen de 6 kg par pneu. La croissance continue du taux de motorisation mondial entraîne une hausse de la demande en pneumatiques, dépassant les efforts mis en œuvre pour allonger leur durée d'utilisation [22].

Le traitement inapproprié des pneus usagés, notamment leur enfouissement ou leur abandon à l'état sauvage, engendre de nombreux problèmes environnementaux. Ces pratiques peuvent entraîner la pollution des eaux souterraines et favoriser des incendies incontrôlés, émettant des polluants atmosphériques dangereux tels que le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote et de soufre, les composés organiques volatils (COV), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), ainsi que des métaux lourds. De plus, les pneus stockés ou abandonnés servent souvent de refuge aux nuisibles tels que les moustiques, termites et rongeurs, posant également un risque sanitaire [23].

La fabrication des pneus repose sur des procédés de vulcanisation irréversibles. Ce processus lie le caoutchouc naturel ou synthétique au soufre et à d'autres additifs, rendant le matériau élastique, insoluble et infusible. En conséquence, le recyclage des pneus usagés devient complexe et nécessite des procédés mécaniques, thermiques ou chimiques intensifs en énergie. Malgré ces contraintes, les tendances actuelles indiquent une légère augmentation de la valorisation matière, une diminution progressive de la valorisation énergétique, tandis que la réutilisation reste globalement stable mais tend à baisser [24].

En Europe, selon l'Association européenne des fabricants de pneus et de caoutchouc, 91 % des 3,5 millions de tonnes de pneus usagés produits en 2018 ont été collectés et traités. Environ 35 % ont été valorisés énergétiquement, principalement dans des cimenteries (75 %) et des centrales thermiques (25 %). Le reste, soit 53 %, a été orienté vers la valorisation matière, notamment par granulation (78 %) ou pour des usages dans le génie civil (5 %) [25].

Aux États-Unis, d'après l'Association des fabricants de pneus, 72,9 % des pneus usagés produits en 2019 ont été collectés. Parmi eux, 38,2 % ont été valorisés énergétiquement et 34,7 % recyclés. Les 27,1 % restants ont été éliminés par enfouissement (14,3 %), abandonnés illégalement (9,7 %) ou exportés (3,1 %) [26]. En Algérie, selon l'Agence Nationale des Déchets (AND), le volume des pneus usagés augmente progressivement, et cette évolution devrait se poursuivre dans les prochaines années. Cette tendance se manifeste à travers le ratio national des pneus usagés présenté à la figure 1.6 :

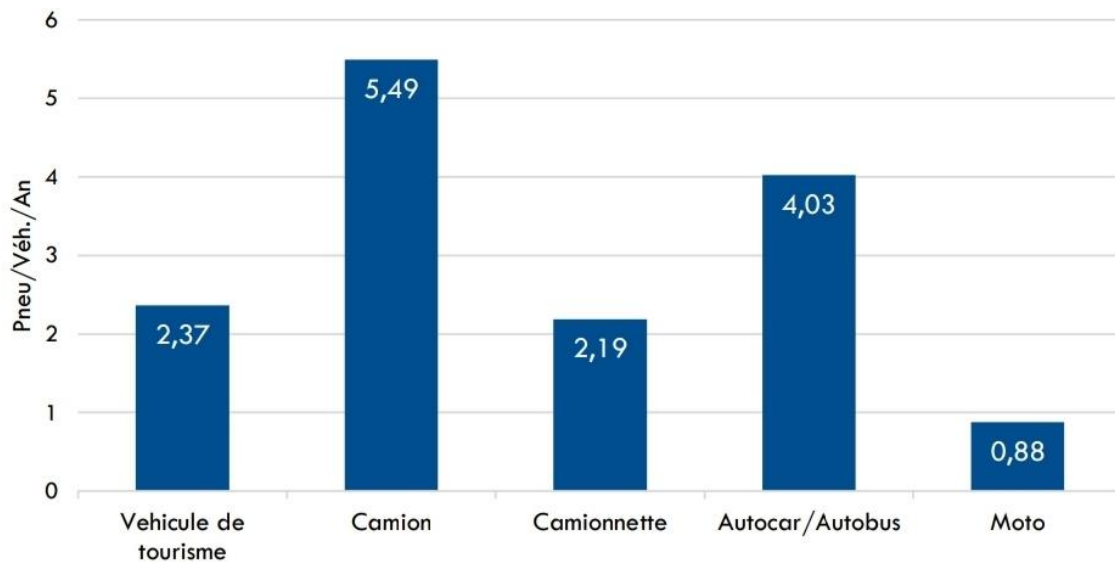


Figure 1.6 : Ratio national des pneus usagés (AND 2018)

L'incinération à ciel ouvert est malheureusement répandue, car considérée comme une solution rapide et peu coûteuse pour récupérer les fils d'acier en vue de leur revente. Toutefois, cette pratique contribue fortement à la pollution atmosphérique, en libérant des gaz à effet de serre (notamment le CO₂) ainsi que des polluants toxiques tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les dioxines, les furanes et des métaux comme le zinc. Ces substances rejetées dans l'environnement représentent un danger sérieux pour la santé publique. Elles peuvent causer des pathologies graves, telles que des maladies cardiovasculaires, des troubles respiratoires (asthme, bronchites), des allergies, des cancers (notamment du poumon et de la peau), ou encore des troubles de la vision [27].

1.2. Comportement et stabilité des sols

1.2.1. Constitution d'un sol

Un sol est défini comme un mélange d'éléments solides (le plus souvent des particules ou grains) constituant le squelette solide, d'eau (pouvant circuler ou non entre les particules) et d'air ou de gaz. Il est donc généralement constitué de trois phases (figure 1.7) [28] :

$$\text{Sol} = \text{phase solide} + \text{phase liquide} + \text{phase gazeuse}$$

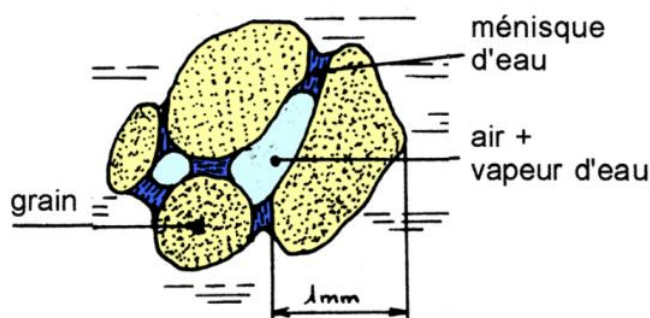


Figure 1.7 : Illustration des trois phases présentes dans le cas d'un sable

Les vides entre les grains du squelette peuvent être remplis d'eau, de gaz ou des deux simultanément. Le gaz contenu dans les vides entre les particules est généralement de l'air lorsque le sol est sec, ou un mélange d'air et de vapeur d'eau lorsque le sol est humide. L'eau peut remplir plus ou moins tous les vides entre les grains et être mobile (écoulement plus ou moins rapide) [28].

1.2.2. Classification des sols

En géotechnique, les sols sont classés en deux catégories principales (figure 1.8) :

- Les sols fins (argile, limon), qui présentent :
 - Une cohésion due à leur taille de particules (inférieure à $20\ \mu\text{m}$) ;
 - Une forte sensibilité à la teneur en eau (gonflement / retrait).
- Les sols grenus (sable, gravier), caractérisés par :
 - Des particules plus grandes (supérieure à $20\ \mu\text{m}$) ;
 - Une faible sensibilité à l'eau [29].

Cette distinction est cruciale car elle influence directement le comportement mécanique du sol, sa stabilité, et les méthodes de construction à adopter [30].

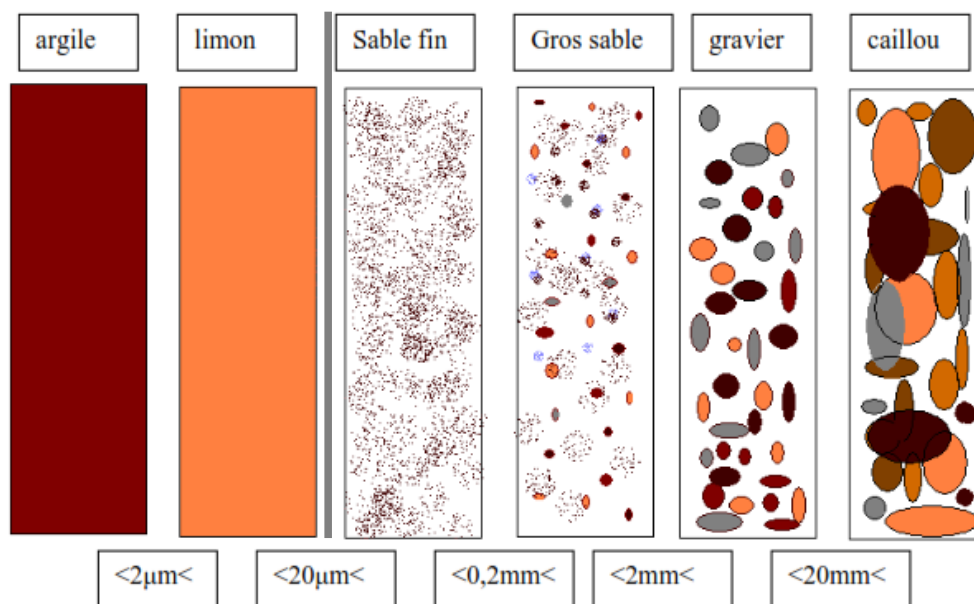


Figure 1.8 : Classification des particules solides d'un sol

1.2.3. Stabilité des sols

La stabilité des sols est la capacité d'un sol à résister aux charges et aux forces extérieures (comme le poids des bâtiments, la pluie ou les vibrations) sans se déformer, glisser ou s'effondrer [31].

La stabilité des sols est influencée par divers facteurs naturels et humains qui affectent leurs propriétés mécaniques, notamment :

- **Texture du sol** : déterminée par la proportion de sable, limon et argile ; influence la porosité et la rétention d'eau [30] ;
- **Teneur en eau** : un excès d'eau réduit la friction entre particules, favorisant les glissements et tassements [32] ;
- **Matière organique** : améliore la résistance aux tassements grâce à la formation de complexes organo-minéraux stables qui confèrent au sol des propriétés plastiques [33].
- **Activité humaine** : travaux comme le déboisement ou les constructions modifient la stabilité en perturbant l'équilibre naturel [31] ;
- **Conditions climatiques** : les pluies, sécheresses et cycles gel/dégel affectent la cohésion et la structure du sol [32].

1.2.4. Stabilisation et amélioration des sols

Face à la rareté des terrains naturellement adaptés à la construction, due à la croissance démographique et au développement des infrastructures, le recours à la stabilisation des sols devient souvent nécessaire pour améliorer leurs propriétés géotechniques insuffisantes.

La stabilisation des sols est une méthode visant à améliorer les propriétés physiques et mécaniques d'un sol afin de le rendre plus adapté aux besoins de la construction. Ce processus augmente la résistance au cisaillement, améliore la portance et le contrôle des variations de volume du sol [34].

Cela peut être réalisé par des méthodes mécaniques ou chimiques, en fonction des besoins spécifiques du projet, notamment à travers les approches suivantes :

- **Stabilisation mécanique**

Le compactage du sol reste l'une des méthodes les plus couramment employées pour améliorer la densité et la cohésion du terrain. Des études montrent que le compactage, lorsqu'il est bien contrôlé, augmente la portance du sol en réduisant l'air interstitiel. Parallèlement, l'utilisation de géosynthétiques, tels que les géogrilles et géotextiles, renforce les couches de sol et réduit les tassements (Figure 1.9) [35].



a. Géotextile



b. Géogrille

Figure 1.9: Stabilisation des sols par l'utilisation de géosynthétiques

- **Gestion du drainage**

L'eau est souvent à l'origine des problèmes de stabilité des sols. Des recherches indiquent que le drainage adéquat peut réduire considérablement les risques de glissements de terrain [36].

Les drains verticaux, illustrés dans la figure 1.10, sont utilisés pour l'amélioration des sols fins saturés en eau. La technique consiste à foncer verticalement dans le terrain, suivant un maillage régulier, un drain préfabriqué. Lors de la mise en charge du terrain, les drains facilitent l'évacuation de l'eau interstitielle jusqu'à la surface, permettant ainsi une consolidation accélérée des sols traités [37].

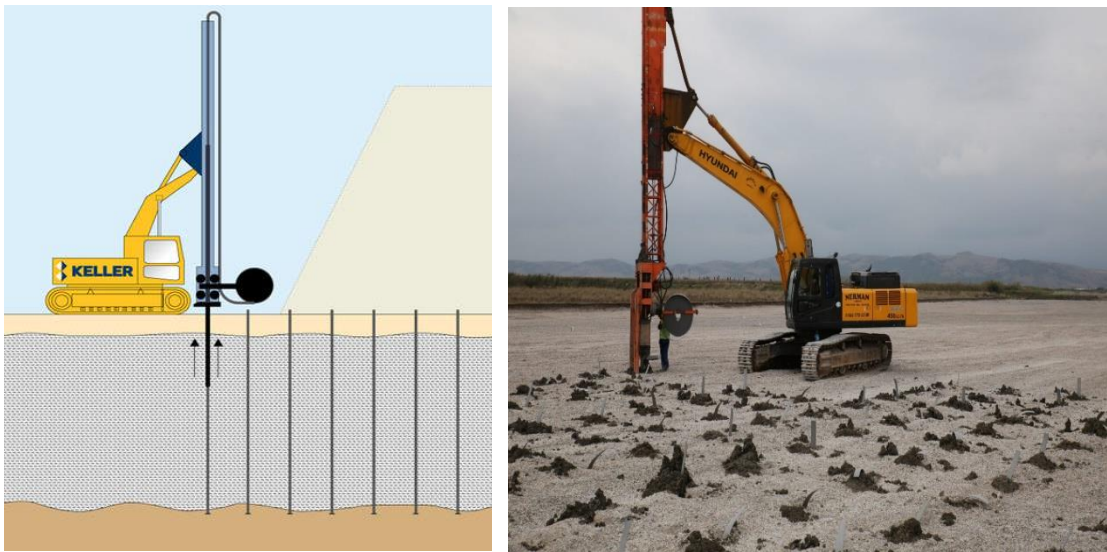


Figure 1.10 : Drains verticaux

- **Stabilisation chimique**

La consolidation chimique vise à traiter les terrains contenant des argiles ou des eaux agressives. La stabilisation par la chaux ou le ciment (Figure 1.11) transforme les propriétés physico-chimiques du sol en améliorant sa résistance et en réduisant les variations de volume (gonflement et retrait) [37].



Figure 1.11 : Stabilisation chimique des sols par l'ajout de la chaux et du ciment

1.3 Essais géotechniques

Les essais de laboratoire en géotechnique occupent une place essentielle dans l'étude des sols en vue de projets de construction. Ils permettent d'obtenir des données précises sur les caractéristiques physiques et mécaniques des sols, telles que la granulométrie, la plasticité, la compacité, la résistance au cisaillement ou encore la portance [38].

Ces informations sont indispensables pour comprendre le comportement des sols sous différentes sollicitations, prédire leur stabilité et évaluer les risques associés à une construction. En fournissant une base fiable pour la conception des ouvrages (routes, fondations, barrages, etc.), ces essais permettent d'optimiser les choix techniques, de garantir la sécurité des structures et de maîtriser les coûts de réalisation [38].

1.3.1 Essai Proctor

L'essai Proctor permet d'évaluer les conditions optimales de compactage d'un sol, c'est-à-dire la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale qu'il peut atteindre sous un effort de compactage donné. Cet essai, développé par l'ingénieur Ralph Proctor en 1933, est devenu une référence dans les travaux de terrassement [39].

1.3.1.1 But de l'essai

L'essai Proctor a pour objectif de déterminer la teneur en eau optimale (w_{opt}) permettant d'obtenir une densité sèche maximale ($\gamma_{d_{opt}}$) pour un sol donné, en reproduisant des conditions de compactage normalisées. Pour ce faire, plusieurs échantillons de sol sont compactés dans un moule normalisé à l'aide d'une dame de masse et de hauteur de chute définies et à différentes teneurs en eau conformément à la norme NF P 94-093 (figure 1.12), puis leurs densités sèches sont déterminées et représentées graphiquement en fonction de w . La courbe obtenue, en forme de cloche, atteint un maximum qui correspond à l'optimum Proctor [38].

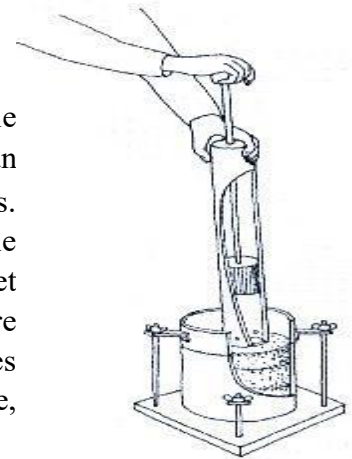


Figure 1.12 : Compactage à la dame manuelle

1.3.1.2 Matériel utilisé

- **Moule**

C'est un tube métallique cylindrique, ouvrable en deux demi-coquilles que l'on peut fixer sur une base, et muni d'une rehausse, comme illustré en figure 1.13 [40].

Il existe deux moules : le moule Proctor, utilisable pour les sols fins, et le moule CBR, utilisable dans tous les cas.

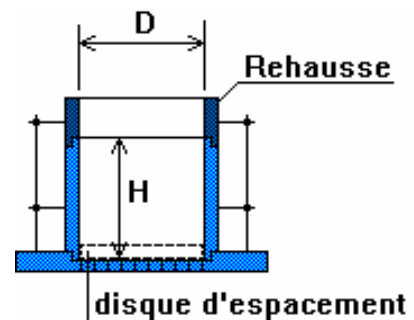


Figure 1.13 : Représentation du moule normalisé

Le tableau 1.3 résume les principales caractéristiques des moules utilisés [40] :

Tableau 1.3 : Dimensions des moules Proctor et CBR

Moule	Diamètre (mm)	Hauteur (mm)	Volume (cm ³)
Proctor	101,60	117 sans rehausse	948
CBR	152,00	152 sans rehausse dont disque d'espacement de 25,4 mm d'épaisseur, soit une hauteur utile de 126,6 mm	2 296

- **Dames**

Deux dames sont utilisées en fonction de l'intensité de compactage désiré :

- Une dame pour l'essai Proctor Normal (Résistance souhaitée relativement faible) ;
- Une dame pour l'essai Proctor Modifié (Forte résistance souhaitée).

La figure 1.14 montre la dame utilisée pour l'essai Proctor modifié :



Figure 1.14 : Exemple d'une dame utilisée pour l'essai Proctor modifié

- **Matériel d'usage courant**

- Bacs d'homogénéisation ;
- Tamis de 5 et 20 mm ;
- Truelle, spatule, pinceau ;
- Récipients pour la teneur en eau ;
- Balance (20 kg, ± 5 g) et balance de précision (200 g, $\pm 0,1$ g) ;
- Étuve à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

1.3.1.3 Principe de l'essai

La quantité de sol à prélever dépend du moule utilisé pour l'essai. La courbe de compactage étant définie par au moins 5 points de coordonnées (γ_d ; w), pour lesquels il est nécessaire de prélever un minimum de 15 kg de sol pour le moule Proctor et 30 kg pour le moule CBR. Le séchage du sol s'effectue soit à l'air libre, soit à l'étuve (pendant 24 heures à une température de 105°C). Après séchage, le matériau est tamisé à 20 mm et ensuite divisé en cinq fractions, chacune étant malaxée pour obtenir des parts homogènes [41].

Le choix du moule dépend de la dimension maximale des grains du sol $D_{\max}$:

- Si $D \leq 5$ mm : on utilise le moule Proctor (le moule CBR est toutefois recommandé).
- Si $5 \text{ mm} < D \leq 20$ mm : on utilise le moule CBR en conservant tous les constituants.
- Si $D > 20$ mm : on tamise à 20 mm et on pèse le refus :
Si le refus est ≤ 25 % : on réalise l'essai avec le moule CBR en utilisant le sol écrêté à 20 mm, puis on applique une correction sur les résultats.

Si le refus est $> 25 \%$: l'essai Proctor ne peut pas être réalisé.

Lorsque on utilise le moule Proctor, chaque couche est compactée à l'aide de 25 coups de dame. Ces coups sont répartis de manière précise : on effectue six cycles de quatre coups, chacun dans un quadrant différent du moule, ce qui fait un total de 24 coups. Le 25^{ème} coup est appliqué au centre pour finaliser la couche [42].

Pour le moule CBR, la méthode de compactage est différente. Chaque couche est soumise à 56 coups. On commence par appliquer six coups en cercle puis un coup au milieu répété 8 fois (figure 1.15) [42].

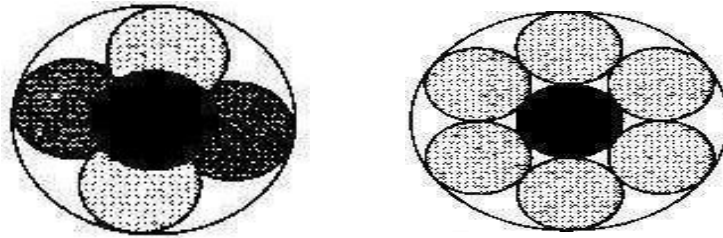


Figure 1.15 : Répartition des coups de dame par couche dans les moules Proctor et CBR

1.3.1.4 Interprétation d'une courbe Proctor

La courbe Proctor représente la densité sèche en fonction de la teneur en eau. Elle a généralement une forme en cloche. Le sommet de la courbe indique la densité sèche maximale ($\gamma_{d_{max}}$) et la teneur en eau optimale (w_{opt}) correspondante. La partie ascendante de la courbe montre que l'ajout d'eau facilite le compactage en réduisant les forces capillaires. Au-delà de l'optimum, la densité diminue car l'excès d'eau empêche une compaction efficace. La forme de la courbe varie selon le type de sol : plus plate pour les sols granulaires, plus prononcée pour les sols argileux [43].

La figure 1.16 présente la forme classique d'une courbe Proctor :

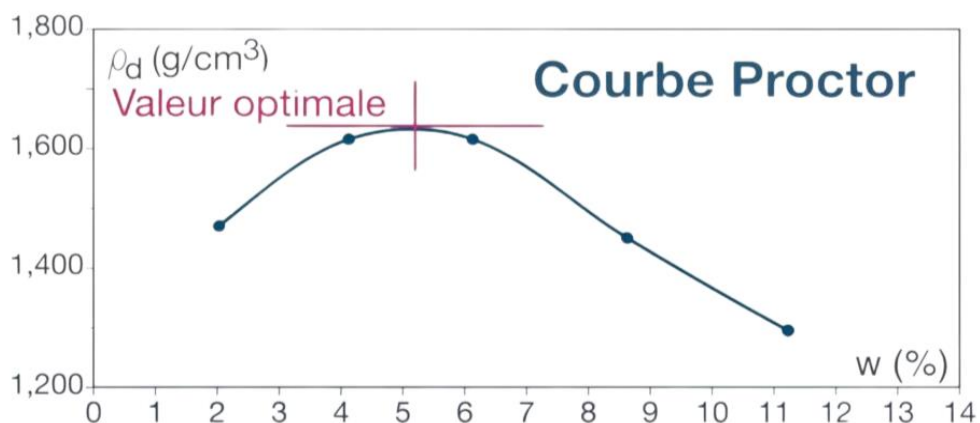


Figure 1.16 : Exemple d'une courbe Proctor typique

1.3.2 Essai CBR (California Bearing Ratio)

L'indice CBR est un pourcentage qui exprime le rapport entre la pression nécessaire pour produire un enfoncement donné dans un sol étudié et celle requise pour obtenir le même enfoncement dans un matériau de référence standard, généralement un gravier concassé. Cet indice permet d'évaluer la portance du sol, c'est-à-dire sa capacité à supporter des charges. On distingue deux types d'essais CBR réalisés selon les objectifs recherchés [38] :

- L'essai CBR immédiat, réalisé pour mesurer la résistance au poinçonnement du sol dans l'état où il se trouve sur le chantier. Ce type d'essai est particulièrement utilisé dans les régions peu humides, où les conditions hydriques sont relativement stables.
- L'essai CBR après imbibition : réalisé sur un sol compacté, puis immergé pendant environ 4 jours. Il permet d'évaluer la portance du sol en conditions humides, en tenant compte des variations possibles du régime hydrique.

1.3.2.1 But de l'essai

L'essai CBR a pour objectif de déterminer un indice de portance permettant, à l'aide d'abaques, de dimensionner l'épaisseur du corps de chaussée d'une route. Ce paramètre est déterminé de manière empirique, spécifiquement pour les sols à usage routier. Après avoir compacté le sol selon les conditions de l'essai Proctor modifié, celui-ci est soumis à différentes conditions d'humidité simulées, correspondant aux scénarios possibles sur le terrain [44].

1.3.2.2 Matériel nécessaire

La réalisation d'un essai CBR nécessite un ensemble d'équipements spécifiques, regroupés en deux catégories principales : le matériel de préparation et de mesure, et le matériel dédié au suivi du gonflement et au poinçonnement [44].

• Matériel de préparation et de mesure

- Équipement pour l'essai Proctor modifié, avec un moule adapté à l'essai CBR ;
- Tamis de 20 mm, utilisé pour le contrôle granulométrique ;
- Petits récipients, destinés au prélèvement des échantillons pour la détermination de la teneur en eau ;
- Balance de portée 10 kg, avec une précision de ± 1 g ;
- Balance de précision (portée 200 g), pour les mesures de teneur en eau ;
- Étuve thermostatique réglée à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, utilisée pour le séchage des échantillons.

• Matériel pour le gonflement et le poinçonnement

- Plateau de gonflement, placé en surface de l'échantillon pour suivre les variations de hauteur liées à l'imbibition ;
- Support muni d'un comparateur monté directement sur le moule ou sur une hausse selon le nombre de surcharges utilisées ;
- Disque de papier filtre, à placer au fond du moule CBR pour empêcher la perte des fines du sol lors de l'essai ;
- Anneaux de surcharge, ce sont des éléments utilisés pour simuler le poids des matériaux en surface ;

- Trousse coupante adaptée au moule CBR pour prélever des échantillons en place directement par carottage.

La figure 1.17 présente les différents éléments constituant le dispositif utilisé pour réaliser l'essai CBR :

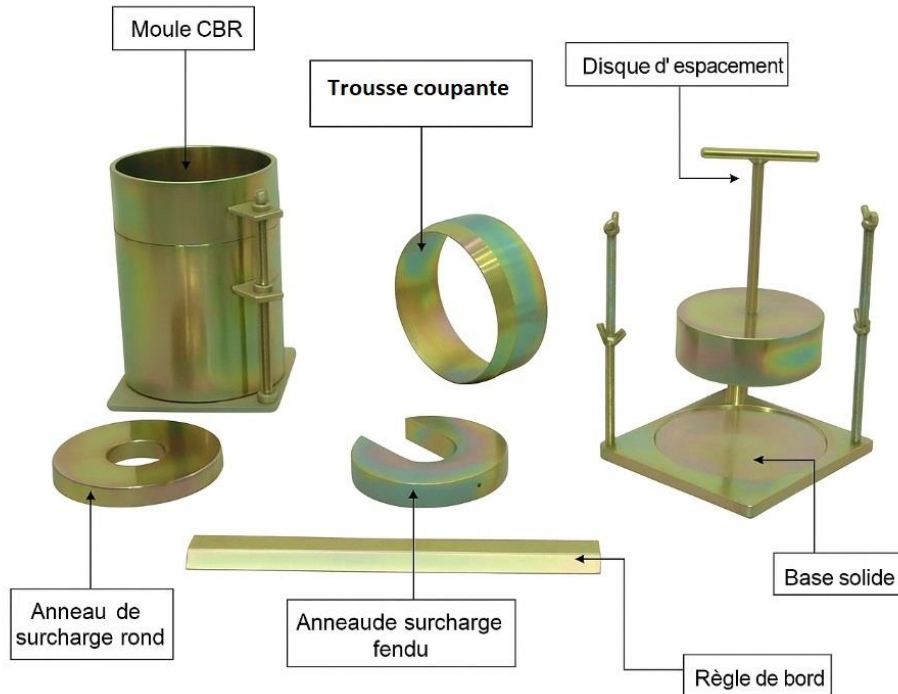


Figure 1.17 : éléments composants l'appareil des essais CBR

1.3.2.3 Principe de l'essai

Avant de réaliser l'essai CBR, le matériau doit être compacté selon les conditions de l'essai Proctor modifié. Il est donc indispensable de réaliser cet essai au préalable, afin de déterminer deux paramètres : la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale du matériau. Une fois ces paramètres connus, on prépare le sol à la teneur en eau optimale, puis on le compacte dans le moule CBR selon les spécifications du Proctor modifié pour garantir que l'échantillon est dans un état représentatif de sa densité sur chantier [38].

• Imbibition

L'objectif de l'imbibition est de simuler les pires conditions hydriques que le sol pourrait rencontrer en service, et de mesurer le gonflement éventuel du matériau. Trois cas d'imbibition peuvent être envisagés [44] :

- Sol sec sans risque hydrique : Aucun traitement d'imbibition. L'essai est réalisé directement à la teneur en eau optimale.
- Sol en zone humide ou soumis à de fortes remontées capillaires : Imbibition complète, poursuivie jusqu'à ce que la variation d'épaisseur soit inférieure à 0,003 mm/24 h.

- Cas général (le plus courant) : Imbibition pendant 4 jours.

- **Poinçonnement**

Après l'étape d'imbibition, on procède à l'essai de poinçonnement à l'aide d'une presse équipée d'un piston de poinçonnement de diamètre 4,96 cm (soit une section de 19,3 cm²). La presse est munie d'un contrôleur de cadence et d'un comparateur pour mesurer l'enfoncement avec une précision de 1/100 mm comme montré dans la figure 1.18 [45].

Immédiatement après le poinçonnement, il est indispensable de déterminer la teneur en eau résiduelle de l'échantillon. Pour cela, on effectue au moins deux prélèvements dans la zone compactée, de part et d'autre de l'empreinte laissée par le piston [46].



Figure 1.18 : Presse de poinçonnement CBR automatisée

1.3.3 Essai œdométrique

L'essai œdométrique constitue l'un des piliers fondamentaux de la géotechnique moderne. Il joue un rôle essentiel dans l'analyse du comportement mécanique des sols, notamment en ce qui concerne l'estimation des tassements affectant les ouvrages en terre, les fondations et les remblais. Grâce à cet essai, les ingénieurs peuvent modéliser de manière fiable les déformations différées des sols sous l'effet de charges [44].

L'essai œdométrique, tel qu'il est connu aujourd'hui, a été introduit en 1970 par Huder et Amberg. Il permet d'évaluer les propriétés de tassement et de gonflement des sols au cours du temps. Sa mise en œuvre est encadrée par la norme ISO 17892-5, qui définit les méthodes d'essai pour les sols en laboratoire dans un contexte géotechnique [47].

1.3.3.1 But de l'essai

L'essai œdométrique a pour objectif de reproduire en laboratoire les conditions de chargement rencontrées par un sol in situ, dans le but de déterminer ses caractéristiques de compressibilité et de consolidation. Il repose sur l'application de charges verticales croissantes et décroissantes sur un échantillon de sol contenu dans une cellule œdométrique rigide [48].

Au cours de l'essai, des paliers de chargement sont appliqués à l'aide d'un piston, chaque palier durant en général 24 heures. Durant ce laps de temps, la variation de la hauteur de l'échantillon est enregistrée en fonction du temps, permettant de suivre l'évolution du tassement. On considère qu'à l'issue des 24 heures, la consolidation primaire est globalement achevée pour la contrainte appliquée. Le cycle de chargement se poursuit ensuite, chaque nouvelle contrainte étant généralement le double de la précédente. À chaque étape, le même protocole de mesure est suivi afin de tracer la courbe de consolidation et d'extraire les paramètres géotechniques du sol étudié [48].

1.3.3.2 Matériel nécessaire

La réalisation d'un essai œdométrique nécessite un ensemble d'équipements spécifiques permettant de simuler en laboratoire les conditions de chargement vertical subies par un sol en place. Le dispositif se compose des éléments suivants [49] :

- L'œdomètre (appareil de consolidation) : instrument principal permettant l'application contrôlée de charges verticales.
- La cellule œdométrique, composée d'une bague cylindrique rigide recevant l'échantillon, un réservoir d'eau qui assure la saturation de l'échantillon pendant l'essai, et deux pierres poreuses, permettant l'évacuation de l'eau interstitielle par des orifices de drainage.

Les deux éléments sont illustrés dans la figure 1.19 :



Figure 1.19 : Cellule œdométrique et œdomètre

La figure 1.20 présente un schéma du dispositif expérimental de l'essai œdométrique. :

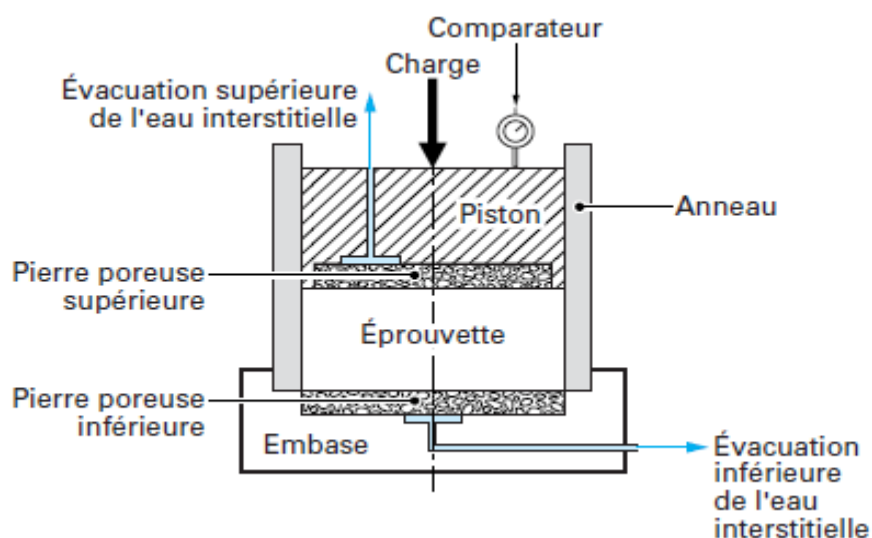


Figure 1.20 : Dispositif expérimental de l'essai œdométrique

1.3.3.3 Principe de l'essai

Pour le prélèvement, un échantillon intact est privilégié, afin de refléter fidèlement les propriétés mécaniques du sol en place. Pour les sols cohérents, on utilise généralement une bague œdométrique équipée d'une trousse coupante amovible pour extraire l'échantillon sans perturbation.

Si l'échantillon n'a pas été directement prélevé avec la bague, il est taillé manuellement aux dimensions requises (typiquement 50–70 mm de diamètre pour environ 20 mm de hauteur), puis arasé soigneusement sur ses deux faces.

Avant l'essai, il est indispensable de mesurer la hauteur, le diamètre et le poids de l'échantillon. La teneur en eau initiale peut être déterminée à partir des résidus de sol non utilisés.

1.3.3.4 Interprétation des résultats

L'essai œdométrique permet d'obtenir deux courbes fondamentales pour l'analyse du comportement des sols soumis à des charges verticales : la courbe de consolidation et la courbe de compressibilité. Ces représentations graphiques sont construites à partir des données relevées pendant l'essai et sont essentielles pour interpréter les mécanismes de tassement et de déformation des sols [50].

- **Courbe de consolidation**

Cette courbe montrée dans la figure 1.21 permet de visualiser la déformation verticale de l'échantillon de sol en fonction du temps, sous une charge constante. Elle est généralement tracée selon une échelle semi-logarithmique où l'axe horizontal représente le logarithme du temps ($\log t$), tandis que l'axe vertical représente la variation de hauteur de l'échantillon (Δh),

Les informations clés obtenues à partir de cette courbe sont [51] :

- Le coefficient de consolidation (C_v) : Ce paramètre exprime la vitesse à laquelle le sol se consolide. Une valeur élevée indique une consolidation rapide, ce qui est favorable à la stabilité des ouvrages
- La fin de la consolidation primaire : Elle correspond au moment où la majeure partie de l'eau interstitielle a été évacuée. Cela se traduit par un changement de pente sur la courbe, la déformation devenant plus lente et marquant le début de la consolidation secondaire.

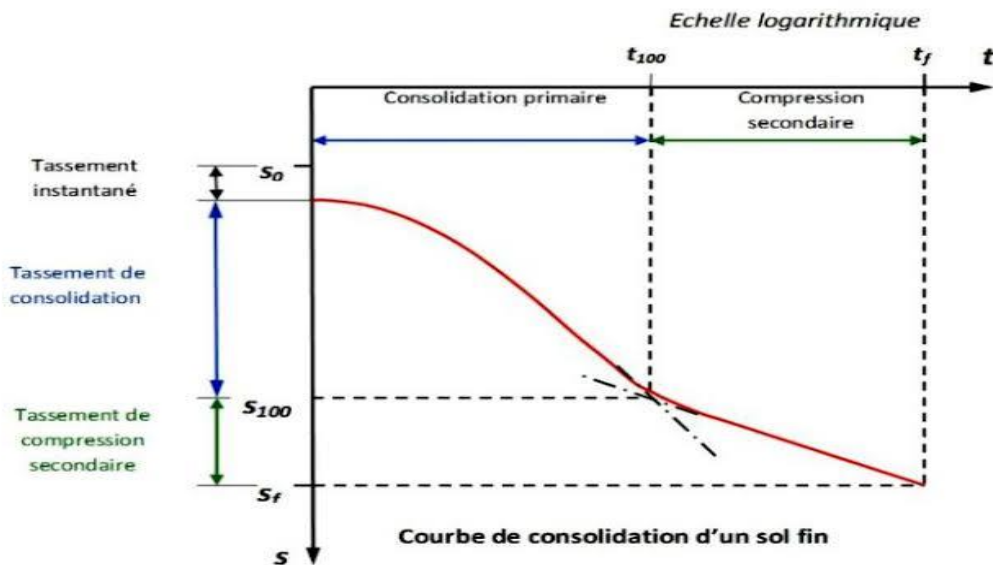


Figure 1.21 : Exemple d'une courbe de consolidation

• Courbe de compressibilité

La courbe de compressibilité, illustrée dans la figure 1.22, décrit la relation entre la pression effective appliquée et l'indice des vides du sol $e = f(\log \sigma')$, elle est tracée selon une échelle semi-logarithmique. Cette courbe permet d'analyser la compressibilité du sol à travers les cycles de chargement et de déchargement. Elle est utilisée pour déterminer des paramètres géotechniques importants, tels que [50] :

- Le coefficient de compression (C_c), qui permet d'évaluer la compressibilité d'un sol normalement consolidé. Il est déterminé à partir de la pente de la partie vierge de la courbe correspondant à la phase de compression primaire.
- Le coefficient de gonflement (C_g), qui traduit la capacité du sol à reprendre du volume, une valeur élevée indique un sol sujet au rebond ou au gonflement lors de l'allègement de la charge.

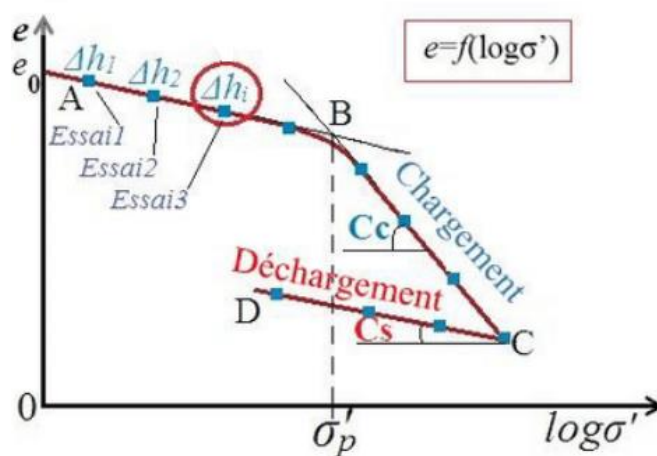


Figure 1.22 : Exemple d'une courbe de consolidation

1.3.4 Essai de cisaillement

1.3.4.1 Définition

On peut identifier dans les sols trois principaux types de sollicitations : par traction, compression ou cisaillement, schématisés ci-dessous (voir la figure 1.23) [51] :

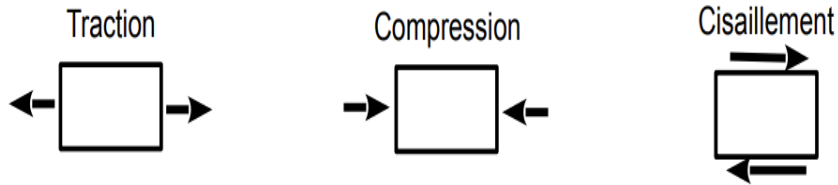


Figure 1.23 : Les trois principaux types de sollicitations des sols

Étant donné que la principale source de sollicitation dans les sols provient de la gravité terrestre, qui engendre des efforts verticaux orientés vers le bas, il est intuitivement compréhensible que les contraintes de traction soient généralement absentes. Par ailleurs, les sols présentent une résistance à la compression supérieure à leur résistance au cisaillement. Ainsi, pour le dimensionnement des ouvrages de génie civil, tels que les fondations, il est généralement suffisant de connaître la résistance au cisaillement du sol, car une éventuelle rupture se produira selon ce mode de sollicitation [51].

- **Contrainte normale et contrainte de cisaillement**

En un point M d'un milieu continu (soit ici notre échantillon de sol) on considère une facette d'aire dS infiniment petite et de normale $\vec{n}$ qui sépare le milieu en deux parties notées (1) et (2). On admet que l'action de la partie (1) sur (2) se traduit au point M, sur la facette dS , par une contrainte notée $\vec{e}$. Le vecteur contrainte $\vec{e}$ se décompose, par rapport au repère lié à la facette dS , en une composante normale σ (suivant $\vec{n}$) et une composante tangentielle τ (comprise dans le plan de la facette) aussi appelée contrainte de cisaillement (figure 1.24).

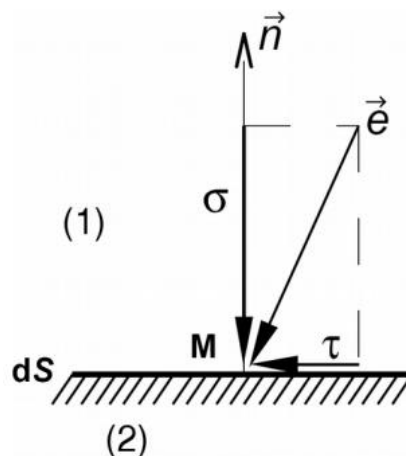


Figure 1.24: Représentation des contraintes normales et de cisaillement

Il y a rupture d'un sol par cisaillement lorsque la contrainte de cisaillement τ devient trop importante. La contrainte de cisaillement maximum que peut supporter un sol (correspondant donc à la rupture) dépend de l'intensité de la contrainte normale [51].

- **Critère de Mohr-Coulomb**

Le plan de Mohr est une représentation plane de l'état de contrainte dans des axes liés à la facette. Chacun des états de rupture dans un sol peut être caractérisé par un couple τ_r et σ_r représenté par un point sur le plan de Mohr [51]. L'ensemble des points représentant différents états de rupture forme une courbe à peu près rectiligne qui sépare le plan de Mohr en deux domaines (Figure 1.25) :

- Le domaine sous cette courbe représente l'ensemble des états de contrainte que peut supporter le sol ;
- Le domaine au-dessus de la courbe représente l'ensemble des états de contrainte non accessibles par le sol (le sol entre en rupture avant).

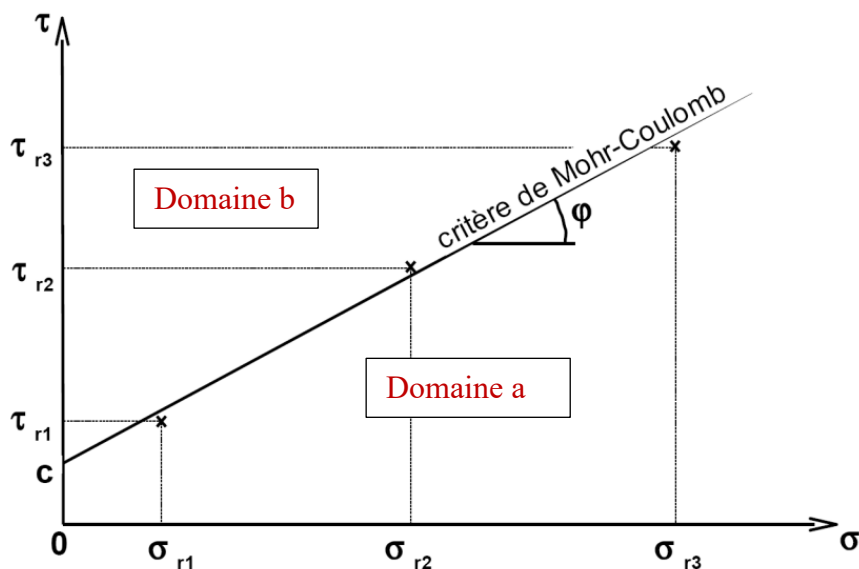


Figure 1.25 : Etats de rupture et critère de Mohr-Coulomb (Courbe intrinsèque)

Cette courbe est correctement approximée par une droite appelée critère de rupture de Mohr-Coulomb ou courbe intrinsèque, et elle est définie par l'équation :

$$\tau = \sigma \cdot \tan \varphi + c$$

- φ est appelé l'angle de frottement, il représente la pente de la droite et s'exprime en degré ;
- c est appelée la cohésion. Elle traduit l'effet de colle que l'on observe dans des argiles ou des sables partiellement saturés.

1.3.4.2 But de l'essai

L'essai de cisaillement direct permet d'obtenir des informations fondamentales sur les propriétés mécaniques d'un sol, en particulier son angle de frottement (φ) et sa cohésion (c). Ces deux paramètres, déduits à partir de la droite de Coulomb (ou droite intrinsèque), sont essentiels pour modéliser le comportement du sol et concevoir des ouvrages de génie civil. Ils permettent notamment de déterminer la contrainte admissible que le sol peut supporter [52] [53].

1.3.4.3 Principe de l'essai

Les caractéristiques de résistance au cisaillement d'un sol peuvent être déterminées à partir d'un essai de cisaillement à la "Boîte de Casagrande", comme montré dans la figure 1.26.

Un échantillon de sol, contenu dans une boîte, elle-même composée de deux demi-boîtes (pour fixer le plan de cisaillement), est soumis à une contrainte verticale σ avant d'être cisailé à vitesse constante. Par conséquent la contrainte de cisaillement τ s'accroît jusqu'à une valeur maximum que l'on mesure. On en déduit l'état de contrainte τ_r et σ_r de l'échantillon de sol à la rupture.

En réalisant plusieurs essais, sur un même matériau, avec différentes valeurs de contraintes verticales, on peut déterminer le critère de rupture de Mohr-Coulomb et définir ses valeurs de cohésion c et d'angle de frottement φ [51].

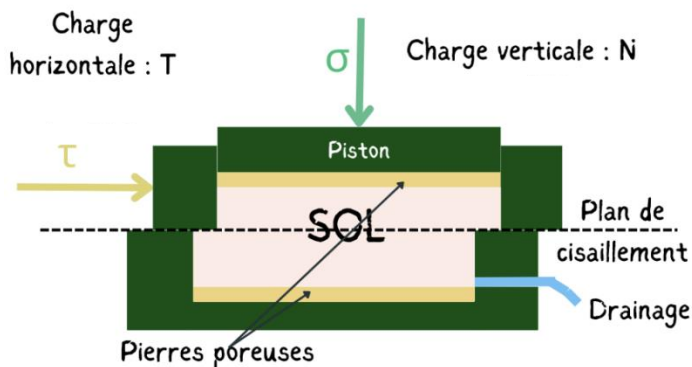


Figure 1.26 : Principe de l'essai de cisaillement

Pour un plan de cisaillement de section s :

- La charge verticale, notée N , est maintenue constante tout au long de l'essai, et la contrainte normale est donnée par : $\sigma = N/s$;
- La charge horizontale de cisaillement, notée T , est mesurée au cours de l'essai, et la contrainte de cisaillement est calculée selon : $\tau = T/s$.

1.3.4.4 Appareillage

L'appareil de cisaillement direct est le cœur du dispositif expérimental. Il se compose de plusieurs éléments essentiels [54] :

- **Boîte de cisaillement** : Généralement en métal, divisée en deux parties horizontales pouvant glisser l'une par rapport à l'autre ;
- **Système de chargement** : Pour appliquer la contrainte normale et la force de cisaillement ;
- **Capteurs** : Pour mesurer la force horizontale de cisaillement T , le déplacement horizontal et le déplacement vertical du piston.

1.3.4.5 Traçage des courbes

L'essai est réalisé sur au minimum trois fois en augmentant à chaque fois la contrainte normale appliquée ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$).

On obtient ainsi les courbes de cisaillement contrainte-déformation (figure 1.27) et l'on peut en déduire la droite intrinsèque ($\tau_r ; \sigma_r$) pour les valeurs à la rupture et à l'état critique. Il est alors simple de déterminer l'angle de frottement φ et la cohésion c , respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite [55].

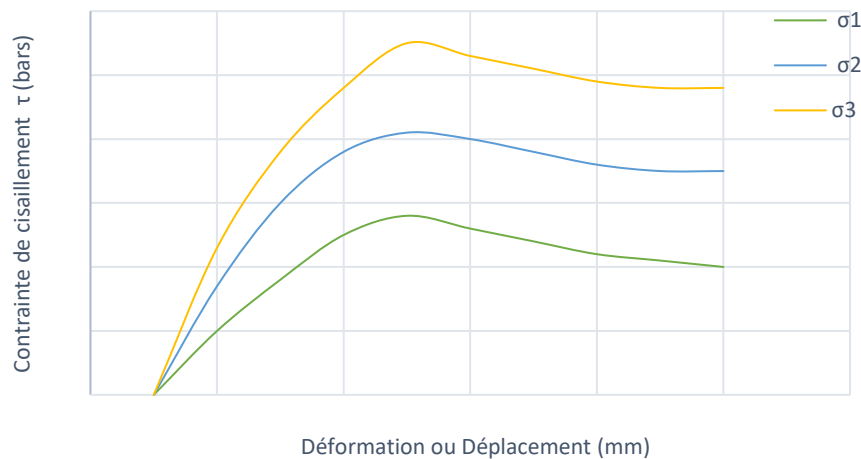


Figure 1.27 : Courbe contrainte-déformation

Dans certains sols (argile très molle, par exemple), la courbe effort-déformation peut ne pas présenter de pic net de rupture, et la contrainte maximale est alors prise comme la contrainte à rupture conventionnelle, souvent définie à un déplacement donné (6 mm) [56].

1.4 Valorisation matière des déchets pneumatiques

1.4.1 Introduction

Dans un contexte mondial marqué par une pollution croissante et une production toujours plus importante de déchets, la gestion des pneus hors d'usage (PHU) devient un défi environnemental et économique crucial. Une étude couvrant 51 pays révèle que plus de 17 millions de tonnes de pneus usagés sont collectées chaque année, laissant 8 millions de tonnes non traitées [56]. Avec environ 1,5 milliard de pneus produits par an, soit près de 17 millions de tonnes de déchets générés, le traitement durable de ces résidus est devenu incontournable.

En Algérie, la croissance constante du parc automobile a entraîné la production de 288 216 tonnes de pneus usagés en 2018 (figure 1.28), avec des projections dépassant les 650 000 tonnes en 2025 (Agence Nationale des Déchets) [59]. Ces chiffres soulignent l'urgence de mettre en place des solutions durables.

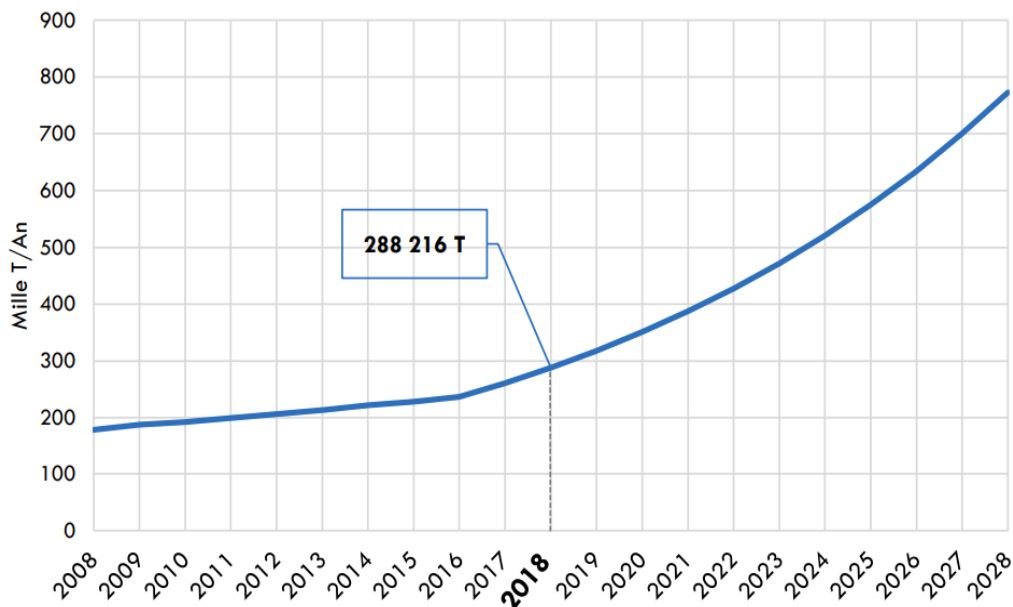


Figure 1.28 : Evolution quantitative des pneus usagés à l'échelle nationale [28]

Les propriétés des pneus, comme la résistance aux dommages mécaniques et la longue durée de vie quelles que soient les conditions météorologiques, rendent leur élimination très difficile. Le caoutchouc est résistant à l'abrasion et à l'eau. Il résiste également à la chaleur, à l'électricité, à de nombreux produits chimiques et aux bactéries également. En effet, les micro-organismes ont besoin de plus de 100 ans pour détruire les pneus [58]. Abandonnés dans la nature, ils peuvent mettre des siècles à se décomposer, polluant ainsi les sols et les nappes phréatiques.

Dans ce contexte, la valorisation matière émerge comme une stratégie essentielle. Elle consiste à récupérer et réutiliser les constituants des pneus (caoutchouc, acier, fibres textiles) pour fabriquer de nouveaux produits. Cette approche permet de réduire le volume des déchets, d'éviter l'enfouissement ou l'incinération, et de limiter les émissions de gaz à effet de serre liées à la production de matériaux vierges, contribuant ainsi à la préservation des ressources naturelles et à l'atténuation du changement climatique.

D'un point de vue économique, les retombées sont également substantielles. Le recyclage des pneus usagés alimente une filière industrielle en pleine croissance, génératrice d'emplois directs et indirects [59]. Le développement d'entreprises spécialisées dans le recyclage du caoutchouc stimule l'économie circulaire locale, tout en valorisant les produits issus du recyclage sur des marchés structurés. Cela permet de réduire la dépendance aux matières premières importées et de diminuer les coûts de gestion des déchets.

En résumé, la valorisation matière des pneus usagés s'impose comme une solution durable alliant performance environnementale et retombées économiques positives. Ce chapitre se propose d'explorer ses étapes clés, les produits issus du recyclage, ainsi que les bénéfices et défis associés à cette démarche.

1.4.2 Étapes de transformation des PUNR

- **Collecte et stockage des PUNR**

Les PUNR sont récupérés par les collecteurs qui les livrent à des usines de recyclage par camions. Le stockage des pneus usagés collectés se fait dans des endroits spécifiques, en plusieurs lots séparés, pour réduire le risque d'incendie et de pollution (Figure 1.29).



Figure 1.29 : Stockage des PUNR chez RECYTECH

- **Tri et préparation des PUNR**

Le tri de pneus usagés est effectué par séparation de pneus par type (véhicules légers, motos, poids-lourds, pneus agricoles, génie civil, engins ...etc), les pneus doivent être bien nettoyés et bien rincés pour les débarrasser de toute saleté, puis les amener à la phase de detringlage qui permet de retirer l'acier d'armature des pneus, enfin la phase de cisailage où les pneus usagés sont découpés en morceaux ou en parties de pneus réguliers avant d'être acheminés vers le pré-broyeur [60].

1.4.3 Traitement des PUNR

Le traitement des pneus usagés passe par plusieurs étapes [60] :

- **Pré-broyage** : les pneus issus de la phase de préparation sont découpés en copeaux hétérogènes et irréguliers de différentes dimensions appelés broyats.
- **Broyage** : les broyats sont divisés en particules plus fines, afin d'augmenter leur surface spécifique (la surface par unité de masse) et donc leur réactivité, tandis que les éléments métalliques (acier) sont extraits à l'aide de séparateurs magnétiques.
- **Granulation** : les particules sont calibrées par tamisage pour obtenir des mélanges homogènes des granulés de caoutchouc de taille inférieure à 5 mm, et les matières dont le diamètre est supérieur à 5 mm sont renvoyées vers le broyeur. Durant cette phase, les fibres textiles sont également séparées.
- **Meulage** : les granulés sont broyés en poudrette très fine de taille inférieure à 0,8 mm.

Lors du recyclage des pneus, plusieurs méthodes de séparation sont utilisées :

- **Séparation magnétique** : permet d'extraire l'acier contenu dans les pneus après le broyage, grâce à des aimants puissants.
- **Tamisage** : trie les granulés de caoutchouc selon leur taille après granulation.
- **Aspiration ou séparation aéraulique** : utilisée pour séparer les fibres textiles plus légères des granulés de caoutchouc.

Ces étapes sont résumées dans la figure 1.30 :

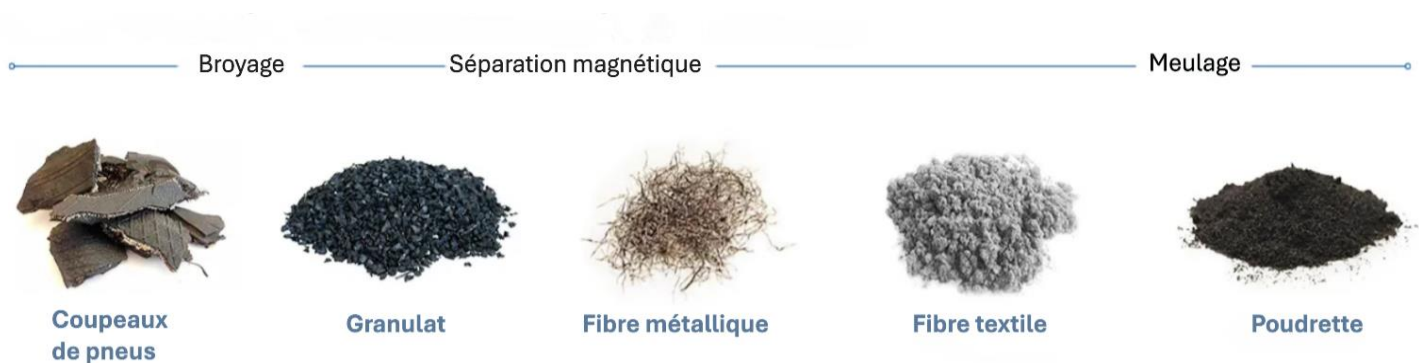


Figure 1.30 : Les étapes et les produits issus de la transformation des PUNR

1.4.4 Produits issus du recyclage des pneus

- **Granulats de caoutchouc**

Il s'agit de particules de caoutchouc dont la granulométrie varie de 0.5 à 4 mm. Ils peuvent être utilisés pour les aires de jeux qui doivent être amortissantes, les pavés antidérapants, les revêtements pour terrains de sport, ...etc.

- **Poudrettes de caoutchouc**

Il s'agit de particules de caoutchoucs dont la dimension varie de 0 à 0.8 mm. La poudre de caoutchouc est utilisée par exemple pour la fabrication de bandages et de roues pleines (Poubelles, tondeuses, brouettes...), pour la modification des revêtements routiers.

- **Fibres métalliques**

Le pneu contient en moyenne 15 à 25 % d'acier, sous forme de nappe tissée pour renforcer la carcasse. L'acier issu d'extraction magnétique à partir du broyat de pneu est revalorisé dans l'industrie sidérurgique.

- **Fibres textiles**

Le textile est le nom d'une matière plastique de type polyamide utilisée généralement comme fibre textile dans la fabrication de pneus. Le nylon provient du process d'extraction par aspiration après séparation. La fibre textile est à son tour recyclée pour être utilisée pour la fabrication de nouveaux produits textiles (fabrication de feutres, de renforts acoustiques ou thermiques, etc).

1.4.5 Avantages de valorisation des pneus usagés

La mise en place de systèmes de recyclage pour les pneus présente des avantages multiples tant sur le plan économique qu'écologique.

- **Avantages environnementaux**

En valorisant les pneus usagés, on réduit substantiellement le volume de déchets envoyés en décharge. De plus, le recyclage limite l'abandon sauvage des pneus, qui contribue à la pollution visuelle, à la dégradation des sols et à la contamination des nappes phréatiques. Les pneus, très résistants aux agressions chimiques et biologiques, mettent plusieurs siècles à se décomposer naturellement, ce qui aggrave leur impact environnemental lorsqu'ils sont mal gérés.

Les stocks de pneus non traités représentent également un danger environnemental majeur, comme en témoignent les incendies survenus dans des décharges comme celui de Seseña en Espagne (2016), où plus de 70 000 tonnes de pneus ont brûlé, libérant dans l'atmosphère des fumées toxiques et des composés cancérigènes (hydrocarbures aromatiques polycycliques, dioxines, etc) [61]. La figure 1.31 illustre cet événement marquant.



Figure 1.31 : Incendie dans une décharge de pneus en Espagne [60]

Face à ces risques, la valorisation matière des pneus usagés non réutilisables (PUNR) constitue une alternative nettement plus écologique que l'enfouissement ou l'incinération. Contrairement à l'enfouissement, qui n'offre aucune récupération de ressources et engendre des pollutions souterraines, ou à l'incinération, qui génère des émissions atmosphériques problématiques, la valorisation matière permet de transformer les composants des pneus (caoutchouc, acier, fibres textiles) en matières premières secondaires utiles. Ce procédé permet non seulement de réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi de préserver les ressources fossiles, comme le pétrole, utilisé pour produire le caoutchouc synthétique.

- **Avantages économiques**

Le développement du secteur du recyclage des pneus entraîne la création de chaînes d'approvisionnement spécifiques, impliquant plusieurs acteurs : sociétés de collecte, entreprises de traitement et unités de production utilisant des matériaux recyclés. Ces nouvelles filières économiques génèrent des emplois locaux et stimulent l'économie circulaire.

En Algérie, plusieurs entreprises ont émergé dans cette dynamique, opérant à différentes étapes du traitement et de la valorisation matière des pneus usagés, participant activement à la construction d'une économie circulaire. Le tableau 1.4 illustre des exemples d'acteurs engagés dans cette filière [62] :

Tableau 1.4 : Liste des entreprises algériennes spécialisées dans le recyclage des pneus usagés

N°	Dénomination	Adresse	Wilaya
1	SARL HOUARA GRAND	Commune de Teleghma	Mila
2	SARL RECYTECH	Zone d'Activité Elhachemia	Bouira
3	SARL MAPLAC RÉCUPÉRATION	Ouled Brahim lot N°05 groupe N°45 Hammadi	Boumerdès
4	ETS BOUADJAJ MOHAMED AMINE	Propriété n°06 part 176, Commune de Mostaganem	Mostaganem
5	SARL RECYCLOR ALGÉRIE	Zone d'activités Bouteliles	Oran
6	EURL JETE GRAIN	Ain Defla	Ain Defla
7	ETS KOUTI EL HOUARI	Cité 400 logs Sidi Abaz B.P 348, Commune Bennoura	Ghardaïa
8	SARL ALGERIA TIRES RECOVERY CO.	Cité 40 logs, route de Bordj, Commune de M'Sila	M'Sila
9	SARL ROAD GOM	24 Lotissement Boushaki E, Bab Ezzouar	Alger
10	ETS MOSTFAOUI NACIR	Cité Si Smail lot n°02, Bordj El Kifan	Alger

1.4.6 Limites et défis du recyclage des pneus usagés

- **Coûts élevés du processus de recyclage**

Les opérations de collecte, de tri et de transformation des pneus usagés nécessitent des investissements considérables en infrastructures et en technologies, ce qui peut freiner la rentabilité économique du recyclage. De plus, étant donné que 75 % du volume des pneus usagés correspond à de l'espace vide, leur transport et leur stockage génèrent des coûts logistiques importants [61].

- **Enjeu sanitaire**

Malgré les bénéfices environnementaux et économiques liés à la valorisation matière des pneus usagés, des préoccupations sanitaires émergent concernant l'utilisation des granulats de caoutchouc issus de leur broyage. Plusieurs études ont mis en évidence la présence de substances dangereuses, parfois cancérigènes, telles que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les phtalates, les métaux lourds et les composés organiques volatils (COV) [65]. Ces composants se retrouvent notamment dans les revêtements utilisés pour les terrains de sport synthétiques, les aires de jeux pour enfants ou certains sols techniques, exposant les usagers en particulier les plus jeunes à des risques potentiels pour la santé.

À l'extérieur, les surfaces en gazon artificiel peuvent atteindre jusqu'à 60 °C, température à laquelle des composés organiques semi-volatils peuvent être libérés dans l'air ambiant. L'exposition à ces substances dépend de plusieurs facteurs : fréquence et durée d'utilisation des terrains, contact entre les mains et les surfaces, ainsi que contact main-bouche chez les enfants [64].

- **Enjeu environnemental**

Les pneus usagés sont très résistants et extrêmement inflammables. S'ils s'accumulent pendant une longue période, le risque est grand qu'un incendie catastrophique se déclare, entraînant le dégagement d'importantes quantités de fumée, d'hydrocarbures et de métaux toxiques, ainsi que la propagation de la contamination dans le sol et les eaux souterraines. En outre, la zone vide à l'intérieur des pneus constitue une plate-forme idéale pour la collecte d'eau, un habitat pour les rongeurs, les insectes et les reptiles, ce qui peut entraîner la propagation de maladies [65].

Le schéma 1.32 présente une synthèse des impacts liés au recyclage des pneus usagés :



Figure 1.32 : Schéma récapitulatif des effets environnementaux et sanitaires du recyclage des pneus usagés

1.4.7 Gestion et recyclage des pneus en Algérie – exemple de l'entreprise Recytech

C'est une entreprise algérienne spécialisée dans le recyclage et la valorisation de pneus usagés. Les Pneumatiques Usagés Non Réutilisables (PUNR) sont qualifiés de déchets

spéciaux non dangereux selon le classement des déchets en Algérie, (Décret exécutif n° 06-104 du 29 Moharram 1427, correspondant au 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux).

C'est une usine moderne créée en 2013 en application du Décret exécutif n°03-477 du 09 décembre 2003 fixant les modalités et les procédures d'élaboration, de publication et de révision du plan national de gestion déchets spéciaux.

L'usine est située en bordure de la route de HAMMAM KSENA – SEDDARA dans la commune D'EL-HACHIMIA, Wilaya de BOUIRA. Elle se situe donc à un carrefour du réseau routier national. Le choix du site a été fait pour optimiser l'approvisionnement de l'usine en pneus usagés en provenance de l'ensemble du territoire national [59].

Adoptant la politique « zéro déchet », Recytech est le principal organisme qui prend en charge le recyclage et la valorisation des PUNR en Algérie. L'entreprise prend en charge près de 12 000 tonnes de PUNR/an. Au-delà de l'aspect environnemental, Recytech a pour objectif de contribuer à la création d'une économie industrielle aux principes environnementaux. Elle vise à devenir un acteur important dans la chaîne d'approvisionnement régional, national et international en matières premières et produits dérivés en caoutchouc issus du recyclage. Son activité première est le recyclage mécanique qui permet de transformer le PUNR en quatre sous-produits :

- Granulés de caoutchouc de différents diamètres ;
- Poudrette de caoutchouc ;
- Fibres d'acier ;
- Fibres textiles.

Le pneu usagé passe donc grâce à son recyclage d'un déchet spécial à des sous-produits recherchés pour être utilisés dans diverses applications tels que les sols sportifs, les tapis d'isolation, les enrobés modifiés, les pièces moulées, le BTP,...etc (figure 1.33) [66]

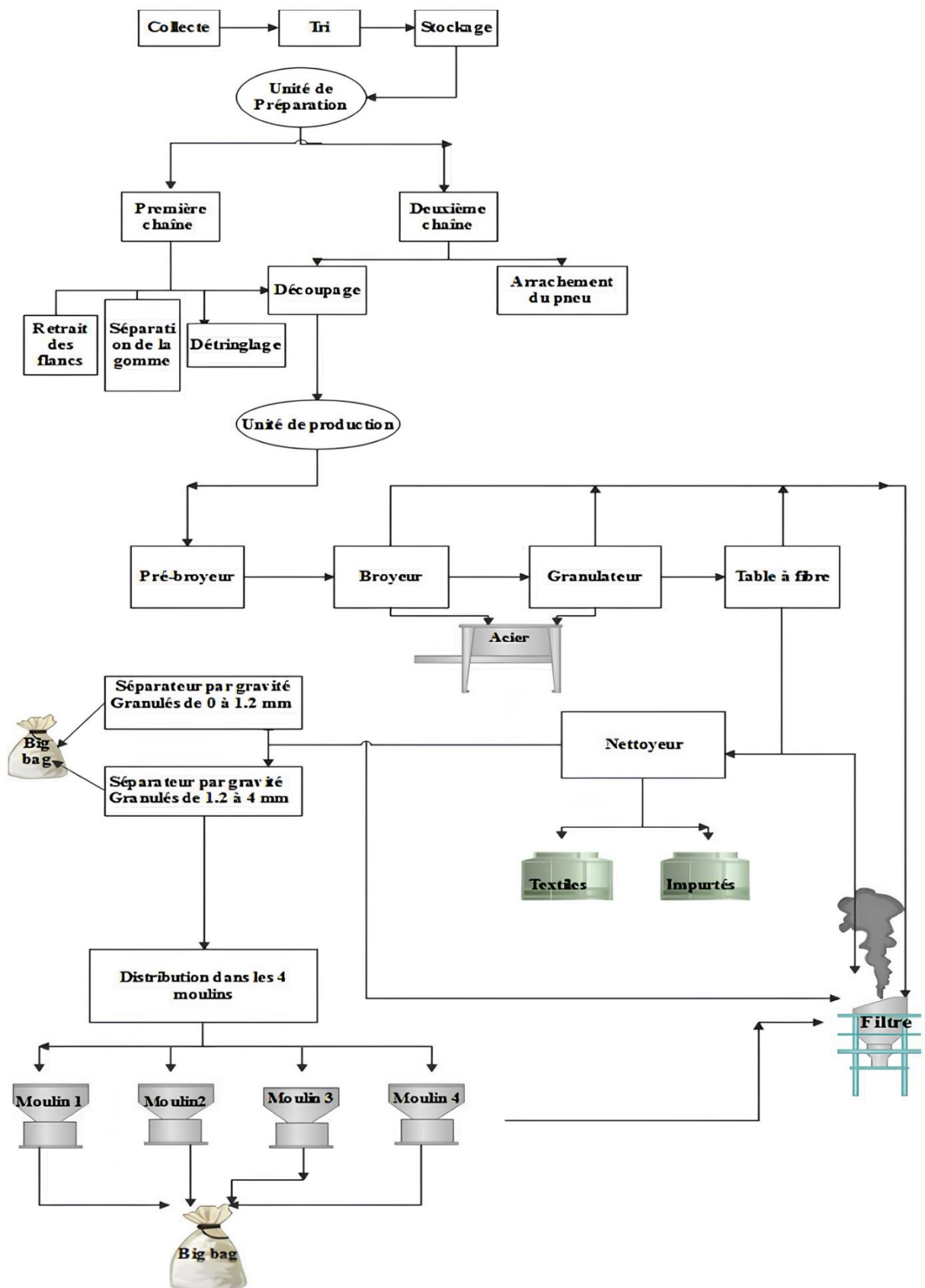


Figure 1.33 : Schéma résumant tous les procédés et machines employés à RECYTECH

Chapitre 2 :

Méthodologie

expérimentale

2.1 Introduction

Face aux enjeux environnementaux croissants et à l'épuisement progressif des ressources naturelles, le secteur du génie civil se doit d'adopter des solutions durables, à la fois économiques et respectueuses de l'environnement. Dans ce contexte, la valorisation des déchets constitue une alternative prometteuse, notamment pour l'amélioration des sols, qui jouent un rôle essentiel dans la conception et la durabilité des infrastructures.

Ce travail s'inscrit dans cette démarche de valorisation, et vise à étudier l'effet de l'utilisation de granulats issus de pneus usagés sur le comportement d'un sol local. L'objectif est d'évaluer dans quelle mesure ce matériau recyclé peut contribuer à améliorer les propriétés mécaniques du sol et ainsi répondre aux exigences des travaux de construction.

2.2 Origine des matériaux utilisés

2.2.1 Le sol

Le sol utilisé dans ce travail a été prélevé dans la zone industrielle de Rahmania, située dans la banlieue sud-ouest d'Alger. La figure 2.1 présente la localisation du site de prélèvement.

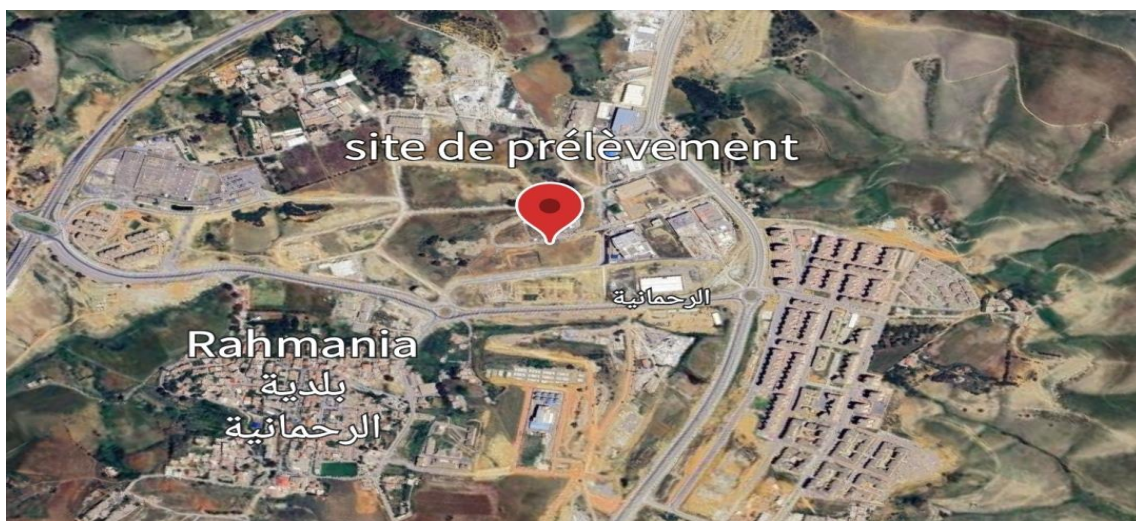


Figure 2.1 : Localisation du site de prélèvement à Rahmania.

Le prélèvement a été effectué manuellement à l'aide d'une pelle, en veillant à extraire une quantité suffisante de matériau pour les différents essais de laboratoire. Les échantillons ont été conditionnés dans de grands sachets afin d'être transportés jusqu'au lieu d'étude.

2.2.2 Granulats issus de pneus usagés

Dans le cadre de cette étude, les granulats de pneus utilisés ont été fournis par la société Recytech, une entreprise algérienne spécialisée dans le recyclage et la valorisation des pneus hors d'usage. Leur site de production est situé le long de la route reliant Hammam Ksena à Seddara, dans la commune d'El-Hachimia, wilaya de Bouira.

Caractéristiques des granulats :

- Type de polymère : SBR (copolymère de Styrène-Butadiène Rubber)
- Densité apparente : 600 kg/m³
- Couleur : noire

Le tableau 2.1 et la figure 2.2 présentent la distribution dimensionnelle des particules, obtenue par tamisage des granulats de pneus :

Tableau 2.1 : Répartition granulométrique des granulats de pneus

Tamis (mm)	< 1,25	< 2	< 2,5	< 3,15	< 4	Total
Poids retenu (g)	1,91	70,09	365,89	61,27	0	499,16
% retenu	0,382	14,018	73,178	12,254	0	99,832
% passants cumulés	0,000	0,382	14,400	87,578	99,832	

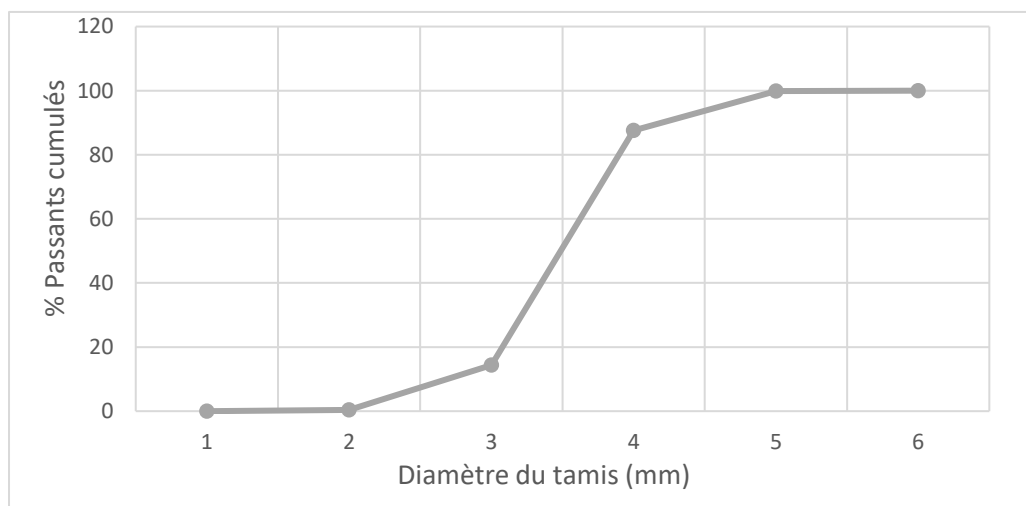


Figure 2.2: Courbe granulométrique des granulats de pneus usagés

2.3 Protocole expérimental

Le travail expérimental a été structuré en deux phases principales :

- **Caractérisation du sol naturel** : Identification des propriétés fondamentales via une série d'essais de laboratoire (physiques, mécaniques, chimiques).
- **Amélioration du sol** : Incorporation de granulats de pneus usagés pour optimiser les performances, avec évaluation de l'efficacité par des essais sur le mélange sol-granat.

2.4 Identification et caractérisation du sol

Cette partie vise à déterminer les caractéristiques du sol brut avant intervention. Les essais réalisés incluent :

- Analyse granulométrique par tamisage ;
- Essai au bleu de méthylène pour évaluer la teneur en argiles actives ;
- Analyse chimique sommaire pour une première évaluation de la composition minéralogique ;
- Détermination des limites d'Atterberg (limites de liquidité et de plasticité) ;
- Essai Proctor modifié et détermination des indices CBR (California Bearing Ratio) à l'état immédiat et après immersion.

2.4.1 Analyse granulométrique par tamisage

2.4.1.1 But de l'essai

Déterminer la distribution pondérale des particules d'un sol par séparation mécanique à l'aide de tamis normalisés afin d'établir sa courbe granulométrique et ses paramètres caractéristiques.

2.4.1.2 Matériels utilisés

- Etuve de marque BINDER (figure 2.3) ;



Figure 2.3 : Etuve

- Séparateur d'échantillons (figure 2.4) ;



Figure 2.4 : Séparateur d'échantillons

- Balance de marque OHAUS (figure 2.5) ;



Figure 2.5: Balance

- Série de tamis de taille d'ouverture : (80 – 63 – 50 – 40 – 31,5 – 25 – 16 – 10 – 5 – 4 – 2 – 1 – 0,4 – 0,2 – 0,1 – 0,063 mm) (figure 2.6).



Figure 2.6 : Série de tamis utilisée

2.4.1.3 Principe de l'essai

L'essai consiste à fractionner un matériau en plusieurs classes granulométriques à l'aide d'une série de tamis emboîtables dont les ouvertures décroissent du haut vers le bas, puis à peser la masse de refus sur chaque tamis. Il est réalisé conformément à la norme NF EN ISO 17892-4 : 2016.

- Utiliser un séparateur d'échantillons afin d'obtenir des échantillons représentatifs et homogènes en granulométrie ;
- Sécher l'échantillon à l'étuve pendant 24 heures à 105 °C ;
- Déterminer le diamètre maximal D_{max} des particules du sol afin d'estimer la masse minimale à analyser, selon le tableau 2.2.

Tableau 2.4 : Masses minimales recommandées pour le tamisage

Diamètre maximale des particules D_{max} (mm)	Masses minimales recommandées (g)
<2,0	100
2,0	100
6,3	300
10	500
20	2 000
37,5	14 000
63	40 000

Si le D_{max} ne figure pas dans le tableau, utiliser une interpolation par la méthode de Thalès pour estimer la masse minimale requise.

- Peser la masse sèche recommandée de sol à analyser ;
- Procéder au tamisage manuel à sec à l'aide de tamis disposés par ordre décroissant d'ouverture (80 – 63 – 50 – 40 – 31,5 – 25 – 16 – 10 mm) ;
- Noter la masse retenue sur chaque tamis ;

- Prélever 1 200 g du passant du tamis de 10 mm pour procéder au lavage des fines.
- Assembler les tamis de 2 mm et 0,063 mm, et laver cette fraction jusqu'à ce que l'eau de lavage devienne claire (figure 2.7) ;



Figure 2.7 : Lavage des fines (Tamis 2mm et 0,063mm)

- Sécher le sol retenu sur les tamis dans l'étuve à 105 °C pendant 24 heures ;
- Réaliser un second tamisage manuel à sec avec une série plus fine (5 – 4 – 2 – 1 – 0,4 – 0,2 – 0,1 – 0,063 mm) ;
- Noter les masses retenues sur chaque tamis, ainsi que celle du fond de tamis.

2.4.1.4 Expression des résultats

Les résultats de l'analyse granulométrique sont exprimés à l'aide de la formule suivante :

$$P_n(\%) = \left(1 - \frac{R_n}{M}\right) \times 100$$

avec : $P_n(\%)$ le pourcentage massique cumulé des particules passantes à travers le tamis de dimension n ;

R_n la masse cumulée des refus sur le tamis n et les tamis supérieurs (g) ;

M la masse totale de l'échantillon sec, à partir de tamis 5mm cette masse est égale à 1200g.

La représentation graphique des résultats se fait sous forme d'une courbe granulométrique, construite comme suit :

- En abscisse : dimension des mailles (ouverture des tamis, en mm), en échelle logarithmique ;
- En ordonnée : pourcentages cumulés de passants $P_n(\%)$, en échelle arithmétique.

2.4.2 Essai au bleu de méthylène

2.4.2.1 But de l'essai

L'essai au bleu de méthylène est une méthode utilisée en géotechnique pour évaluer la propreté des sables, granulats ou sols, ainsi que pour caractériser la nature et l'activité des argiles qu'ils contiennent. Il permet de mesurer la capacité d'un sol à fixer des molécules organiques, à travers l'adsorption de bleu de méthylène. Cette capacité est directement liée à la présence et à l'activité des particules argileuses, qui jouent un rôle important dans la sensibilité à l'eau et le comportement mécanique du sol.

2.4.2.2 Matériel nécessaire

- Balance de précision (précision relative de 0,1 %) ;
- Chronomètre ;
- Tamis à maille carrée de 5 mm ;
- Bécher en plastique ou en verre ;
- Agitateur mécanique à ailettes ;
- Récipient cylindrique (verre, plastique ou inox) ;
- Burette de 50 ml ;
- Papier filtre blanc ;
- Baguette de verre ;
- Solution de bleu de méthylène à 10 g/l ;
- Eau déminéralisée ou distillée.

2.4.2.3 Principe de l'essai

L'essai repose sur l'introduction progressive d'une solution de bleu de méthylène dans une suspension de sol. Le bleu se fixe sur les particules argileuses jusqu'à saturation. Pour repérer le moment de cette saturation, on utilise le test de la tâche : une goutte de suspension est déposée sur un papier filtre et l'apparition d'une auréole bleu turquoise indique la saturation des argiles. La quantité de solution introduite à ce moment permet de calculer la valeur au bleu de méthylène.

Cet essai est réalisé conformément à la norme NF P 94-068 comme suit :

- Prélever une masse humide $mh > 200 \times D_{max}$ (en grammes) et tamiser pour extraire la fraction 0/5 mm.
- Pour le dosage, injecter successivement des volumes de 5 cm³ de solution de bleu de méthylène dans la suspension de sol jusqu'à atteindre la saturation.
- Après chaque ajout, prélever une goutte de liquide et déposer sur un papier filtre maintenu horizontalement.

Deux cas se présentent :

- Si la tâche est entourée d'une auréole bleu turquoise, le test est positif. Dans ce cas l'essai est terminé, Cela signifie que les argiles sont saturées en bleu de méthylène. Pour confirmer ce résultat, l'essai est répété cinq fois à une minute d'intervalle.
- Si la tâche est entourée d'une auréole humide et incolore, le test est négatif. On continue alors les ajouts de bleu de méthylène par doses de 5 cm³ jusqu'à obtenir un test positif confirmé.

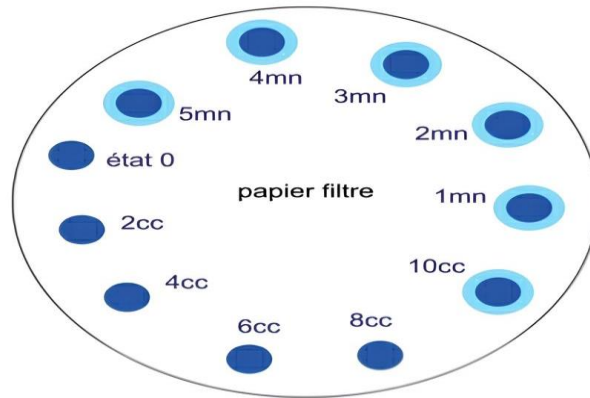


Figure 2.8 : Vue du papier filtre et des tâches auréolées

2.4.2.4 Calcul et expression des résultats

- Masse de bleu introduite : $B = 0.01 \cdot V$
avec : B la masse de bleu introduite dans la solution (solution à 10 g/l) ;
 V le volume total de solution de bleu en cm³ utilisé jusqu'à saturation.
- Teneur en eau : $w = \frac{m_{h2} - m_{s2}}{m_{h2}}$
avec : w la teneur en eau exprimée en valeur décimale ;
 m_{h2} la masse humide de l'échantillon prévu pour être séché, constituant la deuxième prise d'essai (exprimée en grammes) ;
 m_{s2} la masse de l'échantillon après séchage, correspondant à la deuxième prise d'essai (exprimée en grammes).
- Masse sèche de la prise d'essai : $m_0 = \frac{m_{h1}}{1+w}$
avec : m_0 la masse sèche de la prise d'essai ;
 m_{h1} la masse humide de l'échantillon de la première prise d'essai.
- Valeur au bleu de méthylène : $VBS = \frac{B}{m_0} \cdot C \cdot 100$
avec : VBS la valeur de bleu de méthylène d'un sol. Elle s'exprime en grammes de bleu pour 100g de la fraction 0-50 mm du sol étudié ;
 C la proportion pondérale de la fraction 0-5 mm dans la fraction 0-50mm du matériau sec.

2.4.2.5 Interprétation des résultats

La valeur au bleu de méthylène permet de quantifier l'argilosité d'un sol, un VBS élevé traduit une forte teneur en argiles actives, ce qui peut indiquer une sensibilité accrue à l'eau et une portance potentiellement faible. Cette mesure constitue ainsi un critère fondamental pour juger de l'aptitude d'un matériau à être utilisé en couche de forme ou en fondation, notamment dans les travaux routiers et les plateformes industrielles. La classification suivante permet d'associer des seuils de VBS aux types de sols et à leur sensibilité à l'eau :

Tableau 2.3 : Classification des sols selon la valeur de bleu de méthylène (VBS)

VBS (g/100 g)	Interprétation
0,1	Sol insensible à l'eau
0,2	Apparition de la sensibilité à l'eau
1,5	Seuil entre sols sable-limoneux et sols sable-argileux
2,5	Seuil entre sols limoneux peu plastiques et plastiques
6	Seuil entre sols limoneux et sols argileux
8	Seuil entre sols argileux et sols très argileux

2.4.3 Analyse Chimique Sommaire

2.4.3.1 But de l'essai

L'analyse chimique sommaire vise à déterminer la composition chimique globale des échantillons de sol ou de matériaux de construction. Elle permet d'identifier et de quantifier certains ions et composés chimiques présents en proportions significatives, susceptibles d'avoir un impact sur la stabilité, la durabilité ou le comportement physico-chimique des matériaux étudiés.

2.4.3.2 Principe de l'essai

L'essai repose sur la mise en solution des constituants solubles du sol ou des matériaux, suivie de dosages spécifiques permettant de quantifier les espèces chimiques d'intérêt. Chaque type de composé est analysé selon une méthode adaptée, reposant soit sur la précipitation, la titrimétrie, la calcination ou encore la mesure volumétrique de gaz libéré.

- **Préparation de la solution d'analyse**

- Peser 1 g d'échantillon sec (noté PE) à analyser ;
- Le transférer dans un bécher propre de 500 mL ;
- Ajouter 100 mL d'acide chlorhydrique (HCl) à 20 % ;
- Chauffer le mélange et porter à ébullition pendant 5 minutes sous hotte ;
- Filtrer à chaud à l'aide d'un filtre bande blanche ou rouge ;
- Rincer le résidu avec de l'eau distillée bouillante pour récupérer tous les ions ;
- Transférer le filtrat dans une fiole jaugée de 250 mL ;
- Compléter jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée.

Cette solution est appelée solution A et servira pour les dosages des sulfates et autres espèces solubles.

- **Dosage des sulfates (SO_4^{2-})**

- Prélever 100 mL de la solution A ;
- Verser dans un bécher propre et chauffer doucement sous agitation ;
- Ajouter 50 mL de solution de chlorure de baryum (BaCl_2) ;
- Laisser reposer pendant 12 heures à température ambiante, sans agitation, pour permettre une précipitation complète ;
- Filtrer le précipité sur un filtre bande bleue ;
- Rincer plusieurs fois à l'eau distillée bouillante ;
- Peser un creuset en platine, noter cette masse b ;
- Transférer le filtre avec le précipité dans le creuset ;
- Calciner à 950 °C pendant 1 heure dans un four à moufle ;
- Laisser refroidir, puis peser le creuset contenant le résidu. Noter la masse a.

- **Dosage des chlorures (Cl^-)**

- Peser 1 g d'échantillon (PE) et le placer dans un bécher de 250 mL ;
- Ajouter 100 mL d'eau distillée ;
- Chauffer à ébullition pendant 10 minutes pour extraire les ions chlorures solubles ;
- Filtrer à chaud à l'aide d'un filtre bande blanche ou noire ;
- Rincer le résidu avec de l'eau distillée ;
- Ajouter quelques gouttes de chromate de potassium K_2CrO_4 comme indicateur ;
- Titrer avec une solution de nitrate d'argent jusqu'à l'apparition d'une coloration rouge brique, indiquant l'équivalence ;
- Noter le volume V (mL) de solution de AgNO_3 utilisé.

- **Détermination de la teneur en carbonates (CaCO_3) et l'anhydride carbonique (CO_2)**

- Introduire 0,5 g d'échantillon sec dans un flacon muni d'un embout de dégazage.
- Ajouter de l'eau distillée pour imbiber la matière.
- Introduire lentement du HCl dilué (en goutte à goutte), jusqu'à arrêt complet de l'effervescence.
- Fermer hermétiquement le flacon et l'introduire dans un calcimètre.
- Agiter vigoureusement pour libérer tout le CO_2 formé.
- Lire le volume de gaz dégagé (V_0) sur le tube capillaire gradué.
- Refaire le test avec 0,5 g de CaCO_3 pur, noter le volume de référence V_1 .

L'anhydride carbonique présent dans le sol (principalement sous forme de carbonates) peut être évalué par calcination. La perte de masse lors du chauffage à 250 °C traduit la décomposition des carbonates avec dégagement de CO_2 .

2.4.3.3 Expression des résultats

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

Où : $(\%)CaSO_4, 2H_2O$ est le pourcentage en sulfates ;

a est la masse du creuset + sol calciné ;

b est la masse du creuset vide ;

PE est la masse nette de l'échantillon.

- Pourcentage en chlorure : $(\%)NaCl = V \times 0,585$

Où : $(\%)NaCl$ est le pourcentage en chlorure ;

V est le volume des nitrates d'argent utilisé pour le titrage.

- Pourcentages en carbonates et en anhydride carbonique :

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

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

Où : $(\%)CaCO_3$: 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.

2.4.4 Limites d'Atterberg

2.4.4.1 But de l'essai

Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques fondamentaux utilisés pour caractériser les états de consistance des sols fins en fonction de leur teneur en eau. Elles comprennent :

- Limite de plasticité (ω_p) : sépare l'état plastique de l'état semi-solide. C'est la teneur en eau d'un sol qui a perdu sa plasticité et se fissure en se déformant lorsqu'il est soumis à de faibles charges.
- Limite de liquidité (ω_L) : sépare l'état liquide de l'état plastique, c'est la teneur en eau correspondant au passage du sol fin d'un état plastique à l'état liquide. Ces limites s'expriment en pourcentage.

2.4.4.2 Matériels utilisés

- Etuve de marque BINDER (figure 2.3) ;
- Balance de marque OHAUS (figure 2.5) ;

- Spatule ;
- Tamis d'ouverture 0,4mm et 2mm ;
- Cône tombant de type 80g/ 30° (figure 2.9).



Figure 2.9 : Cône 80g/30°

2.4.4.3 Principe de l'essai

Selon la norme NF EN ISO 17892-12 : 2018, la détermination des limites d'Atterberg se fait comme suit :

- **Préparation de l'échantillon**

- Peser environ 300g représentative de l'échantillon de sol ;
- Placer le matériau dans un récipient et ajouter la quantité d'eau distillée juste nécessaire pour la recouvrir, puis brasser jusqu'à formation d'une boue liquide ;
- Verser la boue sur un tamis de 0,4 mm en plaçant un tamis de protection de 2mm au-dessus ;
- Laver le matériau retenu sur le tamis avec une quantité minimale d'eau distillée, jusqu'à ce que l'eau qui s'égoutte du tamis de 0,4 mm soit visuellement claire ;
- Recueillir tout le matériau passant à travers le tamis de 0,4 mm ;
- Laisser décanter le produit du lavage et déverser l'eau claire ;
- Placer la suspension restante dans une étuve à une température maximale de 50°C jusqu'à obtenir une pâte ferme ;
- A moyen d'une spatule, triturer et malaxer complètement la prise d'essai de l'échantillon tamisé sur la plaque en verre, en évitant l'introduction de bulles d'air pendant le malaxage (voir la figure 2.10) ;

- Ajouter ou retirer la juste quantité d'eau nécessaire pour ajuster la consistance de la pâte qui en résulte afin de la ramener dans la gamme de consistance nécessaire pour l'essai.



Figure 2.10 : Malaxage

- **Détermination de la limite de liquidité (ω_L) par la méthode de cône tombant**

La figure 2.11 illustre le schéma de l'appareillage utilisé dans la méthode du cône tombant. Pour cela :

- Placer dans un récipient la pâte préparée, en prenant soin de ne pas emprisonner de bulles d'air ;
- Araser l'excédent de pâte à l'aide d'une règle à araser ou d'un couteau afin d'obtenir une surface lisse et plane ;
- Bloquer le cône en position haute. Abaisser le support jusqu'à amener la pointe du cône juste en contact de la surface du matériau ;
- Bloquer le cône dans cette position et remettre à zéro l'appareil de mesure de la pénétration ;
- Libérer le cône et le laisser s'enfoncer pendant une durée de 5 secondes ;
- Noter la profondeur de pénétration du cône ;
- Vérifier que la profondeur de pénétration est comprise dans le domaine de valeurs requises pour le type de cône utilisé conformément au tableau 2.4 ;

Tableau 2.4 : Domaine de valeurs des profondeurs de pénétration du cône

Type de cône	60g/60°	80g/30°
Intervalle de profondeur de pénétration du cône	7 à 15 mm	15 à 25 mm
Limite de liquidité déterminée à une profondeur de pénétration de :	10 mm	20 mm

- Lever le cône et le nettoyer ;

- Prélever une éprouvette d'une masse minimale de 15g de pâte remaniée depuis la zone pénétrée par le cône, et déterminer la teneur en eau ;
- Répéter ces étapes pour obtenir au moins quatre points d'essai à différentes teneurs en eau.

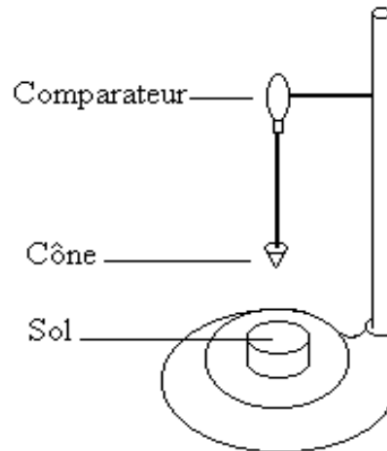


Figure 2.11 : Schéma de l'appareillage de la méthode du cône tombant

- **Détermination de la limite de plasticité (ω_p)**

La figure 2.12 illustre la méthode de détermination de la limite de plasticité. Pour cela :

- Prélever environ 15 à 20 g de la pâte de sol préparée et la placer sur la plaque de malaxage ;
- Laisser la pâte sécher partiellement sur la plaque jusqu'à ce qu'elle devienne suffisamment plastique pour pouvoir en faire une boulette ;
- Pétrir la boulette de sol partiellement séché entre les doigts et la rouler entre les paumes des mains jusqu'à ce que la chaleur des mains ait séché suffisamment le sol pour que de fines fissures apparaissent à sa surface ;
- Diviser la boulette en deux parties de masse approximativement égale
- Diviser une partie en 3 sous-parties ;
- En prenant une sous-partie à la fois, pétrir chacune de sorte à obtenir un rouleau d'environ 6 mm de diamètre entre l'index et le pouce de chaque main ;
- Placer le rouleau sur la plaque de malaxage et le rouler en arrière et en avant d'un mouvement régulier de la main ;
- Répéter l'opération déroulage jusqu'à ce que le rouleau se brise en morceaux après avoir atteint le diamètre de 3mm ;
- Répéter ces opérations pour les deux autres sous-parties de pâte partiellement séchée ;
- Déterminer la teneur en eau des rouleaux en morceaux ;
- Répéter les opérations précédentes pour la deuxième partie de pâte partiellement séchée obtenue.

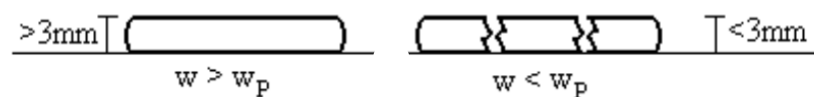


Figure 2.12 : Méthode de détermination de ω_p

2.4.4.4 Expression des résultats

La limite de liquidité (ω_L) est définie comme la teneur en eau correspondant à une pénétration de 20 mm du cône (80g/30°) en 5 secondes. On observe que la teneur en eau varie presque linéairement avec la profondeur de pénétration, ce qui permet de tracer une droite en utilisant quatre points d'essai à différentes teneurs en eau. L'interpolation sur cette droite permet alors de déterminer précisément la limite de liquidité (figure 2.13).

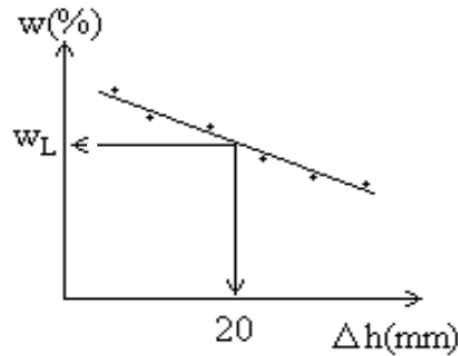


Figure 2.13 : Méthode de détermination de la limite de liquidité ω_L

La limite de plasticité (ω_p) est la teneur en eau à partir de laquelle des rouleaux de sol de 3mm de diamètre se cassent lorsqu'on les manipule. Ces limites s'expriment en pourcentage.

A partir de ω_L et ω_p , on peut déterminer l'indice de plasticité noté I_p qui est calculé comme suit :

$$I_p = \omega_L - \omega_p$$

Cet indice indique l'étendue de l'intervalle du domaine d'état plastique du sol.

2.4.5 Essai Proctor modifié

2.4.5.1 But de l'essai

La méthode Proctor est un essai de laboratoire normalisé permettant de déterminer la relation entre la teneur en eau et la densité sèche d'un sol compacté. Elle permet d'identifier les conditions optimales de compactage (teneur en eau optimale et densité maximale), indispensables à la stabilité des ouvrages géotechniques.

L'essai Proctor modifié est utilisé pour sa capacité à reproduire des conditions de compactage plus intenses, proches de celles rencontrées sur les chantiers modernes. Il offre ainsi une meilleure représentativité du comportement du sol sous contrainte réelle.

2.4.5.2 Matériels utilisés

- Etuve de marque BINDER (figure 2.3) ;

- Séparateurs d'échantillons (figure 2.4) ;
- Balance de marque OHAUS (figure 2.5) ;
- Tamis 20mm ;
- Règle à araser (figure 2.14) :



Figure 2.14 : Règle à araser

- Dame Proctor automatique (figure 2.15) ;



Figure 2.15 : Dame proctor automatique

- Moule CBR (Figure 2.16) ;



Figure 2.16 : Moule CBR

- La rehausse du moule CBR (figure 2.17) ;



Figure 2.17 : Rehausse du moule

2.4.5.3 Principe de l'essai

Selon la norme NF P 94-093 (Oct 2014), l'essai Proctor modifié se fait comme suit :

- **Préparation de l'échantillon**
 - Sécher le matériau dans une étuve réglée à 50 °C pendant 24 heures ;
 - Tamiser le matériau à 20 mm ;
 - Homogénéiser et diviser le matériau en 5 parts égales de 6 kg chacune ;
 - Humidifier chaque part avec une teneur en eau différente, variant de 6 % à 14 %, de manière progressive.
- **Exécution de l'essai**

Avant l'introduction du matériau dans le moule, il convient de :

 - Assembler solidement le moule et la rehausse ;
 - Lubrifier les parois intérieures du moule afin de faciliter le démoulage ;

- Placer un papier filtre au fond du moule, si nécessaire.

Une fois le moule préparé, il est positionné et fixé solidement sur la dame automatique à l'aide de vis de maintien :

- Introduire la quantité de matériau nécessaire de sorte que, après compactage, la hauteur de la première couche soit légèrement supérieure à 1/5 de la hauteur totale du moule ;
- Compacter la couche à l'aide de la dame automatique en appliquant 56 coups par couche ;
- Répéter l'opération pour un total de 5 couches successives ;
- Après le compactage de la cinquième couche, retirer la rehausse. Le matériau doit alors dépasser légèrement le moule (figure 2.18) ;



Figure 2.18 : L'échantillon à la fin de compactage

- Araser l'excédent à l'aide d'une règle métallique, en raclant radialement du centre vers les bords ;
- Si des vides apparaissent à la surface, les combler avec des particules fines et lisser soigneusement ;
- Peser le moule rempli de sol compacté pour déterminer la masse totale ;
- Prélever un échantillon représentatif du matériau compacté pour en déterminer la teneur en eau ;
- Répéter l'ensemble des opérations pour chacune des cinq parts préalablement humidifiées.

2.4.5.4 Expression des résultats

Calculs à effectuer pour chaque moule :

- Masse du sol humide (g) = Masse totale (sol + moule) – Masse du moule
- Masse volumique humide (t/m^3) = $\left(\frac{\text{Masse du sol humide}}{\text{Volume du moule}} \right) \times \left[1 / \left(1 + \frac{W}{100} \right) \right]$

- Masse d'eau (g) = (Masse du sol humide + tare) – (Masse du sol sec + tare)
- Masse du sol sec (g) = (Masse du sol sec + tare) – Masse de la tare
- Teneur en eau W (%) = (Masse d'eau / Masse du sol sec) $\times 100$
- Masse du sol sec dans le moule (g) = Masse du sol humide / $\left(1 + \frac{W}{100}\right)$
- Masse volumique sèche (t/m^3) = Masse du sol sec dans le moule / Volume du moule

La teneur en eau optimale (W_{opt}) et la masse volumique sèche maximale (γ_{dmax}) sont déterminées à l'aide du logiciel *SOLTEST*, par ajustement d'une courbe de compactage (γ_d en fonction de W).

2.4.5.5 Essai sur sol traité

Dans le cadre de l'ajout de granulats de pneus, les étapes du protocole restent identiques à celles décrites précédemment jusqu'à la phase d'humidification. À partir de cette étape, il convient de :

- Incorporer les pourcentages prévus de granulats de pneus dans chacune des cinq parts de matériau préparées ;
- Mélanger soigneusement afin d'obtenir un mélange homogène ;
- Humidifier le mélange conformément à la teneur en eau prévue ;
- Poursuivre ensuite avec l'exécution de l'essai.

Les quantités de granulats de pneus à ajouter selon les pourcentages choisis sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.5 : Masses à ajouter en fonction du pourcentage d'incorporation

Pourcentage d'ajout (%)	Masse à ajouter (g)
2	120
4	240
6	360
8	480

2.5 Traitement Étude de l'amélioration des performances du sol

Dans le but d'évaluer l'impact d'utilisation de granulats sur le comportement du sol, des mélanges sol–granulats ont été préparés avec différents taux d'ajout. Une série d'essais a ensuite été réalisée pour analyser les effets de cette incorporation sur les propriétés mécaniques du matériau.

L'objectif principal de cette phase était d'observer les éventuelles améliorations en termes de portance, de compressibilité et de résistance au cisaillement. Les essais suivants ont été menés sur les échantillons préparés :

- Essai Proctor modifié, pour déterminer la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale des mélanges ;
- Essais CBR (immédiat et après immersion), visant à évaluer la capacité portante du matériau dans des conditions naturelles et saturées ;
- Essai œdométrique, afin d'analyser les variations de compressibilité du sol traité ;
- Essai de cisaillement direct, permettant de mesurer l'évolution de la résistance au cisaillement induite par l'ajout de granulats.

L'ensemble de ces tests a contribué à évaluer l'efficacité du procédé adopté et à comparer les performances mécaniques des différentes formulations étudiées.

2.5.1 Détermination des indices CBR immédiat et après immersion

2.5.1.1 But de l'essai

L'essai CBR a pour objectif de déterminer l'aptitude d'un sol à supporter les charges, notamment dans le cas des remblais et des couches de forme compactées destinées aux ouvrages routiers. Il permet d'obtenir des indices de portance expérimentaux, utilisés pour :

- Classer les sols selon le Guide des Terrassements Routiers (GTR) ;
- Dimensionner les structures de chaussée, en tenant compte du fait que plus l'indice CBR est élevé, plus l'épaisseur de la structure nécessaire est faible.

2.5.1.2 Matériels utilisés

- Une étuve ventilée de laboratoire de marque BINDER (figure 2.3) ;
- Un tamis de taille d'ouverture 20 mm ;
- Une Balance électronique de précision, de marque OHAUS (figure 2.5) ;
- Trois moules cylindriques standard pour essai CBR (figure 2.19) ;



Figure 2.19 : Moules CBR

- Pelle à main, truelle, pinceau, marteau et une règle à araser (figure 2.20) ;



Figure 2.20 : Outils de préparation des échantillons du sol

- Une dame Proctor modifiée actionnée manuellement ou mécaniquement (figure 2.21) ;



Figure 2.21 : Dame Proctor modifié manuelle

- Un disque plat, perforé et muni d'une tige centrale réglable (figure 2.22) ;



Figure 2.22 : Plat perforé

- Une presse de compression de marque MATEST, équipée d'un poinçon cylindrique fixé à la partie supérieure de la presse (figure 2.23).



Figure 2.23: Presse de compression utilisée pour le poinçonnement

2.5.1.1 Principe de l'essai

L'essai CBR est réalisé conformément à la norme NF P 94-078, il consiste à mesurer la résistance d'un sol compacté à la pénétration d'un poinçon cylindrique, il est réalisé selon les étapes suivantes :

- Éliminer, par tamisage, les éléments dont la dimension est supérieure à 20 mm ;
 - Sécher le matériau dans une étuve ventilée à 105 °C pendant 24 heures ;
 - Prévoir au minimum 3 × 6 kg de matériau tamisé à 20 mm pour réaliser trois moulages à trois énergies de compactage différentes.
 - Humidifier le matériau à la teneur en eau optimale obtenue à partir de l'essai Proctor modifié ;
 - Préparer le moule CBR en plaçant le disque d'espacement au fond, fixer la hausse, puis peser l'ensemble ;
 - Introduire le matériau dans le moule en cinq couches de même épaisseur ;
 - Compacter chaque couche selon l'énergie choisie : 10, 25 ou 56 coups par couche ;
 - Retirer la hausse, araser soigneusement la surface ;
 - Désolidariser le moule de son embase, puis peser le moule contenant l'éprouvette avant de procéder au poinçonnement.
 - Effectuer l'essai de poinçonnement directement si le sol est testé sans immersion préalable (CBR immédiat).
- **Cas d'un essai CBR après immersion (imbibé)**
 - Placer le disque perforé de gonflement à la surface de l'échantillon, puis disposer par-dessus la charge annulaire ;
 - Installer le moule dans un bac de saturation rempli d'eau, de manière à ce que l'eau pénètre librement par le dessus et le dessous de l'échantillon.

- Fixer le trépied support du comparateur sur le bord supérieur du moule, puis positionner le comparateur au centre du trépied.
- Régler la hauteur de la tige du plateau de gonflement de façon à ce que le palpeur du comparateur repose sur son extrémité. Noter alors la lecture initiale du comparateur.
- Laisser l'éprouvette en immersion pendant une durée de 4 jours à température ambiante comme indiqué dans la figure 2.24 :



Figure 2.24: Immersion des moules CBR

- À l'issue de cette période, relever la lecture du comparateur afin d'évaluer le gonflement. Retirer ensuite les charges annulaires et le disque perforé.
- Transférer immédiatement l'échantillon sous la presse de poinçonnement pour procéder à l'essai.

- **Poinçonnement**

- Placer le moule sur la presse de poinçonnement, en le centrant de façon à ce que l'axe du piston coïncide avec celui de l'éprouvette ;
- Monter lentement le plateau mobile de la presse jusqu'à ce que le piston entre en contact avec la surface de l'échantillon ;
- Replacer les charges annulaires sur le moule ;
- Fixer un comparateur sur le bord du moule et positionner son palpeur contre le bord supérieur du piston ;
- Démarrer le poinçonnement à la vitesse constante normalisée de 1,27 mm/min ;
- Relever les valeurs de charge indiquées par l'anneau dynamométrique pour les enfoncements suivants : 0,625 ; 1,25 ; 2 ; 2,5 ; 5 ; 10 ; et 12,5 mm ;
- Arrêter la presse une fois l'enfoncement de 12,5 mm atteint.



Figure 2.25 : Poinçonnement de l'échantillon

2.5.2 Expression des résultats

La détermination de l'indice CBR, aussi bien pour le cas immédiat que pour le cas après immersion, a été réalisée à l'aide du logiciel SOLTEST, qui permet d'automatiser le calcul à partir des données expérimentales.

Pour chaque configuration d'essai, les paramètres suivants sont introduits dans le logiciel :

- La teneur en eau $W(\%)$;
- La masse volumique sèche γ_d (t/m^3) ;
- L'indice CBR (%) obtenu pour chaque niveau de compactage.

L'ensemble de ces valeurs permet de tracer automatiquement la courbe de variation de l'indice CBR en fonction de la densité sèche. Cette courbe permet d'analyser l'évolution de la portance du sol avec l'énergie de compactage, et de déterminer la performance mécanique du matériau étudié.

- **Détermination de la teneur en eau $W(\%)$**
 - Prélever un échantillon du sol utilisé ;
 - Peser l'échantillon avant séchage (masse humide) ;
 - Sécher l'échantillon au four à $105-110^\circ\text{C}$ pendant 24 h ;
 - Peser l'échantillon après séchage (masse sèche) ;
 - Calculer la teneur en eau : $W(\%) = \frac{\text{masse humide (g)}}{\text{masse sèche (g)}} \times 100$.
- **Détermination de la masse volumique sèche γ_d (t/m^3)**
 - Peser le moule vide ;
 - Peser le moule avec le sol compacté (masse totale humide) ;
 - Calculer la masse humide du sol : $M_{\text{humide}} (\text{g}) = M_{\text{totale humide}} - M_{\text{moule}}$;
 - Calculer la masse du sol sec : $M_{\text{sec}} (\text{g}) = M_{\text{humide}} (\text{g}) / (1 + \frac{W(\%)}{100})$;
 - Calculer la masse volumique sèche : $\gamma_d = M_{\text{sec}} (\text{g}) / V_{\text{moule}}$.

- **L'indice CBR (I_{CBR})**

L'indice CBR est, par convention, défini comme la plus grande des deux valeurs suivantes :

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

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

Dans le cas de l'indice CBR mesuré après immersion, on calcule également le gonflement linéaire relatif (G) à l'aide de la formule suivante : $G = \frac{\delta h}{H} \times 100$

Avec : δh la variation de hauteur mesurée (en mm), indiquée par le comparateur après 4 jours d'immersion ;
 H la hauteur initiale de l'éprouvette (en mm).

2.5.2 Essai œdométrique

2.5.2.1 Objectif de l'essai

L'objectif de cet essai est de déterminer les caractéristiques de compressibilité et de consolidation du sol. Ces paramètres permettent d'estimer les tassements que subira un sol sous l'effet de contraintes mécaniques, en particulier dans les couches inférieures des ouvrages géotechniques.

2.5.2.2 Matériels utilisés

- Une balance électronique de précision, de marque OHAUS (figure 2.5) ;
- Une trousse coupante pour la préparation de l'échantillon (figure 2.26) ;



Figure 2.26 : Trousse coupante

- Une cellule œdométrique (figure 2.27) composée d'une enceinte cylindrique rigide, deux bases en pierres poreuses et un couvercle ;



Figure 2.27 : Cellule œdométrique

- Un appareil œdométrique (figure 2.28) comprenant un bâti métallique avec un bras de levier et un comparateur mécanique ;



Figure 2.28 : Appareil œdométrique

- Des poids supplémentaires utilisés pour ajuster les charges appliquées (figure 2.29).



Figure 2.29 : Poids supplémentaires

2.5.2.3 Principe de l'essai

L'essai œdométrique, réalisé conformément à la norme NF EN ISO 17892-5, consiste à appliquer, par cycles successifs, des charges croissantes puis décroissantes sur un échantillon de sol cylindrique, placé dans une cellule œdométrique rigide. L'échantillon, confiné latéralement et drainé sur ses deux faces, est soumis à une contrainte verticale uniforme. Le déplacement du sol est limité à la direction verticale, ce qui reproduit des conditions de déformation unidimensionnelle typiques des terrains sous fondations ou remblais.

Cet essai est réalisé selon la procédure suivante :

- Peser la quantité d'eau nécessaire pour humidifier le sol ;
- Ajouter l'eau au sol et homogénéiser soigneusement jusqu'à obtenir un mélange uniforme ;
- Peser la quantité de sol nécessaire pour remplir la trousse coupante ;
- Remplir la trousse coupante par couches successives, en compactant légèrement chaque couche afin d'assurer une bonne homogénéité et une densité uniforme.
- Araser les deux faces de l'échantillon à ras de la trousse coupante, puis peser l'ensemble.
- Placer successivement dans la cellule œdométrique : la pierre poreuse inférieure, un papier filtre, la trousse coupante contenant l'échantillon, un deuxième papier filtre, et enfin la pierre poreuse supérieure (figure 2.30) ;
- Introduire l'ensemble dans le corps de la cellule œdométrique ;
- Positionner la cellule sur le banc de chargement ;
- Mettre à niveau le bras de levier ou le système de chargement ;
- Remplir le réservoir et saturer complètement la cellule avec de l'eau, en veillant à éliminer toute présence de bulles d'air ;
- Appliquer une série de paliers de charge verticaux croissants à l'aide de masses fendues déposées sur le plateau de chargement ;

- Pour chaque palier, relever le tassement vertical aux temps suivants : 0 min, 15 s, 30 s, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h et 24 h. Doubler la charge appliquée toutes les 24 heures ;
- À la fin des paliers de chargement, effectuer un cycle de déchargement en retirant progressivement les masses, en suivant la même méthode de mesure.



Figure 2.30 : Préparation de la cellule œdométrique

- **Mise en œuvre du protocole**

- Lancer le logiciel *CLISP STUDIO* ;
- Introduire les conditions initiales de l'échantillon :
 - Hauteur de la trousse coupante (20 mm) ;
 - Diamètre de la trousse coupante (70 mm) ;
 - Teneur en eau initiale issue de l'essai Proctor ;
 - Masse de l'échantillon ;
- Sélectionner les paliers successifs de chargement et de déchargement selon le tableau 2.6 ;

Tableau 2.6 : Séquence des paliers de chargement et de déchargement

Palier	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masse appliquée (Kg)	0,2	0,5	1	2	5	10	20	10	5	0.2
Pression équivalente (kPa)	6	14	27	57	131	261	520	261	131	6

- Ajouter progressivement les poids sur le plateau de chargement pour augmenter la contrainte verticale appliquée ;
- Augmenter la charge dès qu'un tassement devient très lent ou nul (variation inférieure à 0,05 mm sur 4 heures) ;
- À la fin de l'essai, retirer l'eau excédentaire, démonter la cellule, puis peser l'échantillon ;
- Placer l'échantillon à l'étuve pendant 4 heures à 107 °C, peser, puis remettre pour 1 heure supplémentaire ;
- Refaire une dernière pesée. Si la différence entre les deux dernières pesées est inférieure à 0,1 %, considérer que la masse est constante ;

- Déterminer enfin la teneur en eau finale.

2.5.2.4 Expression des résultats

- Masse d'eau à ajouter : $m_{eau} = \gamma_{dmax} \times m_{sol}$
Avec : m_{eau} la masse de l'eau à ajouter (en g) ;
 γ_{dmax} la densité sèche maximale du sol (en g/cm³) obtenue à partir du Proctor ;
 m_{sol} la masse du sol sec prélevé (en g).
- Masse de sol humide : $m_{sol\ humide} = \gamma_h \times V$
Avec : $m_{sol\ humide}$: masse du sol humide à introduire (en g) ;
 γ_h : densité humide (en g/cm³) donnée par $\gamma_h = \gamma_{dmax} \times (W_{opt} + 100)$;
 W_{opt} : teneur en eau optimale issue de l'essai Proctor (en %) ;
 V : Volume de la trousse coupante.

- **Paramètres œdométriques**

Les résultats de l'essai œdométrique ont été obtenus à partir des mesures de tassement enregistrées automatiquement au cours du temps pour chaque palier de charge appliqué. Le traitement des données a été réalisé à l'aide du logiciel *CLISP STUDIO* associé à l'appareil œdométrique, qui permet une analyse précise et rapide du comportement du sol en compression unidimensionnelle.

Le logiciel a généré les courbes classiques suivantes :

- **Courbe œdométrique** : la variation de l'indice des vides (e) en fonction du logarithme de la contrainte verticale effective appliquée (σ), permettant de caractériser la compressibilité du sol ;
- **Courbe de consolidation** : tassement vertical relatif (ε_v) en fonction du logarithme du temps (t), utilisée pour l'évaluation du coefficient de consolidation.

À partir de ces représentations graphiques, on peut déterminer les paramètres œdométriques suivants : l'indice de compression (C_c), l'indice de recompression (C_s) et l'indice de gonflement (C_g). Ces indices traduisent le comportement du sol étudié vis-à-vis des contraintes mécaniques imposées et sont essentiels pour l'analyse de la stabilité des ouvrages géotechniques.

2.5.3 Essai cisaillement

2.5.3.1 But de l'essai

Déterminer la résistance au cisaillement d'un sol, c'est-à-dire la contrainte à laquelle le sol se rompt lorsqu'il est soumis à un effort de cisaillement contrôlé, sous contrainte normale constante.

2.5.3.2 Matériels utilisés

- Etuve de marque BINDER (figure 2.3) ;
- Séparateur d'échantillons (figure 2.4) ;
- Balance de marque OHAUS (figure 2.5) ;
- Machine de cisaillement SHEARSCAN-2 de la marque SOLS MESURES (figure 2.31) ;



Figure 2.31 : Machine de cisaillement

- Accessoires de la boîte de cisaillement (figure 2.32) ;



Figure 2.32 : Accessoires de la boîte de cisaillement

2.5.3.3 Principe de l'essai

L'essai de cisaillement direct, réalisé selon la norme NF EN ISO 17892-10 (2018), permet de déterminer la résistance au cisaillement d'un sol sous une contrainte normale constante. Il est ici mené en conditions consolidées drainées (CD), afin de simuler les cas les plus défavorables en conditions réelles, où le sol a le temps de se consolider et de drainer avant la rupture.

- **Préparation de l'échantillon**

- Tamiser environ 800 g de sol sec à 5 mm ;
- Humidifier le matériau jusqu'à atteindre une teneur en eau égale à W_{OPM} , préalablement déterminée à l'aide de l'essai Proctor réalisé sur ce sol ;
- Mélanger soigneusement le matériau à l'aide d'une spatule afin d'assurer une homogénéisation complète ;
- Assembler les deux demi-boîtes de cisaillement de 60 mm de diamètre pour un volume utile de 70 cm³, puis placer une pierre drainante au fond de la boîte ;
- Prélever un échantillon de sol et le peser. La masse à utiliser est calculée en multipliant la masse volumique du sol par le volume de la boîte ;
- Introduire soigneusement l'échantillon dans la boîte jusqu'à ce qu'elle soit complètement remplie (figure 2.33) ;
- Compléter le montage de la boîte de cisaillement après remplissage, en installant les filtres, plaques poreuses et le couvercle ;
- Placer la boîte montée dans la machine de cisaillement direct, en s'assurant de son alignement correct.



Figure 2.33 : Préparation de l'échantillon pour l'essai cisaillement

- **Application de la contrainte normale**

- Avant l'application de la charge verticale, verser doucement de l'eau dans la boîte à l'aide d'une pipette ;
- Placer le piston de chargement sur l'échantillon ;
- Appliquer progressivement la charge verticale correspondant à la contrainte normale (σ) choisie (1bars, 2bars et 4bars) ;
- Laisser l'échantillon se consolider jusqu'à stabilisation de la déformation, généralement pendant 24 heures.

- **Application de la contrainte de cisaillement**

- La moitié supérieure de la boîte de cisaillement se déplace horizontalement à une vitesse généralement fixée à 1 mm/min ;
- Mesurer en continu la force de cisaillement, le déplacement horizontal et le déplacement vertical (variation de volume) ;

- Enregistrer tout au long de l'essai les données suivantes : force de cisaillement appliquée, déformation horizontale, et déformation verticale ;
- L'essai se termine automatiquement lorsque l'échantillon atteint la rupture, identifiée par le pic de résistance.

2.5.3.4 Expression des résultats

- **Les calculs à effectuer**

- Masse volumique humide : $\gamma_H = \gamma_D \times (1 + W_{OPM})$
où γ_D est la masse volumique sèche et W_{OPM} la teneur en eau optimale, déterminés à partir de l'essai Proctor réalisé sur ce sol ;
- La masse d'eau : $M_{eau} = W_{OPM} \times 800g$;
- La masse du matériau humide à utiliser : $M_{humide} = \gamma_H \times V$
avec $V = 70 \text{ cm}^3$, volume de la boîte utilisée dans cet essai ;
- La contrainte de cisaillement : $\tau = \frac{T}{S}$
où T est la force de cisaillement mesurée (en N) et S la surface de l'éprouvette consolidée.

- **Courbe contrainte / déformation**

Cette courbe est tracée pour chaque essai réalisé sous une contrainte normale donnée ($\sigma = 1, 2$ et 4 bars). Le logiciel *SOLTEST* utilise les données mesurées lors de l'essai :

- La déformation (mm) ;
- La force de cisaillement (T), convertie en contrainte de cisaillement τ (bars).

Pour chaque contrainte normale, *SOLTEST* génère une courbe $\tau = f(\text{déformation})$ qui permet de suivre l'évolution de la contrainte de cisaillement jusqu'au pic de résistance (rupture).

- **Droite intrinsèque**

SOLTEST extrait, pour chaque contrainte normale σ , la contrainte de cisaillement τ_r atteinte à la rupture. Ces points sont utilisés pour tracer la droite intrinsèque définie par :

$$\tau = \sigma \cdot \tan \varphi + c$$

Le logiciel en déduit les paramètres de résistance au cisaillement du sol :

- Cohésion : c (bars) ;
- Angle de frottement interne : φ (en degrés).

Chapitre 3 :

Résultats

et discussion

3.1 Résultats des essais caractérisation du sol naturel

3.1.1 Analyse granulométrique

Le tableau 3.1 regroupe les résultats de l'analyse granulométrique du sol naturel tandis que la figure 3.1 illustre la courbe d'analyse granulométrique du sol.

Tableau 3.1 : Résultats de l'analyse granulométrique du sol naturel

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé		Tamisat cumulé (%)
		(g)	(%)	
50	0	0	0	100
40	110,84	110,84	0,68	99,32
31,5	71,72	182,56	1,12	98,88
25	40,75	223,31	1,37	98,63
20	6,52	229,83	1,41	98,59
16	50,53	280,36	1,72	98,28
10	164,63	444,99	2,73	97,27
5	17,64	17,64	4,16	95,84
4	7,07	24,71	4,73	95,27
2	36,05	60,76	7,66	92,34
1	61,26	122,02	12,62	87,38
0,4	86,68	208,7	19,65	80,35
0,2	564,73	773,43	65,42	34,58
0,1	147,6	921,03	77,39	22,61
0,0063	22,8	943,83	78,65	21,35

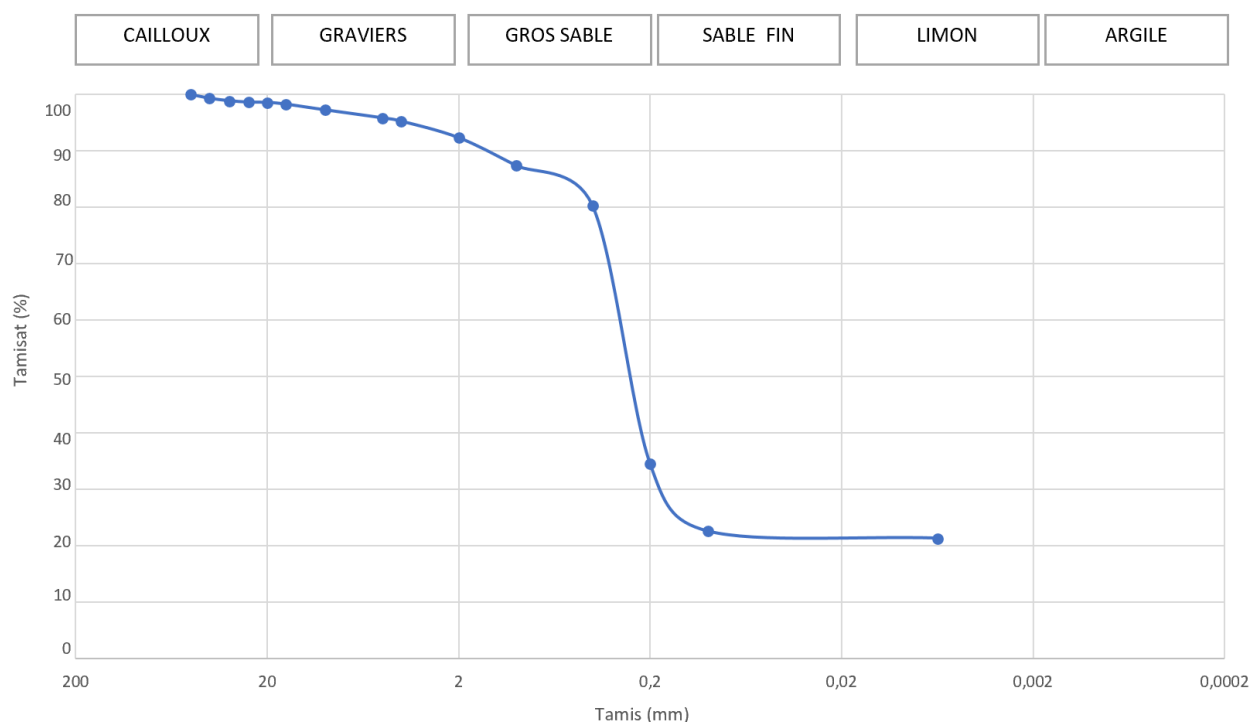


Figure 3.1 : Courbe d'analyse granulométrique

Le sol contient une forte proportion de fines. Cela se voit par les valeurs élevées de tamisat cumulé pour les mailles les plus petites (22,61% passent le tamis 0,1 mm ; 21,35% passent le 0,0063 mm).

Le sol est majoritairement composé de particules assez fines, avec très peu de gravier ou sable grossier. Cela indique un sol peu perméable, potentiellement plastique et sensible à l'eau.

3.1.2 Limites d'Atterberg

Une droite de tendance est tracée pour obtenir la limite de liquidité (W_L), point d'intersection à 20 mm de pénétration comme le montrent le tableau 3.2 et la figure 3.2.

Tableau 3.2: Résultats de l'essai du cône tombant (Limites de liquidité)

Pénétration du cône (mm)	Teneur en eau W (%)
17,22	31,2
20,28	33,5
22,38	36,1
24,34	38,2

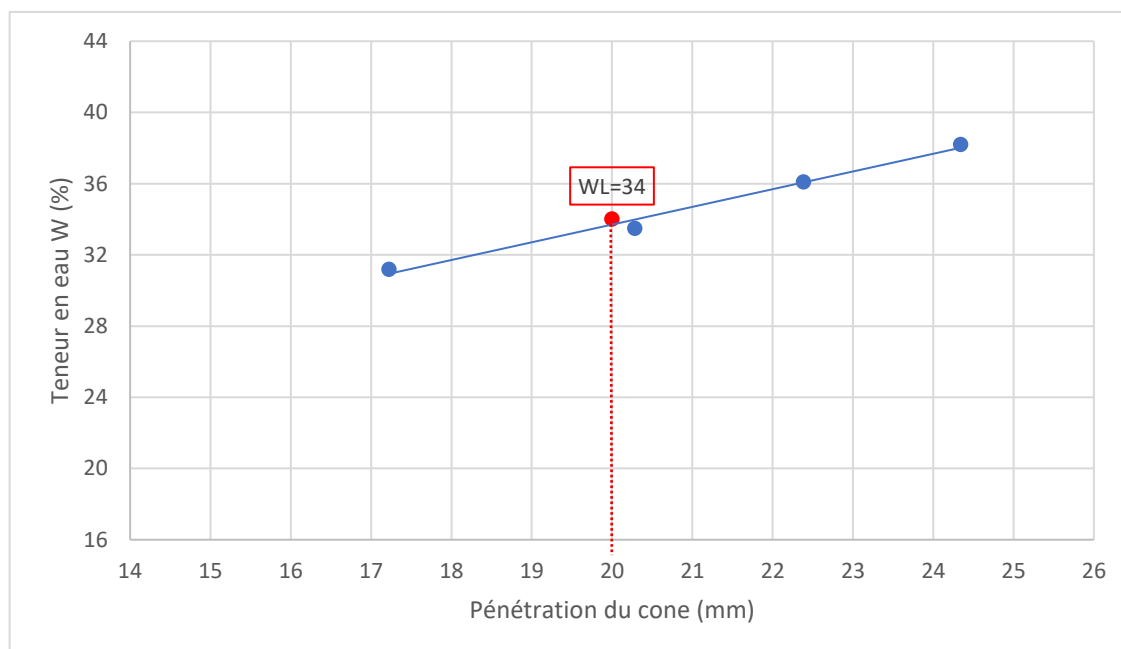


Figure 3.2 : Droite de détermination de la limite de liquidité

$$\begin{cases} \text{Limite de liquidité } W_L = 34\% \\ \text{Limite de plasticité } W_P = 17\% \\ \text{Indice de plasticité } I_P = 17\% \end{cases}$$

Le sol analysé est plastique avec un indice I_p de 17 %, ce qui indique un comportement argileux cohésif avec bonne plasticité, mais qui peut poser des problèmes de stabilité ou de portance en milieu humide. Il faudra en tenir compte pour tout projet de fondation ou de terrassement.

3.1.3 Valeur au bleu de méthylène

La valeur mesurée lors de l'essai au bleu de méthylène est présentée dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Tableau récapitulatif de l'essai au bleu de méthylène

Paramètre	Valeur
Masse du sol utilisée (g)	60,00
Fraction 0-5 mm (%)	95,84
Volume de bleu injecté (cm ³)	105,00
Masse de bleu injectée (g)	1,05
Valeur de bleu de méthylène (VBS) (g /100g matériau sec)	1,67

Ce résultat permet d'évaluer la teneur en argiles actives du sol étudié, qui s'élève à 1,67 g de bleu de méthylène pour 100 g de sol sec.

D'après le tableau de classification (tableau 2.5), cette valeur se situe légèrement au-dessus du seuil de 1,5 g/100 g, correspondant à la transition entre les sols sable-limoneux et les sols sable-argileux. Le sol analysé présente ainsi une proportion modérée en argiles actives, sans toutefois relever de la catégorie des sols argileux proprement dits.

Cette teneur intermédiaire en particules fines indique un comportement légèrement plastique, associé à une sensibilité à l'eau non négligeable. Ces caractéristiques peuvent influencer certaines propriétés mécaniques du sol, notamment en matière de compressibilité et de portance.

Cette donnée vient appuyer la nécessité d'un traitement visant à améliorer les performances globales du sol.

3.1.4 Analyse chimique sommaire

La composition chimique du sol est présentée dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Résultats de l'analyse chimique sommaire

Constituant chimique	Teneur en masse (%)
Sulfates ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$)	Traces
Carbonates (CaCO_3)	12,93
Chlorures (NaCl)	0,58
Anhydride carbonique (CO_2)	5,68

- L'absence significative de sulfates indique que le sol ne présente pas de risque de réactions sulfatiques susceptibles de compromettre la durabilité des matériaux ou des traitements envisagés.
- La teneur relativement élevée en carbonates (12,93 %) suggère une origine partiellement calcaire, ce qui peut influencer la réactivité du sol face aux agents de traitement. Les sols riches en carbonates sont généralement neutres à basiques et présentent une certaine inertie chimique.
- La concentration modérée en chlorures (0,58 %) demeure en dessous des seuils critiques, ce qui limite les risques de corrosion, notamment pour les éléments métalliques éventuellement présents dans les fondations ou les ouvrages en contact avec le sol.
- La présence mesurée d'anhydride carbonique (5,68 %), en lien direct avec la décomposition des carbonates, confirme la nature calcaire du sol observée.

Dans l'ensemble, les résultats de cette analyse chimique ne révèlent pas de contraintes particulières, mais la présence marquée de carbonates devra être prise en compte lors de l'interprétation des performances mécaniques après traitement. Ce profil chimique, globalement stable, constitue un cadre favorable à une amélioration des propriétés du sol.

3.1.5 Essai Proctor modifié

Les résultats expérimentaux issus de l'essai Proctor modifié réalisé sur le sol brut sont regroupés dans les tableaux 3.5 et 3.6.

Tableau 3.5 : Résultats des pesées et calculs des densités

Essai n°	1	2	3	4	5
Teneur en eau initiale (%)	6	8	10	12	14
Poids moule (g)	5815	5815	5815	5815	5815
Poids total humide (moule + sol humide) (g)	10185	10570	10812	10808	10788
Poids sol humide (g)	4370	4755	4997	4993	4973
Poids sol sec (g)	4126	4411	4555	4462	4370
Volume moule (cm3)	2295	2295	2295	2295	2295
Densité humide γ_h (t/m3)	1,80	1,92	1,98	1,94	1,90
Densité sèche γ_d (t/m3)	1,79	1,92	1,98	1,94	1,90

Tableau 3.6 : Détermination de la teneur en eau

Echantillon n°	1	2	3	4	5
Poids de tare (g)	149	144	146	143	152
Poids total humide (tare + sol humide) (g)	454	647	954	699	1067
Poids sol humide (g)	305	503	954	556	915
Poids total sec (tare + sol sec) (g)	437	619	909	668	1016
Poids sol sec (g)	288	475	763	525	864
Poids d'eau (g)	17	28	45	31	51
Teneur en eau final W (%)	5,9	7,8	9,7	11	13,8

Sur la base des résultats des deux tableaux précédents, un tableau de synthèse a été établi, regroupant les valeurs de densité sèche et de teneur en eau pour les différents essais réalisés (Tableau 3.7).

Tableau 3.7 : Densité sèche en fonction de la teneur en eau

Echantillon	1	2	3	4	5
Densité sèche γ_d (t/m ³)	1,79	1,92	1,98	1,94	1,90
Teneur en eau final W (%)	5,9	7,8	9,7	11,0	13,8

Enfin, les données ont été exploitées à l'aide du logiciel *SOLTEST* pour tracer la courbe d'essai Proctor modifié (Figure 3.3), illustrant l'évolution de la densité sèche en fonction de la teneur en eau.

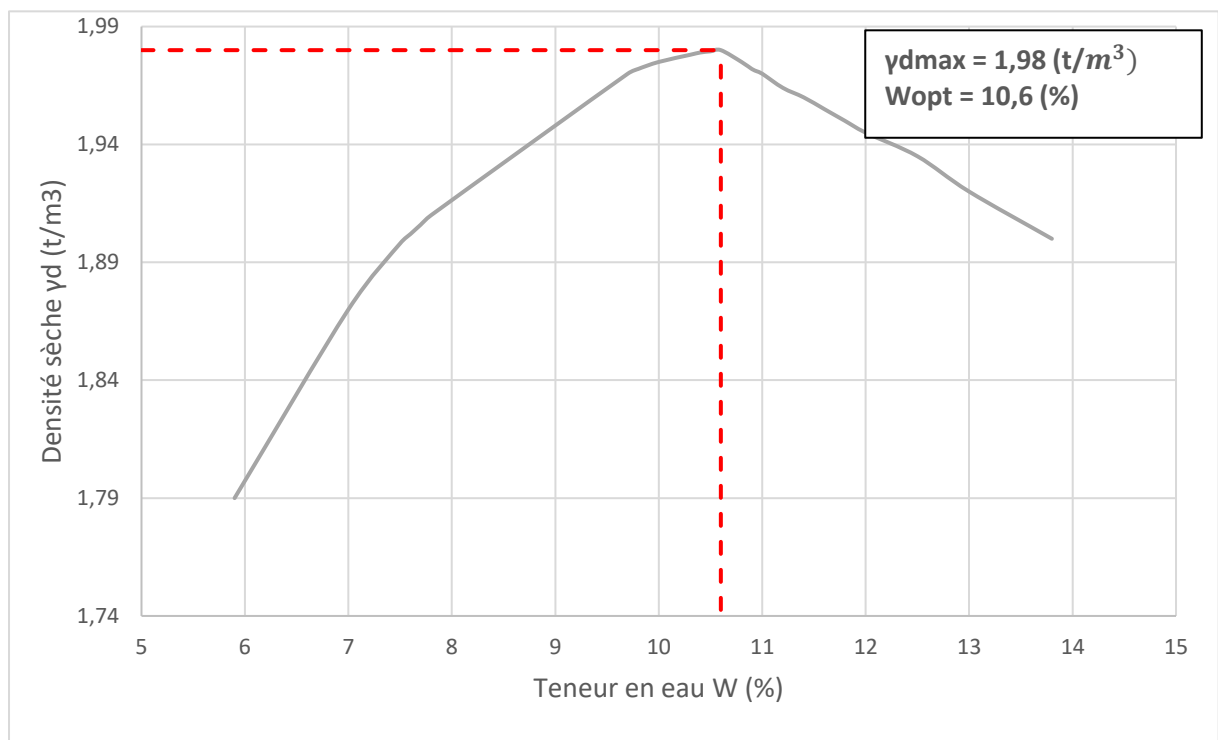


Figure 3.3 : Courbe de compactage du sol brut (essai Proctor modifié)

Cette courbe a permis de déterminer les paramètres optimaux de compactage. La densité sèche maximale obtenue est de 1,98 g/cm³, pour une teneur optimale en eau de 10,6 %.

Ces résultats indiquent que le sol présente une compacité satisfaisante, avec une structure suffisamment dense et peu plastique. La teneur en eau optimale relativement faible suggère une proportion modérée d'argiles et de limons dans la composition granulométrique, ce qui est cohérent avec la valeur de VBS de 1,67, caractérisant un sol sableux à tendance légèrement argileuse.

La densité sèche maximale atteinte confirme également que le sol peut répondre favorablement à un compactage sous une énergie élevée, ce qui est un critère favorable en vue de son traitement par ajout de granulats de pneus.

Ces paramètres serviront de valeurs de référence pour comparer les performances des différentes formulations traitées.

3.1.6 Essai CBR

3.1.6.1 CBR immédiat

Les essais CBR immédiats ont été réalisés pour trois niveaux d'énergie : 56 coups, 25 coups et 10 coups par couche. Pour chaque configuration, les données sont regroupées dans les tableaux 3.8 à 3.13.

- **Compactage à 56 coups**

Tableau 3.8 : Etat initial de l'échantillon (56C)

Teneur en eau de compactage		Densité sèche	
N° tare	01	Masse du moule (g)	5953
Masse de la tare (g)	144	Masse totale humide (g)	11985
Masse totale humide (g)	603	Masse du sol humide (g)	5032
Masse total sec (g)	560	Masse du sol sec (g)	4573
Masse d'eau (g)	43	Teneur en eau W (%)	10,43
Masse du sol sec (g)	416	Volume du moule (cm ³)	2295
Teneur en eau W (%)	10,43	Densité sèche γ_d (t/m ³)	1,98
Teneur en eau optimale W (%)	10,6	Densité sèche optimale γ_d (t/m ³)	1,98

Tableau 3.9: Poinçonnement (56C)

Temps	Enfoncement en mm	Force totale
		Lecture (KN)
30''	0,625	0,40
1'	1,25	0,93
1'40''	2,00	1,75
2'	2,50	4,33
4'	5,00	7,41
6'	7,50	8,015
8'	10,00	11,25
10'	12,50	13,57
Calculs et résultats de l'indice portant :		
$\frac{\text{Effort de pénétration à } \mathbf{2,5\text{ mm}} \text{ d'enfoncement (KN)}}{13,35} \times 100 = \mathbf{32,43}$		
$\frac{\text{Effort de pénétration à } \mathbf{5\text{ mm}} \text{ d'enfoncement (KN)}}{19,93} \times 100 = \mathbf{37,18}$		
L'indice recherché est la plus grande valeur : 37,18		

- **Compactage à 25 coups**

Tableau 3.10 : Etat initial de l'échantillon (25C)

Teneur en eau de compactage		Densité sèche	
N° tare	02	Masse du moule (g)	5793
Masse de la tare (g)	146	Masse totale humide (g)	10733
Masse totale humide (g)	563	Masse du sol humide (g)	4940
Masse totale sèche (g)	525	Masse du sol sec (g)	4482
Masse d'eau (g)	38	Teneur en eau W (%)	10,2
Masse du sol sec (g)	379	Volume du moule (cm ³)	2295
Teneur en eau W (%)	10,2	Densité sèche γ_d (t/m ³)	1,95
Teneur en eau optimale W (%)	10,6	Densité sèche optimale γ_d (t/m ³)	1,98

Tableau 3.11: Poinçonnement (25C)

Temps	Enfoncement en mm	Force totale
		Lecture (KN)
30''	0,625	0,195
1'	1,25	0,360
1'40''	2,00	0,670
2'	2,50	1,040
4'	5,00	1,869
6'	7,50	2,560
8'	10,00	3,440
10'	12,50	4,330
Calculs et résultats de l'indice portant :		
$\frac{\text{Effort de pénétration à } \mathbf{2,5\text{ mm}} \text{ d'enfoncement (KN)}}{13,35} \times 100 = 7,80$		
$\frac{\text{Effort de pénétration à } \mathbf{5\text{ mm}} \text{ d'enfoncement (KN)}}{19,93} \times 100 = 9,37$		
L'indice recherché est la plus grande valeur : 9,37		

- **Compactage à 10 coups**

Tableau 3.12 : Etat initial de l'échantillon (10C)

Teneur en eau de compactage		Densité sèche	
N° tare	03	Masse du moule (g)	5614
Masse de la tare (g)	142	Masse totale humide (g)	10324
Masse totale humide (g)	668	Masse du sol humide (g)	4710
Masse total sec (g)	620	Masse du sol sec (g)	4279
Masse d'eau (g)	48	Teneur en eau W (%)	10,05
Masse du sol sec (g)	478	Volume du moule (cm ³)	2295
Teneur en eau W (%)	10,05	Densité sèche γ_d (t/m ³)	1,86
Teneur en eau optimale W (%)	10,6	Densité sèche optimale γ_d (t/m ³)	1,98

Tableau 3.13 : Poinçonnement (10C)

Temps	Enfoncement en mm	Force totale
		Lecture (KN)
30''	0,625	0,59
1'	1,25	1,06
1'40''	2,00	1,35
2'	2,50	1,53
4'	5,00	2,449
6'	7,50	3,45
8'	10,00	4,38
10'	12,50	5,28
Calculs et résultats de l'indice portant :		
$\frac{\text{Effort de pénétration à } \mathbf{2,5\text{ mm}} \text{ d'enfoncement (KN)}}{13,35} \times 100 = 11,46$		
$\frac{\text{Effort de pénétration à } \mathbf{5\text{ mm}} \text{ d'enfoncement (KN)}}{19,93} \times 100 = 12,28$		
L'indice recherché est la plus grande valeur : 12,28		

Les données issues des essais précédents ont été exploitées à l'aide du logiciel *SOLTEST* afin d'obtenir la courbe de variation de l'indice CBR en fonction de la densité sèche (Figure 3.4).

Tableau 3.14 : Les valeurs essentielles introduites dans le logiciel

	10 C/C	25 C/C	56 C/C
Teneur en eau W (%)	10,05	10,2	10,43
Densité sèche γ_d (t/m ³)	1,86	1,95	1,98
Indice CBR I_{CBR} (%)	9,37	12,28	30,05

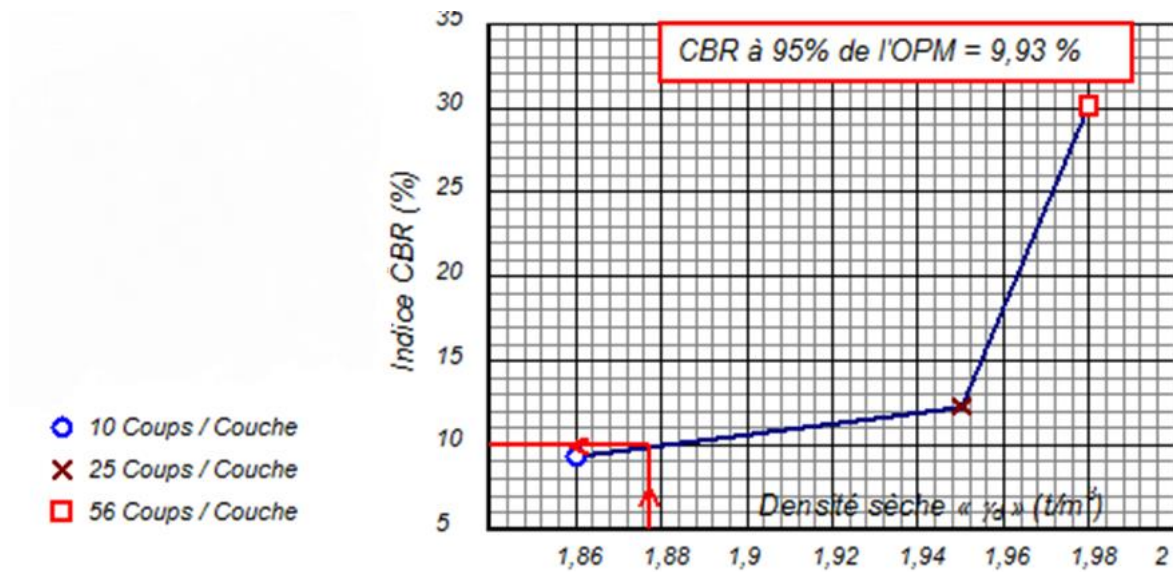


Figure 3.4 : Graphe CBR immédiat (SOLTEST)

L'indice CBR immédiat mesuré sur le sol brut est de **9,93 %**, cette valeur correspond à un sol de portance moyenne. Cela indique que, sans condition d'humidité excessive, le sol présente une résistance à l'enfoncement modérée, ce qui peut être suffisant pour certaines couches de forme ou plateformes de travail. Toutefois, une amélioration peut s'avérer nécessaire en fonction des charges appliquées et des conditions d'exploitation.

3.1.6.2 CBR avec Immersion

Les essais CBR avec immersion ont été réalisés pour trois niveaux d'énergie : 56 coups, 25 coups et 10 coups. Les données sont regroupées dans les tableaux 3.15 à 3.23.

- **Compactage à 56 coups**

Tableau 3.15 : Etat initial de l'échantillon (56C)

Teneur en eau de compactage		Densité sèche	
N° tare	04	Masse du moule (g)	5816
Masse de la tare (g)	150	Masse totale humide (g)	10774
Masse totale humide (g)	628	Masse du sol humide (g)	4958
Masse totale sèche (g)	583	Masse du sol sec (g)	4491
Masse d'eau (g)	45	Teneur en eau W (%)	10,39
Masse du sol sec (g)	433	Volume du moule (cm ³)	2295
Teneur en eau W (%)	10,39	Densité sèche γ_d (t/m ³)	1,95
Teneur en eau optimale W (%)	10,6	Densité sèche optimale γ_d (t/m ³)	1,98

Tableau 3.16 : Etat final de l'échantillon après imbibition (56C)

Teneur en eau après immersion			
Masse de la tare (g)	149		
Masse totale humide (g)	386	Masse du sol imbibé	
Masse totale sèche (g)	360	Masse totale humide après imbibition (g)	10819
Masse d'eau (g)	26	Masse totale humide avant imbibition (g)	10774
Masse du sol sec (g)	211	Masse d'eau absorbée (g)	45
Teneur en eau W (%)	12,32	Différence de teneur en eau (%)	1,93

Tableau 3.17 : Poinçonnement (56C)

Temps	Enfoncement en mm	Force totale
		Lecture (KN)
30''	0,625	0,318
1'	1,25	0,682
1'40''	2,00	1,298
2'	2,50	2,727
4'	5,00	5,215
6'	7,50	6,682
8'	10,00	9,036
10'	12,50	10,996
Calculs et résultats de l'indice portant : $\frac{\text{Effort de pénétration à } \mathbf{2,5\text{ mm}} \text{ d'enfoncement (KN)}}{13,35} \times 100 = 20,43$ $\frac{\text{Effort de pénétration à } \mathbf{5\text{ mm}} \text{ d'enfoncement (KN)}}{19,93} \times 100 = 26,16$ L'indice recherché est la plus grande valeur : 26,16		

- **Compactage à 25 coups**

Tableau 3.18 : Etat initial de l'échantillon (25C)

Teneur en eau de compactage		Densité sèche	
N° tare	05	Masse du moule (g)	5953
Masse de la tare (g)	142	Masse totale humide (g)	10644
Masse totale humide (g)	696	Masse du sol humide (g)	4691
Masse total sec (g)	645	Masse du sol sec (g)	4259
Masse d'eau (g)	51	Teneur en eau W (%)	10,13
Masse du sol sec (g)	503	Volume du moule (cm ³)	2295
Teneur en eau W (%)	10,13	Densité sèche γ_d (t/m ³)	1,855
Teneur en eau optimale W (%)	10,6	Densité sèche optimale γ_d (t/m ³)	1,98

Tableau 3.19 : Etat final de l'échantillon après imbibition (25C)

Teneur en eau après immersion			
Masse de la tare (g)	140		
Masse totale humide (g)	510	Masse du sol imbibé	
Masse total sec (g)	467	Masse totale humide après imbibition (g)	10930
Masse d'eau (g)	43	Masse totale humide avant imbibition (g)	10644
Masse du sol sec (g)	327	Masse d'eau absorbée (g)	286
Teneur en eau <i>W</i> (%)	13,31	Différence de teneur en eau (%)	3,18

Tableau 3.20 : Poinçonnement (25C)

Temps	Enfoncement en mm	Force totale
		Lecture (KN)
30''	0,625	0,119
1'	1,25	0,364
1'40''	2,00	0,655
2'	2,50	2,071
4'	5,00	3,872
6'	7,50	4,526
8'	10,00	6,232
10'	12,50	7,962
Calculs et résultats de l'indice portant :		
$\frac{\text{Effort de pénétration à } \mathbf{2,5\text{ mm}} \text{ d'enfoncement (KN)}}{13,35} \times 100 = 15,51$		
$\frac{\text{Effort de pénétration à } \mathbf{5\text{ mm}} \text{ d'enfoncement (KN)}}{19,93} \times 100 = 19,42$		
L'indice recherché est la plus grande valeur : 19,42		

- **Compactage à 10 coups**

Tableau 3.21 : Etat initial de l'échantillon (10C)

Teneur en eau de compactage		Densité sèche	
N° tare	06	Masse du moule (g)	5789
Masse de la tare (g)	144	Masse totale humide (g)	10400
Masse totale humide (g)	543	Masse du sol humide (g)	4611
Masse total sec (g)	506	Masse du sol sec (g)	4183
Masse d'eau (g)	37	Teneur en eau W (%)	10,22
Masse du sol sec (g)	362	Volume du moule (cm ³)	2295
Teneur en eau W (%)	10,22	Densité sèche γ_d (t/m ³)	1,82
Teneur en eau optimale W (%)	10,6	Densité sèche optimale γ_d (t/m ³)	1,98

Tableau 3.22 : Etat final de l'échantillon après imbibition (10C)

Teneur en eau après immersion			
Masse de la tare (g)	142		
Masse totale humide (g)	529	Masse du sol imbibé	
Masse total sec (g)	483	Masse totale humide après imbibition (g)	10574
Masse d'eau (g)	46	Masse totale humide avant imbibition (g)	10400
Masse du sol sec (g)	332	Masse d'eau absorbée (g)	174
Teneur en eau W (%)	13,85	Différence de teneur en eau (%)	3,63

Tableau.3.23 : Poinçonnement (10C)

Temps	Enfoncement en mm	Force totale
		Lecture (KN)
30''	0,625	0,982
1'	1,25	1,236
1'40''	2,00	1,812
2'	2,50	2,160
4'	5,00	3,584
6'	7,50	4,446
8'	10,00	4,906
10'	12,50	5,226
Calculs et résultats de l'indice portant : Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (KN) $\frac{\quad}{13,35} \times 100 = 16,17$ Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (KN) $\frac{\quad}{19,93} \times 100 = 17,98$ L'indice recherché est la plus grande valeur : 17,98		

Comme pour l'indice CBR immédiat, les résultats obtenus ont été traités à l'aide du logiciel *SOLTEST* pour établir la courbe de variation de l'indice CBR en fonction de la densité sèche.

Tableau 3.24 : Les valeurs essentielles introduites dans le logiciel

	10 C/C	25 C/C	56 C/C
Teneur en eau W (%)	10,22	10,13	10,39
Densité sèche γ_d (t/m ³)	1,82	1,85	1,95
Indice CBR I_{CBR} (%)	17,98	19,42	26,16

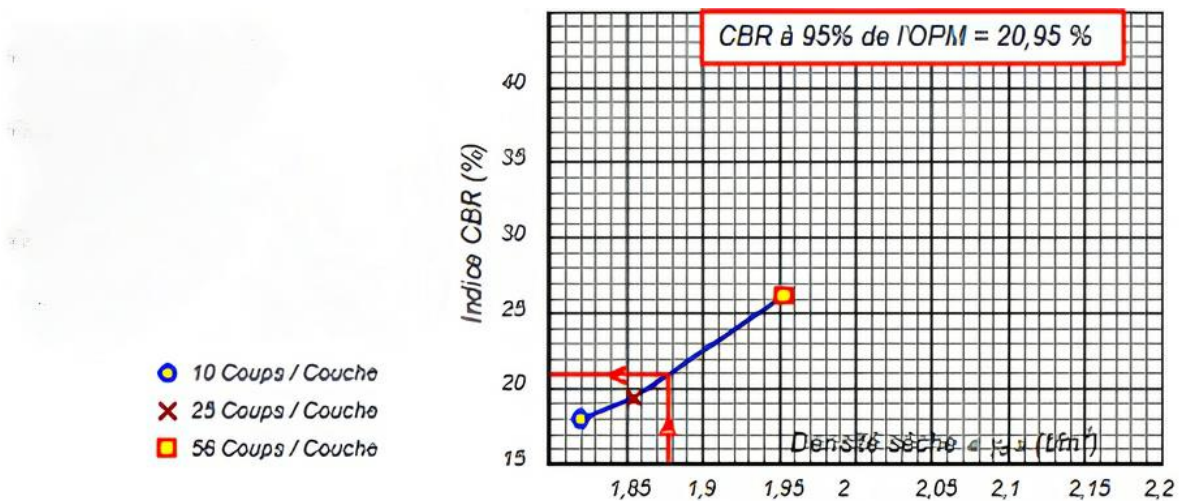


Figure 3.5 : Graphe CBR après immersion (SOLTEST)

Après immersion, l'indice CBR du sol atteint **20,83 %**, ce qui traduit une amélioration significative de la portance en présence d'eau. Cette évolution peut s'expliquer par une meilleure réorganisation des grains fins sous l'effet de l'humidité. Une telle valeur place le sol dans la catégorie des bons matériaux, compatibles avec des applications plus exigeantes, à condition que les conditions de saturation soient correctement maîtrisées.

3.1.7 Classification du sol selon GTR

Selon le Guide des terrassements des remblais et des couches de forme (GTR, 2023), et en se basant sur le pourcentage de fines obtenu (21,35 %) ainsi que sur l'indice de plasticité ($I_p = 17\%$), notre sol est classé comme un sol intermédiaire de type **I2**, correspondant à des sables argileux à très argileux.

Pour ce type de sol, l'influence des fines est prépondérante, et son comportement se rapproche de celui d'un sol fin de même plasticité. Toutefois, la proportion plus importante de la fraction sableuse accentue sa sensibilité à l'eau. Concernant les conditions d'utilisation en remblai, un traitement à la chaux est recommandé afin d'améliorer sa stabilité et ses performances mécaniques [67].

3.2 Comportement du sol traité par granulats de pneus

3.2.1 Influence sur le comportement à la compaction (Proctor)

La figure 3.6 présente les courbes Proctor des différents essais Proctor effectués sur le sol brut et sur le sol à différents pourcentages de granulats de pneus variant de 2 à 8%.

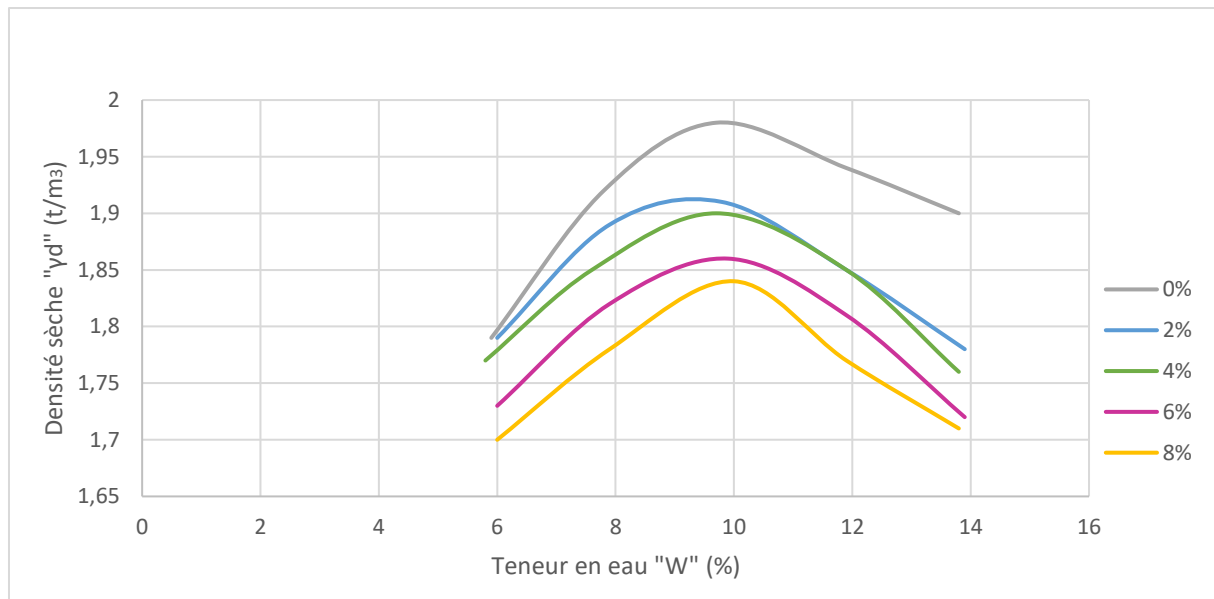


Figure 3.6 : Courbes Proctor pour les différents pourcentages d'ajout de granulats de pneus

L'analyse des différentes courbes issues des essais Proctor, en comparaison avec celle du sol brut, met en évidence l'impact significatif de l'ajout de granulats de pneus usagés sur les paramètres de compactage. Une diminution progressive de la masse volumique sèche maximale ainsi qu'une augmentation de la teneur en eau optimale sont observées à mesure que le pourcentage de granulats augmente.

Il apparaît que, pour de faibles taux d'incorporation, les courbes restent relativement proches de celle du sol non traité. En revanche, des écarts plus marqués sont constatés pour des taux plus élevés, traduisant une modification plus prononcée du comportement du matériau. Cette évolution indique que l'ajout de granulats accroît la quantité d'eau nécessaire pour atteindre l'optimum de compactage, tout en réduisant la densité sèche maximale obtenue.

Concrètement, la masse volumique sèche maximale passe de 1,98 t/m³ pour le sol brut à 1,82 t/m³ pour un ajout de 8 % de granulats. Cette baisse s'explique par la faible densité des granulats de pneus comparée à celle des particules minérales du sol. Leur incorporation se traduit donc par un remplacement partiel des éléments plus denses, ce qui réduit la densité globale du mélange.

3.2.2 Influence sur la portance (essai CBR)

La figure 3.7 illustre l'évolution simultanée des indices CBR à l'état immédiat et après immersion en fonction du pourcentage de granulats de pneus ajoutés.

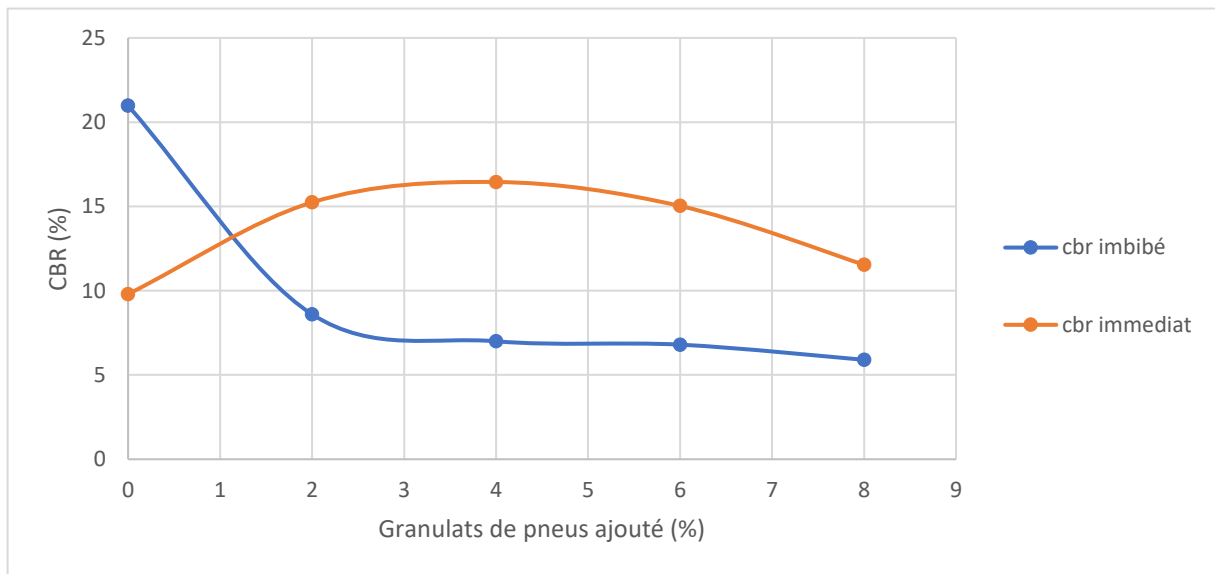


Figure 3.7 : Variation de CBR immédiat et CBR avec immersion

3.2.2.1 CBR immédiat

L'essai CBR à l'état immédiat montre que l'ajout de granulats de pneus usagés améliore globalement la portance du sol. L'indice passe de 9,80 % pour le sol brut à 11,54 % pour un ajout de 8 %, avec une performance maximale atteinte autour de 4 %, indiquant un optimum d'efficacité à 16,45%.

Cette amélioration résulte d'une meilleure structuration du mélange, les granulats jouant un rôle de calage entre les particules, ce qui favorise la compacité et la transmission des charges. L'effet est probablement lié à la nature élastique et légère des granulats, qui permet un meilleur emboîtement des grains et une répartition plus efficace des efforts.

Cependant, au-delà de l'optimum, une légère baisse de performance est observée, probablement due à un excès de particules légères perturbant la cohésion du squelette granulaire.

Ces résultats sont cohérents avec ceux présentés dans l'étude de Juliana et al. (2020d) [68], où l'indice CBR non immergé atteint un maximum de 36,09 % pour un taux de 4 % de caoutchouc broyé. Toutefois, les valeurs obtenues dans notre cas sont nettement inférieures. Cette différence peut être attribuée à plusieurs facteurs, notamment à la nature du sol étudié, à la taille plus grossière des granulats de pneus utilisés, ou encore aux conditions de compactage appliquées lors des essais. Malgré cette variation, l'amélioration observée demeure significative, en particulier à 4 % d'ajout, ce qui confirme le potentiel de cette technique pour le renforcement des couches de forme, notamment dans des contextes peu ou modérément humides.

En somme, l'incorporation modérée de granulats de pneus améliore significativement la portance du sol à court terme, avec une efficacité optimale à des teneurs faibles à moyennes.

3.2.2.2 CBR avec Immersion

Les résultats de l'essai CBR après immersion montrent une diminution notable de la portance du sol à mesure que le pourcentage de granulats de pneus incorporés augmente. L'indice CBR passe de 20,98 % pour le sol brut à 5,90 % pour un ajout de 8 %, traduisant une perte progressive de résistance en milieu saturé.

Cette tendance indique que l'ajout de granulats de pneus, bien qu'utile à d'autres égards, affaiblit le comportement mécanique du sol sous l'effet de l'eau. Cela peut s'expliquer par la nature des granulats, qui présentent une densité plus faible et une faible capacité à se lier efficacement aux particules du sol dans des conditions humides. En présence d'eau, la cohésion interne du mélange se trouve réduite, affectant directement la portance.

L'étude de Jarushi et Talibullah (2023) [69] sur un sol argileux de faible plasticité montre une baisse régulière et continue de l'indice CBR imbibé dès le premier ajout de granulats de pneus (5 %), sans aucun gain initial. Le CBR imbibé passe de 11 % (0 %) à 7 % (5 %) puis chute davantage à 3 % (15–20 %). Cette tendance est en parfaite analogie avec nos résultats, où le CBR imbibé diminue immédiatement dès 2 % (de 20,98 % à 8,60 %), confirmant l'impact négatif de la compressibilité et de la perte de cohésion du mélange en présence d'eau.

En conclusion, l'incorporation de granulats de pneus dans le sol entraîne une baisse de la résistance à l'immersion, ce qui limite leur utilisation dans les contextes où la saturation ou la présence prolongée d'eau est probable.

3.2.2.3 Comparaison entre les deux CBR

La comparaison entre les indices CBR à l'état immédiat et après immersion met en évidence un comportement contrasté du sol traité en fonction de son état d'humidité. À l'état immédiat, l'incorporation de granulats de pneus entraîne une amélioration globale de la portance, avec un optimum observé autour de 4 %, au-delà duquel les performances tendent à diminuer.

En revanche, après immersion, une baisse progressive de l'indice CBR est constatée dès les faibles taux d'incorporation, indiquant une sensibilité accrue du mélange à la saturation en eau.

Cette divergence s'explique par le fait que les granulats de pneus, bien qu'efficaces pour structurer le sol à court terme, présentent une faible cohésion en milieu humide. Ainsi, si les granulats améliorent la compacité et la résistance en conditions sèches, ils s'avèrent moins adaptés aux environnements exposés à une forte humidité.

3.2.3 Influence sur les paramètres œdométriques

3.2.3.1 Influence sur l'indice de compression et de gonflement

La figure 3.8 présente la variation des indices de compression et de gonflement en fonction du pourcentage de granulats ajoutés.

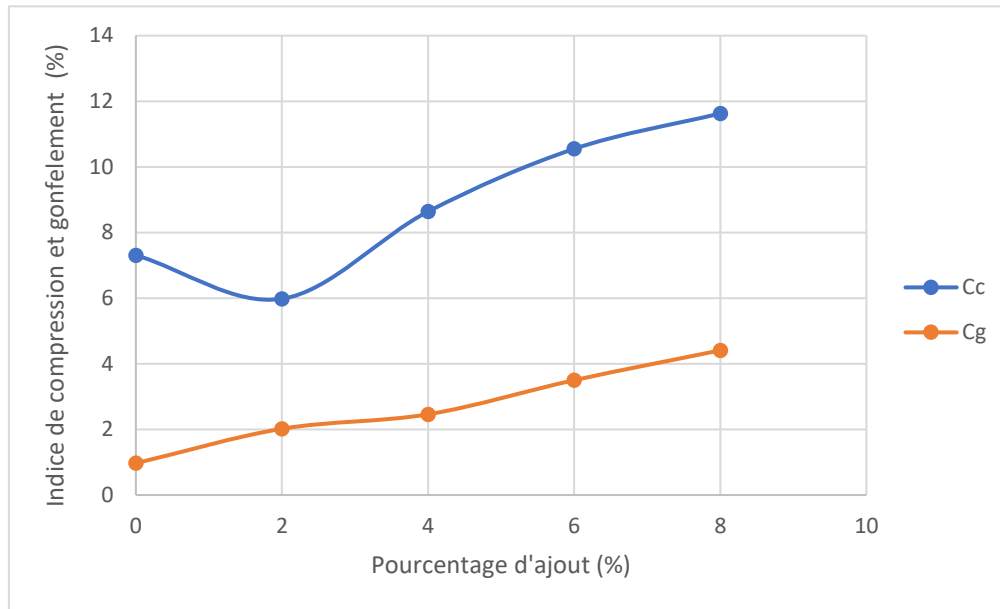


Figure 3.8 : Variation des indices de compression et de gonflement et en fonction des pourcentages d'ajout

L'observation de la courbe des indices de compression révèle une diminution de cet indice après ajout de 2 % de granulats de pneus. Le sol brut présente un indice de compression de 7,31, qui diminue à 5,98 avec l'ajout de 2 % de granulats. Cette réduction peut être attribuée à l'effet de remplissage initial : les granulats comblent les vides entre les particules du sol, favorisant une meilleure réorganisation granulaire et une compacité accrue, ce qui limite la déformabilité du sol.

Cependant, à partir d'un taux d'ajout de 4 %, l'indice de compression augmente de manière significative, atteignant 8,64, puis 10,55 à 6 % et 11,63 à 8 %. Cette tendance à la hausse peut s'expliquer par l'influence croissante du comportement élastique des granulats de pneus. En quantités plus importantes, ces granulats modifient la structure du sol en introduisant des zones plus compressibles en raison de leur élasticité, réduisant ainsi l'efficacité de la compaction et augmentant la compressibilité globale du sol.

L'analyse de la courbe des indices de gonflement montre également une augmentation progressive de cet indice avec l'ajout des granulats. L'indice de gonflement du sol brut est de 0,97, alors qu'il atteint 2,02 à 2 %, 2,46 à 4 %, 3,5 à 6 % et 4,41 à 8 %. Cette évolution peut être liée à la modification de la structure poreuse du sol induite par les granulats de pneus, qui, bien que peu absorbants, peuvent créer des chemins préférentiels pour l'eau et ainsi augmenter la rétention hydrique. Cette capacité accrue à retenir l'eau favorise le développement du gonflement, surtout à des taux d'ajout plus élevés.

Ainsi, un pourcentage de 2 % de granulats de pneus semble optimal, permettant une amélioration des propriétés mécaniques du sol en termes de compressibilité, tout en limitant l'augmentation de l'indice de gonflement.

3.2.3.2 Influence sur la compressibilité

La figure 3.9 présente les courbes de variation de la compressibilité en fonction des contraintes effectives, pour le sol brut et à différents pourcentages de granulats de pneus

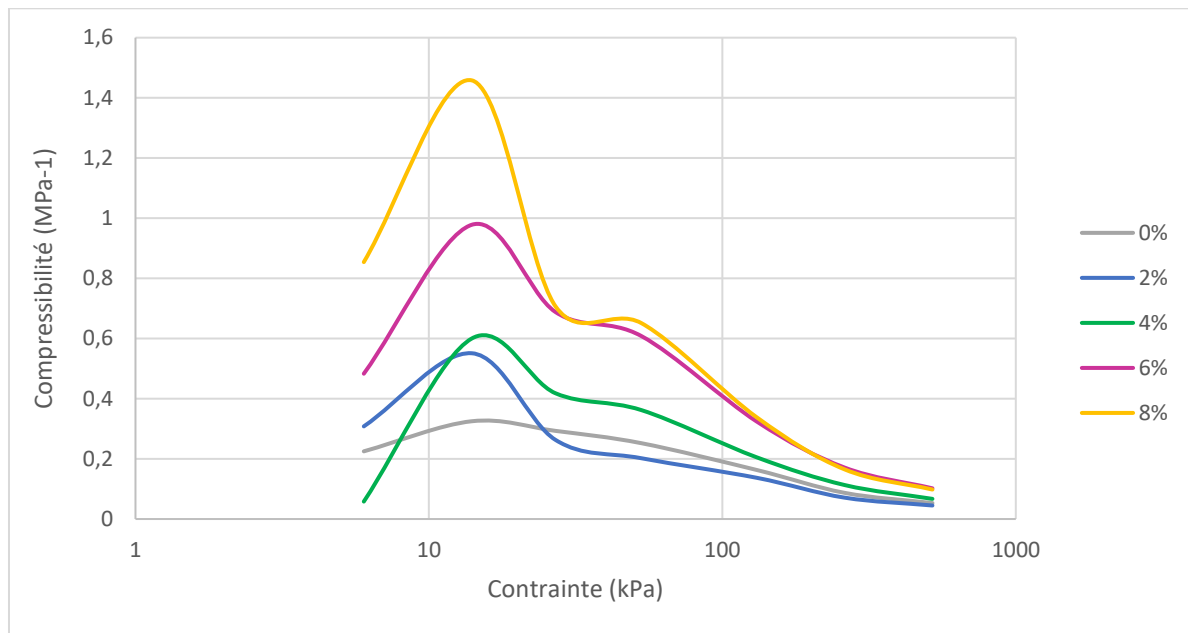


Figure 3.9 : Variation de la compressibilité en fonction des contraintes effectives lors de l'ajout des granulats de pneus

L'observation des courbes de compressibilité montre que le sol brut présente une déformation modérée, avec un maximum à 14 kPa, suivi d'une diminution progressive sous l'effet de la compaction. L'ajout de 2 % de granulats de pneus entraîne une augmentation de la compressibilité initiale, traduisant une structure légèrement plus lâche. Toutefois, la diminution rapide des déformations sous contraintes élevées reflète une bonne stabilité du mélange.

À 4 %, on observe une déformation encore plus marquée à faible contrainte, mais une stabilisation progressive au-delà de 27 kPa. Cela indique un réarrangement efficace de la structure interne après un affaiblissement initial. En revanche, les taux de 6 % et 8 % génèrent des compressibilités très élevées, même sous forte contrainte. Ces résultats traduisent une perte de cohésion dans la matrice du sol, causée par un excès de granulats élastiques.

Globalement, un ajout modéré de granulats (2–4 %) permet d'améliorer temporairement le compactage sous forte contrainte, mais au-delà, le sol devient instable. La quantité optimale semble se situer entre 2 % et 4 %, au-delà de laquelle les propriétés mécaniques se détériorent.

3.2.3.3 Influence sur la courbe œdométrique

La figure 3.10 regroupe les courbes œdométriques, illustrant la variation des indices de vides en fonction des contraintes en σkPa pour les différents pourcentages de granulats.

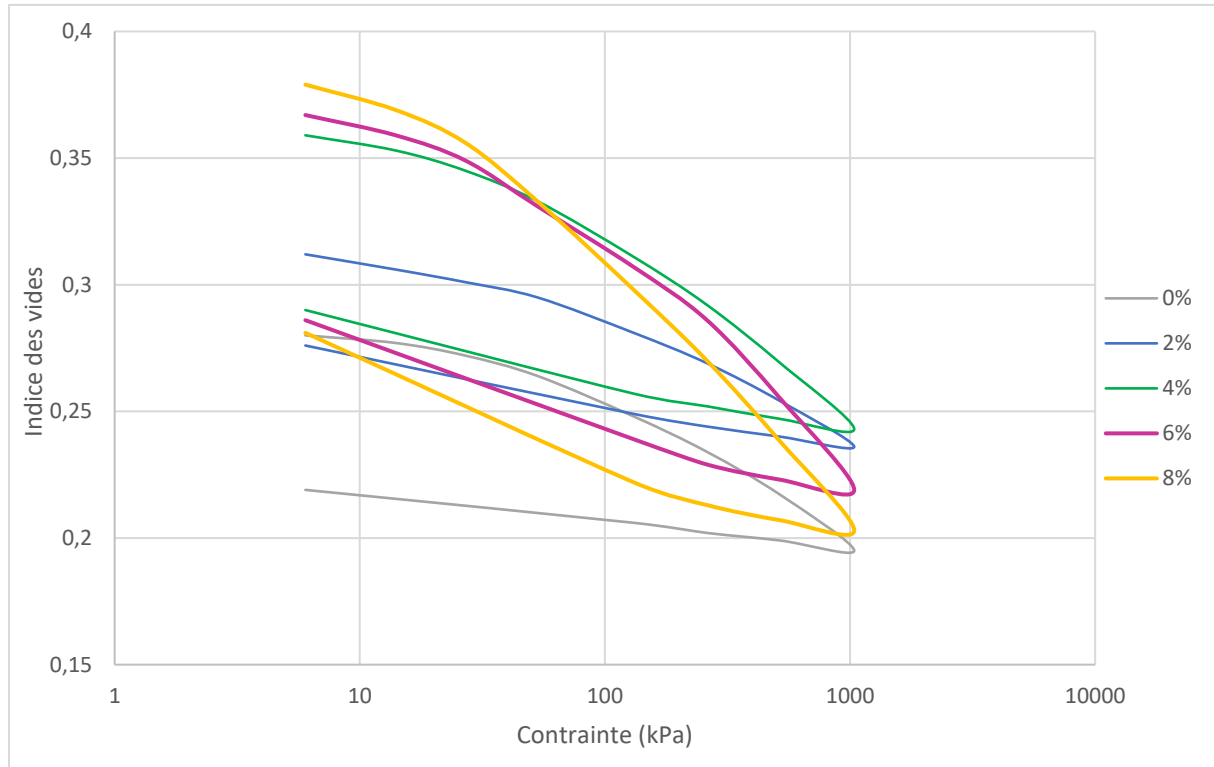


Figure 3.10 : Courbes œdométriques - variation des indices de compression et de gonflement en fonction du pourcentage des granulats de pneus

L'analyse comparative des courbes œdométriques montre que les courbes des échantillons traités avec les granulats de pneus se situent au-dessus de celle du sol brut. Cela traduit une augmentation des indices des vides, aussi bien à l'état initial qu'à l'état final.

Cette augmentation des indices des vides peut être attribuée à la granulométrie plus grossière et à la forme irrégulière des granulats de pneus. Ces caractéristiques induisent une augmentation des espaces interstitiels, empêchant un arrangement compact et efficace des particules de sol.

En effet, les granulats de pneus, en raison de leur texture et de leur élasticité, ne s'imbriquent pas aussi bien que les particules de sol fines et cohésives. Ils génèrent ainsi une structure plus lâche, avec davantage de vides dans la matrice du sol.

3.2.4 Influence sur la résistance au cisaillement

La figure 3.11 regroupe les variations linéaires des contrainte de cisaillement à la rupture en kPa en fonction des contrainte normales lors de l'ajout du granulat des pneus. Cette courbe nous a permis de déterminer les deux paramètres fondamentaux du critère de Mohr-Coulomb, à savoir la cohésion (c) et l'angle de frottement interne (φ) du sol, à travers une régression linéaire de la relation $\tau = c + \sigma \cdot \tan(\varphi)$.

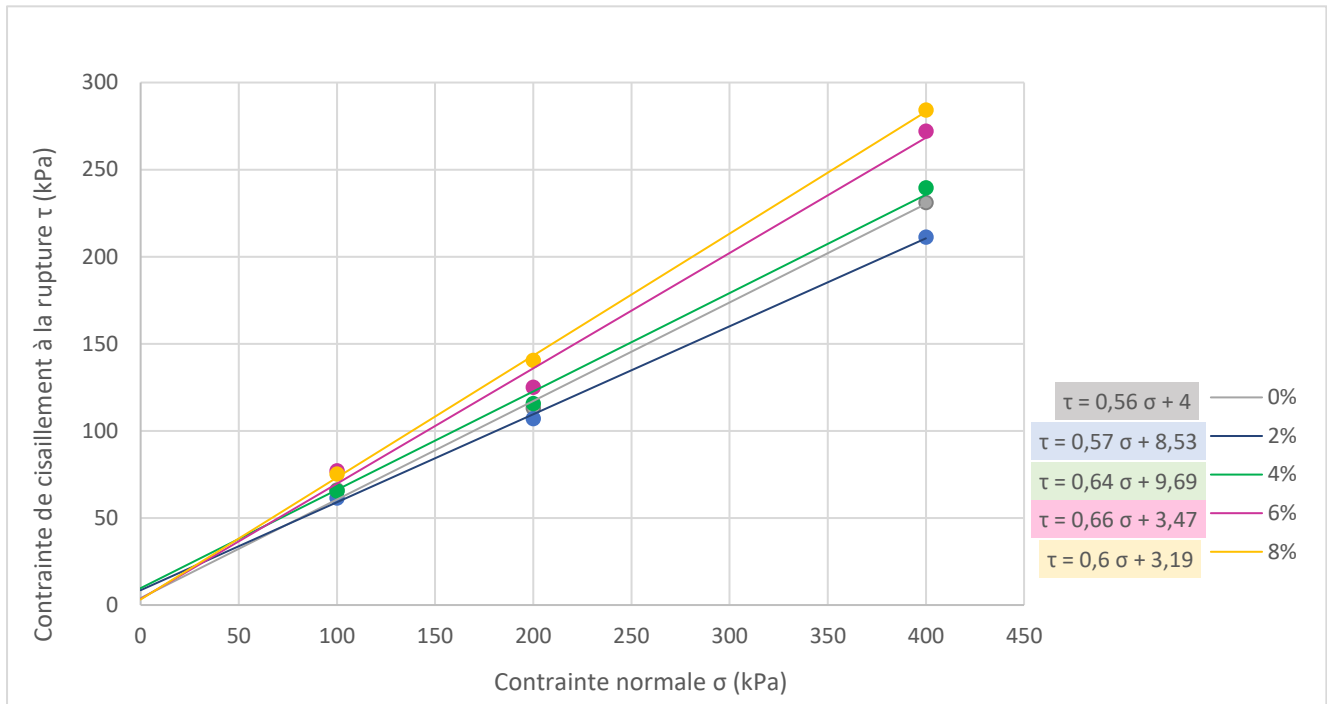


Figure 3.11 : Courbe cisaillement - droites intrinsèque

La figure 3.12 illustre la variation de la cohésion en fonction des pourcentages d'ajout de granulats de pneus.

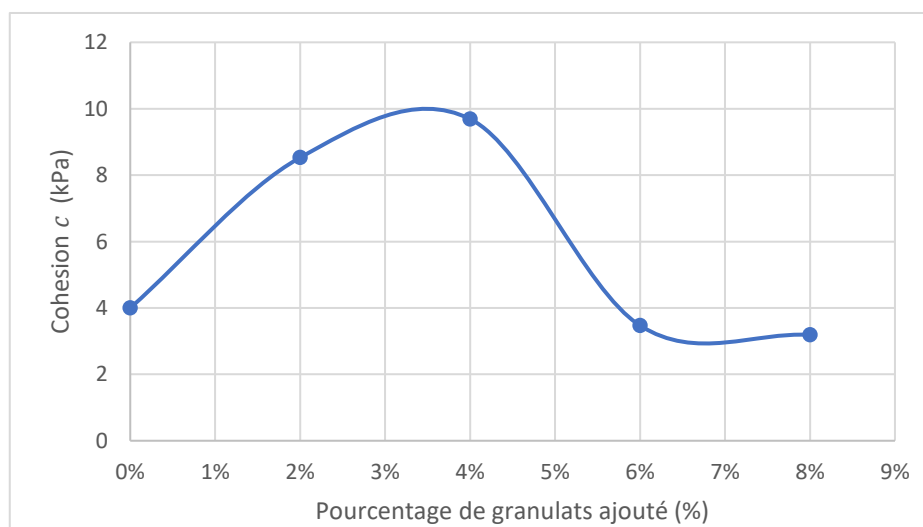


Figure 3.12 : Courbe cisaillement - variation de la cohésion en fonction des pourcentages d'ajout des granulats

On observe une amélioration notable de la cohésion, qui atteint une valeur maximale pour un taux d'ajout de 4 %, avant de diminuer progressivement, puis de se stabiliser. Ces résultats montrent que l'ajout de granulats issus de pneus usagés contribue globalement à renforcer la cohésion du sol, en particulier pour des taux d'incorporation modérés.

En effet, jusqu'à 4 %, les granulats comblent les vides du sol et améliorent la liaison entre les particules, produisant un effet de renforcement mécanique. En revanche, au-delà de ce seuil, l'excès de matière élastique rend le mélange plus souple, ce qui affaiblit les liaisons internes et entraîne une baisse apparente de la cohésion.

La figure 3.13 illustre la variation de l'angle de frottement interne en fonction des pourcentages d'ajout de granulats de pneus.

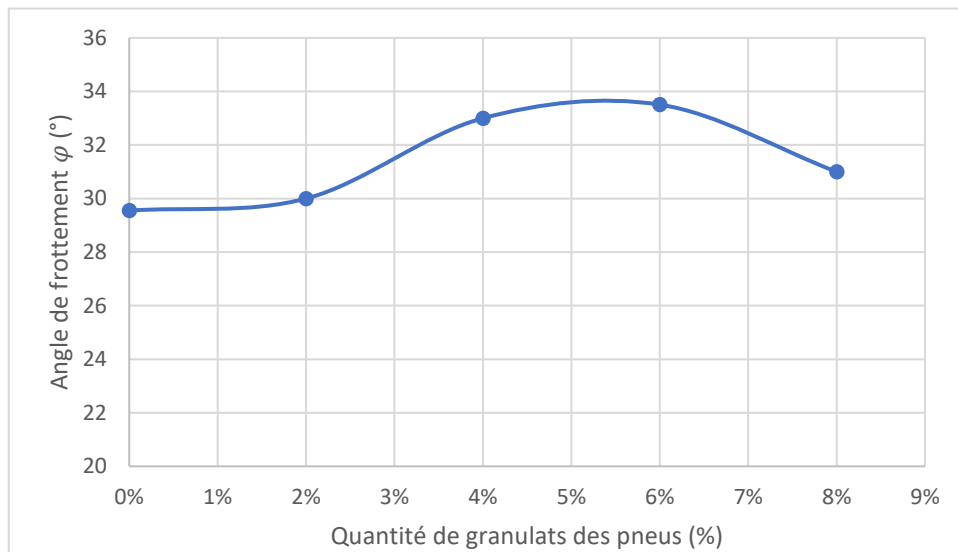


Figure 3.13 : Courbe cisaillement - variation de l'angle de frottement en fonction des pourcentages d'ajout des granulats

On observe une augmentation progressive de l'angle de frottement jusqu'à atteindre une valeur maximale de $33,51^\circ$ pour un taux d'ajout de 6 %.

Cette amélioration peut être attribuée à la rugosité des granulats et à leur capacité à se déformer légèrement, ce qui favorise un bon emboîtement entre les particules du sol, appelé blocage mécanique. Ce phénomène empêche les grains de glisser facilement les uns sur les autres, ce qui améliore la résistance au cisaillement.

Toutefois, au-delà de ce seuil, une légère diminution de l'angle est enregistrée à 8 %, probablement en raison d'un excès de particules souples qui rendent la structure globale plus déformable, réduisant ainsi l'efficacité du frottement interne.

Le tableau 3.25 récapitule les résultats obtenus dans cet essai qui sont en accord avec ceux rapportés par l'étude de Amin et al. [70], qui ont montré que l'ajout de particules de pneus dans un sol sableux améliore les paramètres de cisaillement (angle de frottement interne et cohésion) jusqu'à un certain pourcentage optimal, au-delà duquel une diminution est observée. Cette tendance est similaire à celle observée dans nos essais, où l'angle de frottement augmente

jusqu'à 6 % d'ajout, atteignant une valeur maximale de 33,51°, puis diminue à 8 %. De même, la cohésion augmente jusqu'à 4 % avant de décroître.

L'étude de Amin et al. [70] explique cette évolution par l'effet de renforcement mécanique dû à l'angulosité des particules de pneus et à leur capacité d'interverrouillage avec les grains du sol, ce qui améliore la résistance au cisaillement. Cependant, à des taux plus élevés, la prédominance des particules souples de caoutchouc dans la zone de cisaillement affaiblit les interfaces sable-sable et sable-pneu, ce qui entraîne une réduction de la résistance globale du mélange. Ces observations confirment la présence d'un taux d'ajout optimal, au-delà duquel l'effet stabilisant diminue.

Tableau 3.25 : Les résultats de la cohésion et l'angle de frottement

Pourcentages d'ajout	Cohésion c (kPa)	Angle de frottement φ (°)
0%	4,00	29,55
2%	8,53	30,02
4%	9,69	33,05
6%	3,47	33,51
8%	3,19	31,10

En conclusion, l'ajout modéré de granulats de pneus améliore la résistance au cisaillement du sol grâce à un bon emboîtement entre les particules. Au-delà d'un certain seuil, l'excès de caoutchouc rend le sol plus souple. Il existe donc un taux optimal à ne pas dépasser.

Conclusion Générale

Ce travail s'est inscrit dans une démarche de valorisation des déchets de pneus usagés à travers leur incorporation sous forme de granulats dans un sol à des fins de stabilisation mécanique. L'objectif principal était d'évaluer l'impact de différents pourcentages de granulats de pneus sur les propriétés géotechniques du sol, notamment la portance, la compressibilité, le gonflement et les caractéristiques de cisaillement.

Les résultats obtenus ont montré qu'un ajout modéré de granulats de pneus (2 à 4 %) permet d'améliorer certaines propriétés du sol, notamment une augmentation de la portance à l'état immédiat, une réduction de l'indice de compression à faibles taux, et une amélioration temporaire de la cohésion et de l'angle de frottement interne. Toutefois, à des taux d'ajout plus élevés (6 à 8 %), une dégradation des propriétés mécaniques a été observée, notamment une augmentation excessive de la compressibilité et du gonflement, ainsi qu'une chute significative de la résistance à l'immersion.

Ces résultats soulignent le potentiel limité mais réel des granulats de pneus dans l'amélioration des sols en milieux secs ou modérément humides. L'élasticité, la faible densité et la granulométrie grossière des granulats leur confèrent des effets contrastés : ils peuvent améliorer la compacité à faible dose, mais génèrent une structure plus lâche et moins cohésive à forte teneur, surtout en présence d'eau.

Ainsi, cette étude met en évidence la nécessité d'un dosage optimal, généralement situé entre 2 % et 4 %, pour tirer parti des avantages des granulats de pneus sans compromettre la stabilité du sol. Elle illustre également la faisabilité d'une valorisation environnementale de déchets difficiles à traiter, tout en contribuant à une démarche plus durable dans les projets de construction et de génie civil.

Cette recherche ouvre la voie à plusieurs perspectives d'approfondissement, notamment :

- Réaliser des essais complémentaires (cisaillement essai triaxial, perméabilité etc.) pour mieux comprendre les comportements mécaniques du mélange à long terme ;
- Étudier le comportement des sols traités avec des granulométries différentes de granulats de pneus (plus fines ou plus homogènes) ;
- Tester l'efficacité de ce renforcement sur d'autres types de sols, notamment des sols fins à faible portance ou à haute plasticité (argiles, vases) ;
- Évaluer la durabilité et la stabilité du sol traité dans des conditions climatiques extrêmes ou en présence d'eau sur le long terme ;
- Examiner les impacts environnementaux potentiels, notamment les effets de lixiviation des composés issus du caoutchouc sur les écosystèmes environnants.

Bibliographie

- [1] Djadouni, H., & Trouzine, H. (2016). Evaluation de l'impact environnemental d'un ouvrage de soutènement avec un remblai renforcé par des pneus usagés. *Academic Journal of Civil Engineering*, 34(1), 380-387. <https://doi.org/10.26168/ajce.34.1.47>
- [2] Yasar, A., Rana, S., Moniruzzaman, M., Nazar, M., Tabinda, A. B., Haider, R., Ahmad, A., Mukhtar, A., Qyyum, M. A., & Ullah, S. (2021). Quality and environmental impacts of oil production through pyrolysis of waste tyres. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101565.
- [3] Amasuomo, E., & Baird, J. (2016). The concept of waste and waste management. *Journal of Management and Sustainability*, 6(4), 88.
- [4] Makhloufi, S., & Bouadam, R. (2022). Inert waste management in developing countries: From regulation to practice – The case of Constantine (Algeria). *International Journal of Innovative Studies in Sociology and Humanities*, 7(11), 140–148.
- [5] Kolendo, G., Voronova, V., Bumanis, G., Korjamins, A., & Bajare, D. (2024). Life cycle assessment of end-of-life tire disposal methods and potential integration of recycled crumb rubber in cement composites. *Applied Sciences*, 14(24), 11667.
- [6] Battista, M., Gobetti, A., Agnelli, S., & Ramorino, G. (2020). Post-consumer tires as a valuable resource: Review of different types of material recovery. *Environmental Technology Reviews*, 10(1), 1–25.
- [7] Terminal, T. (2021, June 2). A brief history of the automobile tire. The Tire Terminal Inc.
- [8] Palos, R., Gutiérrez, A., Vela, F. J., Olazar, M., Arandes, J. M., & Bilbao, J. (2021). Waste refinery: The valorization of waste plastics and end-of-life tires in refinery units – A review. *Energy & Fuels*, 35(5), 3529–3557.
- [9] Sienkiewicz, M., Kucinska-Lipka, J., Janik, H., & Balas, A. (2012). Progress in used tyres management in the European Union : A review. *Waste Management*, 32, 1742–1751.
- [10] Akca, E., Gursel, A., & Sen, N. (2018). A review on devulcanization of waste tire rubber. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 6(1), 154.
- [11] Janin, C. (1999). Chimie et pneumatiques. *L'Actualité Chimique*, (225), 67–71.
- [12] Omar, M. F. et al. (2024). A comprehensive review of natural rubber composites: Properties, compounding aspects, and renewable practices with natural fibre reinforcement. *Journal of Renewable Materials*, 0(0), 1–10.
- [13] Speight, J. G. (2019). Monomers, polymers, and plastics. In Elsevier eBooks (pp. 597–649).
- [14] Kim, J., & Hwangbo, H. (2018). Sensor-based real-time detection in vulcanization control using machine learning and pattern clustering. *Sensors*, 18(9), 3123.
- [15] Solutions For Waste. How to recycle used tires in Algeria.
- [16] Chikhi, M. (2020). Problématique des pneus usagés en Algérie. ResearchGate.

- [17] ORDECO. Pneumatiques.
- [18] Sadaka, F. (2010). Étude de la dégradation contrôlée des poly-diènes : application au recyclage des déchets pneumatiques [Thèse de doctorat, Université du Mans].
- [19] Exploitations. Les pneus de génie civil. *Bois & Forêts des Tropiques*, 73, 31–42.
- [20] Guelmine, L., Hadjab, H., & Benazzouk, A. (2018). Effet des granulats de caoutchouc recyclés de pneus usagés sur les propriétés physiques et mécaniques de mortier de ciment [Communication scientifique, Séminaire international de Génie Civil – SIGC 2018].
- [21] Ifsttar. (2013). Analyse du cycle de vie (ACV) des pneumatiques usagés.
- [22] Cao, W. (2007). Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. *Construction and Building Materials*, 21, 1011–1015.
- [23] Li, R., Xiao, F., Amirkhanian, S., You, Z., & Huang, J. (2017). Developments of nano materials and technologies on asphalt materials – A review. *Construction and Building Materials*, 143, 633–648.
- [24] European Tyre and Rubber Manufacturers' Association. (2017). Annual Report 2017. Brussels.
- [25] European Tyre and Rubber Manufacturers' Association. (2019). End-of-life tyres management – Europe 2018 status.
- [26] U.S. Tire Manufacturers Association. (2020). 2019 U.S. Scrap Tire Management Summary.
- [27] Agence Nationale des Déchets. Fiche signalétique : Pneus usagés (PU).
- [28] Sibille, L. (2018). Bases de la géotechnique – Module MXG4 IUT Génie Civil et Construction Durable [Cours]. HAL.
- [29] INSA Toulouse. Chapitre 1 – Géotechnique [Cours en ligne].
- [30] Geotechnique HSE. Classification des sols.
- [31] Das, B. M. (2010). Principles of geotechnical engineering (7e éd.). Cengage Learning.
- [32] Vanapalli, S. K., & Fredlund, D. G. (2000). Influence of climatic factors on slope stability. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(6), 1256–1272.
- [33] Bonetti, J. A., Bayer, C., Vieira, F. C. B., Anghinoni, I., & Salton, J. C. (2017). Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. *Soil and Tillage Research*, 174, 104–112.
- [34] Nalbantoglu, Z., & Tuncer, E. R. (2001). Soil stabilization materials: Properties and techniques. ResearchGate.
- [35] Kumar, S., & Singh, S. K. (2023). Subgrade soil stabilization using geosynthetics: A critical review. *Construction and Building Materials*.
- [36] Aziagba, K. N. (2024). Stabilisation des sols en mouvement – Techniques et approches modernes [PDF]. ResearchGate.

- [37] Boukharouba, I., Razkallah, S., & Teffahi, S. (2016). Mouvements et stabilisation des sols [Mémoire de master, Université 08 Mai 1945 de Guelma].
- [38] Rababe, N. (2024). Les essais de laboratoire en géotechnique.
- [39] Robitaille, V., & Tremblay, D. (1997). Mécanique des sols : théorie et pratique. Modulo Éditeur.
- [40] Sadjad, A. W. Essai Proctor, Essai CBR. Scribd.
- [41] Bourokba Mrabent, S. A., & Bengra, L. (2022). Manuel de travaux pratiques de mécanique des sols et de géotechnique routière [Polycopié, Université USTO-MB].
- [42] AFNOR. (2014). Norme NF P 94-093. Sols : reconnaissance et essais — détermination des références de compactage d'un matériau — essai Proctor normal - essai Proctor modifié.
- [43] Géotechnique HSE. Essai Proctor : Compactage, courbe et interprétation.
- [44] Lamothe, J. (2018). Mécanique des sols – Cours et exercices corrigés. HAL.
- [45] Lindqvist International. Presse CBR automatique.
- [46] Moulay Omar, H., Abbou, M., Akacem, M., & Mekerta, B. (2017). Étude des caractéristiques mécaniques des matériaux locaux de la région d'Adrar utilisés en constructions routières. ResearchGate.
- [47] Garnier, J. (2002). Modélisation physique en géotechnique. Revue Française de Géotechnique, (98), 5–28.
- [48] Nadir, R. (2024, November 18). Essais de consolidation du sol – L'essai œdométrique expliqué. GéoTechnique & HSE.
- [49] Mahmoudi, Y. (2024). Travaux pratiques de mécanique des sols I et II – GC L2/L3. Université de Chlef.
- [50] Giannopoulos, A., & Ta, A. N. Travaux pratiques : Essai œdométrique – Rapport. École Nationale des Ponts et Chaussées, sous la direction de P. Reiffsteck.
- [51] Sibille, L. (2011). TP – Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande / Essai triaxial [Licence]. France. HAL Archives.
- [52] Lekouaghet, N. (2023). *TP Mécanique des sols 2* [Polycopié]. Université 8 Mai 1945 de Guelma, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Civil et Hydraulique.
- [53] Mahmoudi, Y. (2024). *Travaux pratiques de mécanique des sols I et II : GC L2–L3* [Polycopié]. Université Hassiba Benbouali de Chlef, Faculté de Génie Civil et d'Architecture.
- [54] Rababe, N. (2024, 18 novembre). L'essai de cisaillement direct : un outil essentiel pour les ingénieurs géotechniciens. Iconomie.
- [55] Sols-Mesures. (2015). *Mémo : Essais de cisaillement* [Document technique].
- [56] Recytech Algérie. Processus de recyclage des pneus.

- [57] EnergyCle. (2023). L'importance et le processus de recyclage des pneus : Un guide complet.
- [58] PubMed. (2016). Tyre fire in Spain and its environmental consequences.
- [59] Agence Nationale des Déchets. Présentation des pneus usagés.
- [60] Torretta, V., Rada, E. C., Ragazzi, M., Trulli, E., Istrate, I. A., & Cioca, L. I. (2015). Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. *Waste Management*, 45, 152–160.
- [61] Shalaby A., Khan R.A. Design of unsurfaced roads constructed with large-size shredded rubber tires: a case study. *Resour. Conserv. Recycl.*, 2005 ; 44(4) : 318–332.
- [62] Ministère de l'Environnement (Algérie). (2022, mai). Liste des entreprises de traitement des déchets spéciaux dangereux.
- [63] Si R.Z., Wang J.Q., Guo S.C., Dai Q.L., Han S. Evaluation of laboratory performance of self-consolidating concrete with recycled tire rubber. *J. Clean. Prod.*, 2018; 180:823–831.
- [64] Cheng H., Hu Y., Reinhard M. Environmental and health impacts of artificial turf: a review. *Environ. Sci. Technol.*, 2014; 48(4):2114–2129. doi: 10.1021/es4044193.
- [65] Hashamfirooz, M., Dehghani, M. H., Khanizadeh, M., Aghaei, M., Bashardoost, P., Hassanvand, M. S., Hassanabadi, M., & Momeniha, F. (2025). A systematic review of the environmental and health effects of waste tires recycling. *Heliyon*, 11(2), e41909. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41909>
- [66] AFRITE, S., & BENMERZEG, K. (2021). Recyclage & valorisation des pneus usagés en poudrette de caoutchouc comme additif dans l'utilisation des bitumes (Mémoire de Master, Université A. Mira – Béjaïa, Algérie). Département de Génie des Procédés.
- [67] Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité (IDRRIM). (2023). *Guide des terrassements des remblais et des couches de forme : Fascicule 2 – Annexes techniques*. Éditions du Cerema.
- [68] Juliana, I., Fatin, A. R., Rozaini, R., Masyitah, M. N., Khairul, A. H., & Nur Shafieza, A. (2020). *Effectiveness of crumb rubber for subgrade soil stabilization*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 849, 012029.
- [69] Jarushi, F., Talibullah, A. (2023). The effect of granulate waste tires on the geotechnical properties of clays. *International Journal of Geotechnical Engineering*, Advance online publication.
- [70] Amin, H., Khan, B. J., Ahmad, M., Hakamy, A., Sikandar, M. A., & Sabri, M. M. S. (2023). Evaluation of shear strength parameters of sustainable utilization of scrap tires derived geo-materials for civil engineering applications. *Frontiers In Earth Science*, 11.