

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

ANNÉE : 2019

## MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

# EFFETS DES DECHETS DES PNEUS SUR LES PROPRIETES GEOTECHNIQUES D'UNE ARGILE

Option

Géotechnique

Par

**OUSLATI FATIMA**

**MENDER SOUHEYLA**

Directrice du mémoire    G. BOUKHATEM    MC    Université Badji Mokhtar Annaba

DEVANT LE JURY

Président    B. SBARTAI    Pr    Université Badji Mokhtar Annaba  
Examineurs    A. HACEN HAOUCH    Pr    Université Badji Mokhtar Annaba  
                         N. CHELGHOUM    Pr    Université Badji Mokhtar Annaba



## *Remerciements*

*Dieu merci pour nous avoir donnée la santé, la volonté et le courage sans lesquels ce travail n'aurait pas été réalisé.*

*Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au L'laboratoire national de l'habitat et de la construction –Ain Assel-El Tarf.*

*J'adresse mes vifs remerciements à mon encadreur **Dr. BOUKHATEM GHANIA** pour m'avoir suivi le long de ce travail et tous les efforts qu'elle a fait pour son accomplissement.*

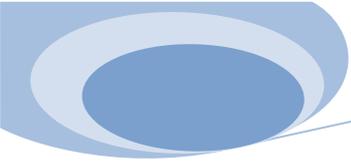
*Nous remercions profondément les membres des jurys, qui nous ont fait l'honneur de juger ce travail.*

*Nous remercions également toute l'équipe du l'aboratoire.*

*Nous adressons également notre remerciement à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.*

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





## Résumé

Plusieurs techniques en génie civil, associant des déchets à des sols, sont connues dans le monde. Les déchets de pneus sont des déchets encombrants et polluants et non biodégradables. L'association de ces derniers à des sols cohérents peut donner des matériaux performants et solutionner plusieurs problèmes rencontrés par l'ingénieur dans le secteur de la géotechnique. Dans cette étude, nous allons incorporer des déchets de pneus dans le sol en différents pourcentages: 2, 4 et 6%. Ces pourcentages sont exprimés par rapport à la masse sèche du sol. Le programme expérimental entrepris consiste à étudier l'effet que produisent ces déchets sur les caractéristiques de résistance mécaniques du sol, qu'on a trouvé favorable pour ces derniers, d'où les résultats trouvés sont motivant. En plus de l'avantage environnemental de l'approche proposée dans cette étude, la création d'une nouvelle application qui permette d'absorber une quantité de déchets du pneu.

**Mots clés** : déchet de pneu, argile, essai géotechnique, mélange

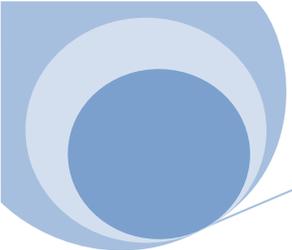


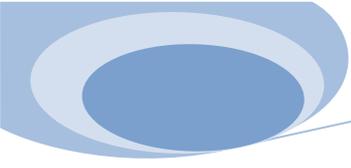
## ملخص

تعرف العديد من التقنيات في الهندسة المدنية ، والتي تربط النفايات بالتربة العالم. نفايات الإطارات هي نفايات مرهقة وغير قابلة للتحلل. مزيج من هذه التربة المتماسكة يمكن أن توفر مواد فعالة وحل العديد من المشاكل التي يواجهها المهندس في مجال الجيوتقنية.

في هذه الدراسة ، سوف ندمج نفايات الإطارات في التربة بنسب مئوية مختلفة: 2 و 4 و 6%. يتم التعبير عن هذه النسب بالنسبة إلى الكتلة الجافة للتربة. يتكون البرنامج التجريبي الذي تم تنفيذه في دراسة التأثير الناتج عن هذه النفايات على خصائص المقاومة الميكانيكية للتربة، والتي تم العثور عليها بشكل إيجابي، والتي حفزت النتائج التي تم العثور عليها. بالإضافة إلى الفائدة البيئية للنهج المقترح في هذه الدراسة ، إنشاء تطبيق جديد يسمح بامتصاص كمية النفايات من الإطارات.

**الكلمات المفتاحية:** نفايات الإطارات ، الطين ، الاختبار الجيوتقني ، الخليط





## Abstract

Several techniques in civil engineering, associating waste with soil, are known in the world. Tire waste is a cumbersome, polluting and non-biodegradable waste. The combination of these with coherent soils can provide efficient materials and solve several problems encountered by the engineer in the field of geotechnics. In this study, we will incorporate tire waste into the soil in different percentages: 2, 4 and 6%. These percentages are expressed in relation to the dry mass of the soil. The experimental program undertaken consists in studying the effect produced by these wastes on the mechanical resistance characteristics of the soil, which has been found favorable for the latter, from which the results found are motivating. In addition to the environmental benefit of the approach proposed in this study, the creation of a new application that allows to absorb a quantity of waste from the tire.

**Key words:** tire waste, clay, geotechnical test, mixture



**SOMMAIRE**

**Remerciement**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**INTRODUCTION GENERALE**  
**CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

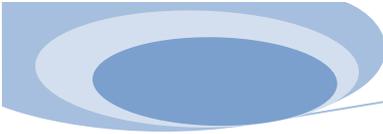
<b>I INTRODUCTION</b> .....	1
I.1 AVANTAGES TECHNIQUE DU TRAITEMENT DU SOL .....	1
I.2 LE SOL .....	2
I.2.1 Définition du sol .....	2
I.2.2 Propriétés physiques du sol .....	2
I.2.3 Caractéristiques des sols .....	2
I.2.4 La formation d'un sol .....	2
I.2.5 Les types de sol.....	3
I.2.6 La portance d'un sol .....	3
I.2.7 Caractéristiques et propriétés physiques des sols .....	3
I.3 LES ARGILES .....	5
I.3.1 Introduction .....	5
I.3.2 Notions sur les argiles.....	5
I.3.2.1 Définition .....	5
I.3.2.2 Origine .....	5
I.3.2.3 Structure des argiles .....	6
I.3.2.5 Les différents types d'argile.....	8
I.3.2.6 Activité des argiles.....	10
I.5 LES DECHETS DES PNEUS.....	11
I.5.1 Introduction .....	11
I.5.2 Problématique du pneu usées en Algérie.....	12

I.5.2 Les déchets du pneu.....	13
I.5.2.1 Définition .....	13
I.5.2.2 les caractéristiques de déchet du pneu .....	13
I.5.2.3 les quantités des pneus usages .....	13
I.5.2.4 valorisation énergétique .....	14
I.5.2.5 valorisation en matière première.....	14
I.5.2.6 Emploi en domaine génie civil .....	16
I.5.2.7 Autres techniques de valorisation des pneus usés dans le secteur du génie civil .....	17
I.5.2.8 Valorisation originale du pneu usagé.....	17
I.5.2.9 Étapes du cycle de vie d'un pneu .....	18
I.6 QUEL TRAITEMENT CHOISIR.....	19
I.6.1 Principe de choix d'une méthode de traitement du sol.....	20
Principes de choix d'une Solution .....	20
I.6.2. Principales opérations de traitement.....	20
I.7 CONCLUSION .....	20

## **CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTALES**

<b>II INTRODUCTION.....</b>	<b>22</b>
II.1 MATERIAUX UTILISES .....	22
II.1.1 L'argile .....	22
II.2 IDENTIFICATION ET CLASSIFICATION DES MATERIAUX UTILISENT .....	23
II.2.1Caractérisation physique : .....	24
II.2.1.1Teneur en eau w (NF P 94-050) .....	24
II.2.1.2Analyse granulométrique .....	25
II.2.1.3 Limite d'Atterberg(NF P94-051) .....	29
II.2.2 Caractérisation mécanique .....	34





## SOMMAIRE

II.2.2.1L'essai Proctor (NF P94-093) .....	34
II.2.2.2 Essai de cisaillement direct (NF P 94-071-1).....	35
II.2.2.3Essai Oedométrique(XP 94-090-01) .....	42
II.3CONCLUSION .....	46

## CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

<b>III INTRODUCTION .....</b>	<b>48</b>
III.1 BUT DE L'ETUDE.....	48
III.2 MATERIAUX UTILISES .....	48
III.2.1.Argile : .....	48
III.2.2 Déchet de pneu : .....	49
III.3 PREPARATION DU MELANGE .....	52
III.4 CARACTERISATION MECANIQUE .....	52
III.4.1 Essai Proctor .....	52
III.4.2 Essai cisaillement rectiligne.....	58
III.4.3 Essai de compressibilité à l'oedoemetre : .....	62
III.6 CONCLUSION .....	69

### Références bibliographique

### Annexe



## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1. Synoptique de classification des matériaux selon leur nature.....	2
Figure I.2. Processus de formation de l'argile (Dananaj <i>et al</i> , 2005).....	6
Figure I. 3. Les différents types de phyllo silicates formés au cours de l'altération (Tucker, 2001) .....	6
l'altération (Tucker, 2001) .....	7
Figure I. 4. Schéma d'une couche octaédrique et d'une autre tétraédrique (Pedro, 1994).....	7
Figure I. 5. Structure des minéraux argileux (Duchaufour, 1988) .....	8
Figure I.6.Structure de la kaolinite [Lambe, 1953] .....	9
Figure I.7.Structure de la montmorillonite [Lambe, 1953].....	9
Figure I.8. Structure d'illite [Lambe, 1953] .....	10
Figure I.9. Pneus grossièrement déchiquetés .....	12
Figure I.10.Gisement des pneus usagés en Algérie Les statistiques montrent que des millions de tonnes de déchets .....	12
Figure I.11. Valorisation du pneu.....	15
Figure I. 12. Aspect des déchets des pneus .....	15
Figure I.13. Copeaux de pneus déchiquetés.....	16
Figure I.14. Schéma d'une filière de valorisation matière (Inter state 880/Dixon Landing Road, 2001) .....	18
Figure I.14. étapes du cycle de vie d'un pneu .....	19

### CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Figure II.1: échantillon type du sol à étudier .....	22
Figure II.2: Détermination de la teneur en eau .....	24
Figure II.3: Une série de tamis.....	26
Figure II.4 : Courbe Granulométrique de l'échantillon.....	28
Figure II.5 : Matériel utilisé dans l'essai de Limites d'Atterberg .....	29
Figure II.6: Préparation de L'échantillon .....	30
Figure II.7 : Résultats Limite de Liquidité .....	32
Figure II.8: courbe de limite d'atterberg.....	33

Figure II.9: Appareillage nécessaire pour l'essai Proctor .....	35
Figure II.10: Courbes Proctor de sol naturel .....	36
Figure II.11: courbe densité sèche en fonction teneur en eau.....	37
Figure II.12: Boite de Cisaillement .....	43
Figure II.13: Appareil de Cisaillement Direct .....	44
Figure II.14: courbe de cisaillement.....	45
Figure II.15: courbe contrainte déformation .....	46
Figure II.16 : Les composants de cellule oedométrique .....	43
Figure II.17: Vue générale de l'appareil œdométrique .....	43
Figure II.18: Courbe Indice des Vides – Contraintes.....	54

### **CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS**

Figure III.1 L'argile étudiée .....	49
Figure III.2 résultat d'analyse de pneu .....	51
Figure III.3 mélange argile + déchet de pneu .....	52
Figure III.4 les étapes de l'essai proctor.....	53
Figure III.5 courbe de compactage.....	54
Figure III 5.a La courbe de compactage Argile reconstituée .....	54
Figure III .5.b La courbe de compactage du mélange (Argile+ 2% déchet de pneu).....	54
Figure III.5 c La courbe de compactage du mélange (Argile+ 4% déchet de pneu) .....	55
Figure III.5 d La courbe de compactage du mélange (Argile+ 6% déchet de pneu).....	55
Figure III.6 Comparaison entre les courbes de compactage Proctor Normal avec différents pourcentages de déchets de pneus .....	56
Figure III.7 variation de la masse sèche en fonction du pourcentage de déchet de pneu.....	57
Figure III.8 variation de la teneur en eau en fonction du pourcentage de déchet de pneu .....	57
Figure III.9 détermination cisaillement .....	58
Figure III.10 Courbes de cisaillement .....	59
Figure III.10 a La courbe de cisaillement Argile reconstituée .....	59
Figure III.10 b La courbe de cisaillement de mélange (Argile + 2% déchet de pneu).....	60
Figure III.10 c La courbe de cisaillement de mélange (Argile + 4% déchet de pneu).....	60
Figure III.10 d La courbe de cisaillement de mélange (Argile + 6% déchet de pneu).....	61
Figure III.11 variation de la cohésion en fonction du pourcentage de déchet de pneu .....	61
Figure III.12 variation de l'angle de frottement en fonction du pourcentage de déchet de pneu .....	62
Figure III.13 Courbes Oedométrique .....	63

Figure III.13.a. courbe Oedométrique sol naturelle.....	63
Figure III.13.b.courbe Oedometrique mélange sol +2% déchet de pneu .....	64
Figure III.13.c.courbe Oedométrique mélange sol +4% déchet de pneu.....	64
Figure III.13.d .courbe Oedométrique mélange sol +6% déchet de pneu .....	65
Figure III.14 variation l'indice de consolidation en fonction du pourcentage de déchet de pneu.....	65
Figure III.15 variation de la pression de pré consolidation en fonction du pourcentage de déchet de pneu .....	66
Figure III.16 variation de 'l'indice de compresibilité en fonction du pourcentage de déchet de pneu	66

## Liste des tableaux

### **CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

Tableau I.1. L'accumulation annuelle des pneus décollant par l'UE en tonne (www.etra-eu.org).....	14
Tableau I.2. Quantités des PU générés par an en Algérie (Trouzine et al, 2009).....	14

### **CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTALES**

Tableau II.1: Localisation de mechta de layon.....	22
Tableau II.2:Propriétés des argiles .....	23
Tableau II.3:Résultat de la teneur en eau .....	25
Tableau II.4:Résultat de l'analyse granulométrie.....	27
Tableau II.5: Détermination de la plasticité des sols vis-à-vis de l'indice de plasticité IP .....	31
Tableau II.6: Détermination du potentiel de gonflement des sols vis-à-vis de l'indice de plasticité IP	31
Tableau II.7: Détermination de l'indice de consistance des sols vis-à-vis de l'indice de plasticité IP.	32
Tableau II.8:Résultat de limite d'atterberg.....	33
Tableau II.9:Résultat de Proctor.....	36
Tableau II.10:Résultat de cisaillement .....	40
Tableau II.11: Résultat de l'oedomètre.....	45

### **CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS**

Tableau III.1 Localisation de site machtat laayoun.....	48
Tableau III.2 composition chimique de déchet de pneu .....	49
Tableau III.3 propriété mécanique de déchet de pneu.....	50
Tableau III.4 Influence du pourcentage de déchet de pneu sur le Proctor .....	59
Tableau III.5 Influence du pourcentage de déchet de pneu sur le cisaillemen .....	62
Tableau III.6 Influence du pourcentage de déchet de pneu sur l'essai Oedometrique .....	67

## INTRODUCTION GENERALE :

Le terme "sol" est utilisé en génie civil pour désigner un matériau constitué d'un agrégat naturel de particules minérales de dimensions comprises dans des limites prédéfinies.

Parmi les différentes particules minérales qui forment le sol on a l'argile.

L'argile est une matière première utilisée depuis l'antiquité dans divers domaines de la vie courante comme la poterie et les matériaux de constructions. A l'heure actuelle son champ d'exploitation s'est encore développé jusqu'au domaine des travaux publics et du bâtiment.

Les matériaux argileux constituent souvent des mélanges naturels complexes de minéraux dont la granulométrie et les propriétés physico-chimiques et mécaniques sont très variables.

Ainsi dans ce mémoire nous allons étudier les possibilités d'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques des sols argileux de médiocres qualités en leur rajoutant des proportions de déchet de pneu afin de rendre ces argiles plus performantes à l'exploitation dans le domaine des infrastructures routières.

Le présent rapport est structuré comme suit:

- *Chapitre I* : Synthèse bibliographique

Ce chapitre est subdivisé comme suit: Généralité sur les sols, caractéristiques des argiles, une introduction et recherche simplifiée sur les déchets de pneu.

Et enfin les différentes méthodes de traitement des sols.

- *Chapitre II* : Techniques expérimentales.

Contient les définitions, objectifs, matériels utilisés, modes opératoires et principes des différents essais d'identifications:

Physiques et mécaniques réalisés au niveau du Laboratoire LNHC EL TAREF.

- *Chapitre III* : Résultats et discussions

Les résultats des essais sont discutés et interprétés afin de critiquer la faisabilité et l'adéquation de cette technique de traitement sur les sols.

Enfin, une conclusion générale qui résume les intérêts de l'étude et présente les recommandations essentielles tirées de cette étude.

## **I INTRODUCTION**

Le traitement avec déchets de pneus cherche à modifier l'état d'un sol en lui faisant acquérir des propriétés nouvelles et tend à rendre utilisable un sol sur place. Pour ce faire, on mélange le déchet de pneu avec le sol, et éventuellement de l'eau jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène. Ce traitement a pour but l'exécution des remblais et des couches de forme, pour être ensuite aptes à supporter une assise de chaussée, de parking ou de plate-forme.

Le traitement du sol avec déchets de pneus a deux raisons d'être, en effet, il doit améliorer des sols trop humides, qu'il s'agisse du sol en place pour permettre le déroulement du chantier, ou de sols à réutiliser en remblai; ou réaliser des plates-formes rigides et stables aux intempéries, pour la gestion de chantier et la mise en œuvre de la fondation.

### **I.1 AVANTAGES TECHNIQUE DU TRAITEMENT DU SOL**

- Avantages Economiques

L'utilisation du sol en place est économique dans la mesure où tout en étant un facteur de rapidité du chantier, elle évite les coûts du déblaiement, de la mise en décharge, du transport.

- Avantages Environnementaux

Le traitement du sol en place, en limitant le transport de matériaux réduit la pollution et la consommation d'énergie liée aux transports. Il évite aussi l'extraction de granulats qui sont des ressources naturelles non renouvelables.

- Avantages Techniques

Le traitement des sols permet la réalisation en remblais et en couches de forme présentant des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'une grave-ciment ou grave hydraulique. Cette technique assure une bonne répartition des charges sur le support, grâce à la rigidité de la nouvelle structure ainsi qu'un bon comportement vis-à-vis des cycles de gel-dégel.

## I.2 LE SOL

### I.2.1 Définition du sol

Le sol est un matériau complexe et variable. Il est hétérogène, d'origine minérale et organique et est constitué de grains et de pores.

### I.2.2 Propriétés physiques du sol

Les paramètres définis sont utilisés dans le cadre de la description du comportement physique du sol peuvent être déterminés en pratique par diverses techniques, consistant en une détermination in situ du paramètre concerné, et les méthodes de laboratoire, qui reposent sur les analyses d'échantillons prélevés sur le terrain.

Les déterminations effectuées en laboratoire fournissent des résultats plus précis, par comparaison avec des observations de terrain, mais leur signification et leur représentativité est plus faible, en raison du faible volume de sol prospecté et des effets du prélèvement et de la manipulation (Du chauffour, 1994).

### I.2.3 Caractéristiques des sols

Toutes ces caractéristiques ont permis aux experts de classer les sols, en différentes classes et sous classes ( $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$ ,  $D_i$ , et  $R$ ,  $i$  indice de sous classe) résumées dans la (figure I.1), et décrites dans le fascicule 1 de la « Réalisation des remblais et des couches de formes ».

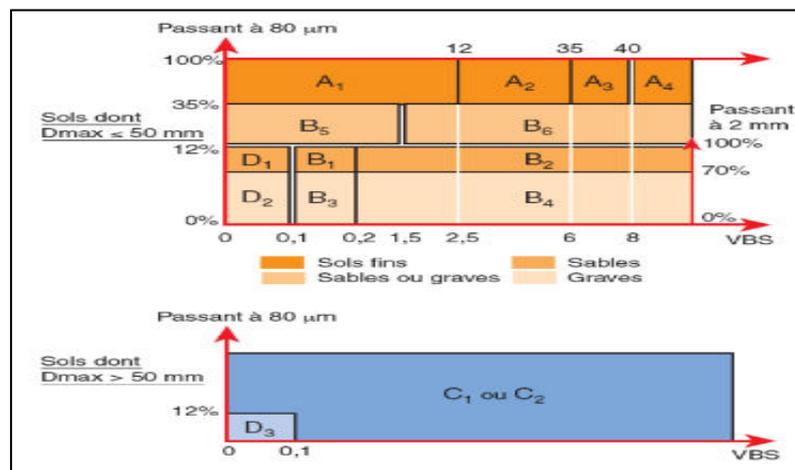


Figure I.1 Synoptique de classification des matériaux selon leur nature

### I.2.4 La formation d'un sol

On a ainsi 3 facteurs entrant en jeu dans la formation d'un sol :

- **la roche mère** : ses propriétés physiques ou sa composition chimique a une influence directe sur la nature et sur la rapidité de l'évolution d'un sol.

- **les végétaux** : fournisseurs de l'essentiel de la matière organique présente dans le sol, et qui influencent aussi son évolution.
- **le climat** : qui affecte les deux facteurs précédents, par la température en ce qui concerne l'altération de la roche mère, et les précipitations pour les phénomènes de migration se déroulant au niveau du sol.

*Un sol possède donc une dynamique, dépendante des divers facteurs qui constituent son milieu.*

#### I.2.5 Les type de sol

Il existe un grand nombre de types de sols, parmi lesquels les sols: Ferrugineux, Sols gelés, Iso humiques, Bruns, Rouges, Ferralitiques, hydromorphes (à Gley ou pseudo-Gley).

#### I.2.6 La portance d'un sol

La capacité d'un sol à supporter une charge est définie par sa portance. La portance d'un sol est fonction de la nature de ce sol, de sa teneur en eau et de son compactage.

La portance d'un sol et sa teneur en eau optimum sont déterminés, le plus usuellement, par l'essai Proctor pour ce qui concerne la compacité et par l'essai CBR pour ce qui concerne la résistance au poinçonnement. Le traitement à la chaux d'un sol permet une augmentation rapide et importante de sa portance.

#### I.2.7 Caractéristiques et propriétés physiques des sols

##### ○ **Structure**

La structure d'un sol est l'assemblage, a un moment donnée, de ses constituants solide. La stabilité structurale dépend de la matière organique des sols. Le complexe argilo-humique joue un rôle structurale, ce rôle est plus ou moins important selon les teneurs en eau du sol et varie en fonction du type d'argile. La matière organique augmente la stabilité des agrégats. Une mauvaise structure peut donc empêcher l'écoulement des eaux dans le sol, les échanges gazeuses entre le sol et l'atmosphère.

Une bonne structure va assurer une grande facilité de circulation d'eau, donc laisse s'écouler l'excès, assure une bonne aération des racines, une bonne germination, une pénétration profondes des racines et une bonne exploration par les racines des ressources nutritives du sol.

### ○ **Texture**

La texture du sol est à la base de toutes les autres propriétés, c'est la propriété du sol qui traduit de manière globale la composition granulométrique de la terre fine La texture constitue un caractère fondamental du sol, car elle influe sur :

- ✓ Perméabilité du sol à l'eau et à l'air : La perméabilité est indépendante du taux de la matière organique. Le critère retenu pour mesurer la perméabilité est la vitesse de percolation de l'eau exprimée en  $\text{cm}^3/\text{h}$ . Le taux élevé de la matière organique n'implique pas forcément une bonne perméabilité. Cependant, son degré de décomposition a une influence sur cette dernière, plus la matière organique est décomposée, plus la perméabilité est faible et vice-versa.
- ✓ Rétention de l'eau : Sous forme de vapeur ou liquide, l'eau occupe environ un quart du volume d'un sol, quand ce dernier est saturé, l'eau qui percole à travers une tranche du sol le fait sous l'influence de la gravité. La teneur en air est complémentaire de la teneur en eau, puisque ces deux fluides se partagent l'espace poreux.

$$\text{Porosité total (\% vol)} = \text{humidité (\%)} + \text{teneur en air (\%)} \dots \text{Eq(I.1)}$$

### ○ **Porosité**

La porosité d'un sol est une grandeur physique qui exprime le rapport entre le volume occupé par ses pores et son volume totale. Considérons un échantillon de matériau terreux. Soient  $v_a$  le volume total de cet échantillon qui est qualifié d'apparent puisque c'est le volume qui est directement aperçu et  $v_s$  le volume occupé par les particules du sol.

La porosité totale  $\theta_t$  est définie par l'équation

$$\theta_t = 1 - v_s / v_a \dots \text{Eq(I.2)}$$

### ○ **Connectivité**

Elle exprime l'importance des connexions entre les pores qui est un déterminant de la continuité de la phase gazeuse, donc de l'écoulement de l'air.

### **I.3 LES ARGILES**

#### **I.3.1 Introduction**

L'argile est un matériau naturel qui a été utilisé par l'homme depuis très longtemps, notamment dans l'antiquité. Pour la poterie. Son intérêt est considérable dans divers domaines en raison, à la fois de son abondance et de ses propriétés en agriculture, étant donné que tous les sols cultivés en contiennent plus au moins mais parfois en grand quantités.

On sait depuis longtemps que les sols argileux sont fertiles mais souvent difficiles à travailler en raison de leurs propriétés mécaniques. Ces mêmes propriétés font des roches argileuses des substrats difficiles pour le génie civil.

#### **I.3.2 Notions sur les argiles**

##### **I.3.2.1 Définition**

Les minéraux argileux sont fondamentalement constitués de silicium, aluminium, oxygène et ions hydroxyles. Ce sont des phyllo silicates d'alumine hydratés, le préfixe «phyllo» désignant des minéraux qui prennent des formes de feuillets (Morel, 1989).

##### **I.3.2.2 Origine**

Les minéraux argileux résultant de la destruction des roches, peuvent soit restés sur place, soit être transportés sur de longues distances. Les argiles sont issues d'une érosion naturelle, effectuée pendant des milliers d'années (Tucker, 2001).

Les reliefs qui forment la surface de la terre sont composés de différentes roches, pour certaines magmatiques (issues directement du magma) pour d'autres, métamorphiques (seconde cristallisation de sédiments ou de roches magmatiques) (Figure I.2). En fonction des roches mères et du climat, les minéraux argileux résultant sont différents (Tucker, 2001).

En climat froid : l'altération est faible, les minéraux argileux sont identiques ou peu différents des minéraux de la roche (illite et chlorite), ils sont hérités de la roche d'origine.

En climat chaud et humide, l'hydrolyse est poussée, la kaolinite se forme en milieu drainé, les smectites en milieu confiné (Figure I.2).

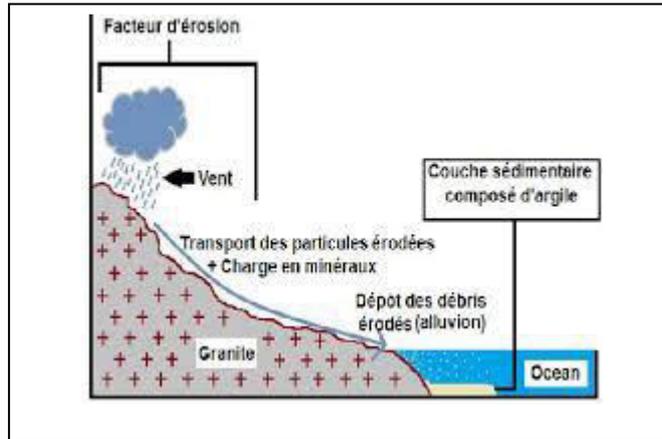


Figure I.2 Processus de formation de l'argile (Dananaj *et al*, 2005)

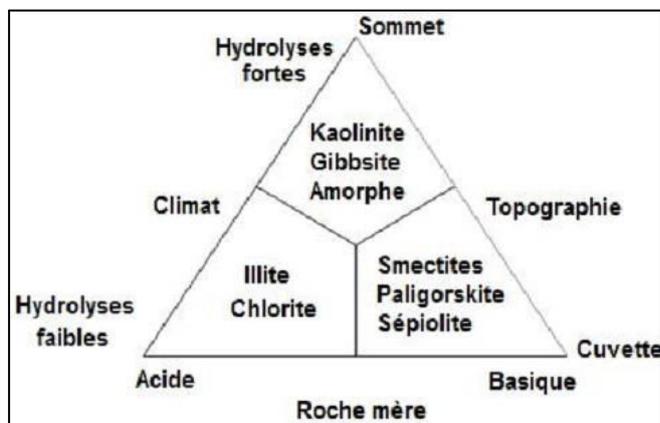


Figure I. 3 Les différents types de phyllo silicates formés au cours de l'altération (Tucker, 2001)

### I.3.2.3 Structure des argiles

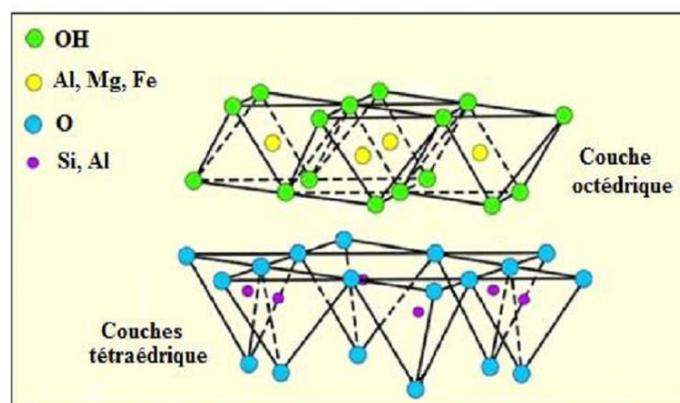
A l'exception du groupe relativement peu important des argiles dites fibreuses, les minéraux argileux sont constitués d'un empilement de feuillets de structure bien définie, séparés par des intervalles désignés sous le nom d'espace interfoliaire (Jouenne, 1975 ; Ben Hadj-Amara *et al*, 1987 ; Duchaufour, 1988).

Chaque feuillet se présente comme une superposition de plans ioniques organisés suivant deux types précis de couches: le type tétraédrique (Te) et le type octaédrique (Oc) (Abdelouahab *et al*, 1988 ; Azouz, 1994). L'association d'un feuillet et d'un espace interfoliaire représente l'unité structurale du minéral phylliteux (Morel, 1989) (Figure I.4).

Quatre ions principaux forment la structure des feuillets: les ions  $\text{Si}^{4+}$ ;  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{O}^{2-}$  et  $\text{OH}^-$ . De plus, selon le type d'argile, d'autres ions sont également rencontrés tels que:  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,

$Mg^{2+}$  (Caillère *et al.*, 1982a, b). Dans le feuillet, un ion silicium  $Si^{4+}$  s'insère dans l'espace compris entre quatre ions  $O^{2-}$  disposés autour de lui; géométriquement,  $Si^{4+}$  occupe le centre d'un tétraèdre dont les quatre sommets seraient les centres des ions  $O^{2-}$ ; le silicium est dit en position tétraédrique.

Electriquement, les quatre charges positives de l'ion silicium sont neutralisées par quatre charges négatives appartenant aux quatre ions  $O^{2-}$  qui entourent l'ion  $Si^{4+}$ , il reste quatre charges négatives libres, compensées par les charges positives de cations voisins: un dispositif tétraédrique n'est en effet pas isolé, mais fait partie d'un ensemble structural (Caillère *et al.*, 1982a, b).



**Figure I.4** Schéma d'une couche octaédrique et d'une autre tétraédrique (Pedro, 1994)

L'ion aluminium  $Al^{3+}$  se trouve dans le feuillet logé dans l'espace compris entre six ions  $O^{2-}$  ou  $OH^-$ , géométriquement,  $Al^{3+}$  occupe le centre d'un octaèdre dont les six sommets seraient les centres des six ions  $O^{2-}$  ou  $OH^-$  périphériques; l'aluminium est dit en position octaédrique.

Electriquement, les trois charges positives de l'ion aluminium sont neutralisées par trois des charges négatives des anions de l'octaèdre; pour utiliser complètement leurs charges négatives, les ions  $O^{2-}$  et  $OH^-$  compensent des charges positives appartenant soit à des octaèdres voisins soit, à des tétraèdres voisins.

Dans les feuillets, les dispositifs octaédriques apparaissent disposés les uns à côté des autres, constituant la couche octaédrique. La juxtaposition de couches tétraédriques et octaédriques forme le feuillet. Chaque feuillet est séparé du suivant par un espace interfoliaire (Jones, 1988; Tessier, 1989; Dyer and Gallardo, 1990).

### I.3.2.4 Classification des minéraux argileux

On distingue parmi les minéraux argileux trois grands groupes (1/1, 2/1 et 2/1/1), leur distinction a été établie en fonction de la composition chimique, de l'épaisseur des feuillets, de la grandeur de l'espace interfoliaire et de la valeur de la capacité d'échange de cations (c.e.c.) (Duchaufour, 1988 ; Chevalier et *al*, 1994) (Figure I.5).

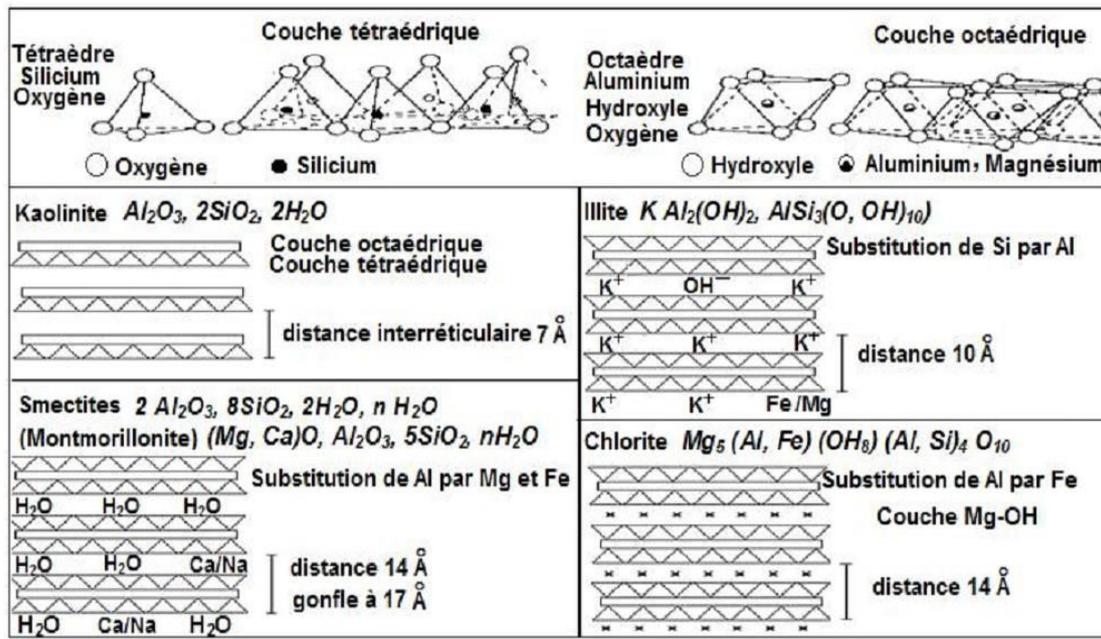


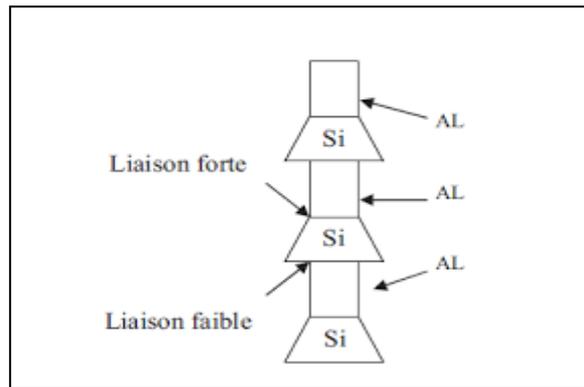
Figure I. 5 Structure des minéraux argileux (Duchaufour, 1988)

### I.3.2.5 Les différents types d'argile

Les types d'argiles les plus fréquents sont :

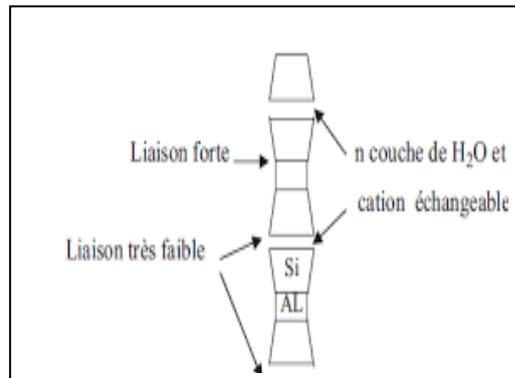
- **Kaolinite:** La kaolinite est constituée d'une succession alternée de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite).

Les deux feuillets sont liés de telle manière que les sommets du feuillet de silice et ceux d'une des couches du feuillet en octaèdre ne forment qu'une seule et même couche (Figure I.6).



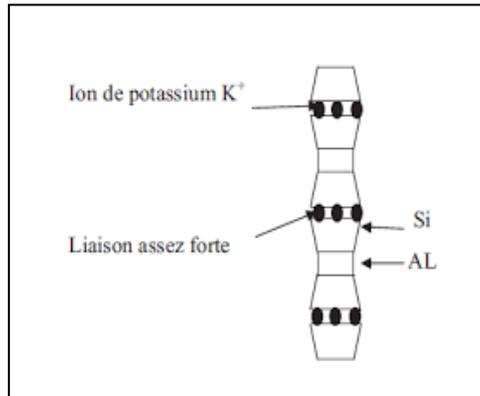
**Figure I.6** Structure de la kaolinite [Lambe, 1953]

- **Montmorillonite:** La montmorillonite, parfois appelée Smectite, est un minéral argileux important composé de deux feuillets de Silice et d'un feuillet d'Alumine (Gibbsite). Les feuillets en octaèdres se trouvent entre deux feuillets de Silice et les sommets des tétraèdres se confondent avec les hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former qu'une seule couche. Les sols qui contiennent de la montmorillonite peuvent être gonflants lorsque leur teneur en eau augmente, les pressions de gonflements qui en résultent peuvent facilement causer des dommages aux structures légères et pavages (Figure I.7).



**Figure I.7** Structure de la montmorillonite [Lambe, 1953]

- **Illite :** L'illite est une autre composante importante des sols argileux, elle a une structure analogue à la montmorillonite mais il y a des ions de potassium intercalés entre les feuillets tétraédriques. Grâce à ces ions la liaison est relativement forte et les molécules d'eau ne peuvent pratiquement plus s'intercaler. Aux extrémités de la particule d'argile, il y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations. Ces cations dits échangeables jouent un rôle important dans le comportement des argiles (Figure.8)



**Figure I.8** Structure d'illite [Lambe, 1953]

### I.3.2.6 Activité des argiles

Skempton (1953), a considéré que les valeurs des limites d'Atterberg sont liées à la quantité d'eau retenue à la surface des particules et donc à la quantité d'argile présente dans le sol. Cet auteur a défini l'activité d'une argile par le rapport de l'indice de plasticité ( $I_p$ ) et du pourcentage des éléments inférieurs à deux microns ( $C_2 < 2 \mu\text{m}$ ).

$$A_1 = I_p / C_2 \dots \dots \dots \text{Eq(I.3)}$$

Skempton a proposé la nomenclature suivante :

- **Argile inactives** : les argiles qui ont une activité inférieure à 0,75. Ces argiles sont à base de Kaolinite, ou des argiles contenant peu de minéraux argileux.
  - **Argile normale** : qui ont une activité comprise entre 0,75 et 1,25.
  - **Argile active** : qui ont une activité comprise entre 1,25 et 2.
  - **Argile très actives** : qui a une activité supérieure à 2.
- En ce qui concerne les argiles compactées, Seed et al (1962), ont introduit une modification à la définition de Skempton sous la forme suivante :

$$A_2 = I_p / (C_2 - n) \dots \dots \dots \text{Eq(I.4)}$$

Sachant que :

- $n = 5$  cas des sols naturels.
- $n = 10$  cas des sols reconstitués

## **I.5 LES DECHETS DES PNEUS**

### **I.5.1 Introduction**

Les déchets de pneumatiques, bien que classés comme des déchets non dangereux, représentent un danger pour l'environnement et la santé publique en cas d'incendies (émissions de gaz toxiques) ou de dépôts sauvages (refuges pour les moustiques potentiellement porteurs de virus...).

Il est interdit de mettre des pneumatiques en décharge, de les abandonner dans le milieu naturel ou de les brûler.

La gestion des déchets de pneumatiques est encadrée depuis 2003 sur la base du principe de responsabilité élargie des producteurs (REP). La réglementation a été renforcée en 2015 afin de préparer l'échéance de l'année 2020 qui verra l'agrément des organismes collectifs et l'approbation des systèmes individuels en matière de gestion des déchets.

Le fonctionnement de la filière est aujourd'hui performant puisque quasiment tous les déchets de pneumatiques issus de pneus neufs mis sur le marché sont collectés, puis traités principalement sous la forme de valorisation énergétique (en cimenterie), matière (granulats pour des usages divers) et par la réutilisation (pneus d'occasion).

On estime à 504 000 tonnes environ de pneumatiques (soit 52 millions de pneumatiques toutes catégories confondus) qui sont mis sur le marché par an en France.

Par ailleurs, les pouvoirs publics, associés aux acteurs de la filière de gestion des déchets de pneumatiques, ont organisé la résorption des stocks de déchets de pneumatiques dits "historiques" (constitués avant 2003) à travers l'association Recyvalor. Cette association, issue d'un accord interprofessionnel de 2008, a achevé dix ans après sa création sa mission : plus d'une cinquantaine de sites représentant 55 000 tonnes de déchets de pneumatiques (soit plus de 7 millions de pneus) ont ainsi pu être traités.



**Figure I.9** Pneus grossièrement déchiquetés

### **I.5.2 Problématique du pneu usés en Algérie**

L'environnement est un enjeu très important, et sa préservation est une responsabilité commune. Le problème des pneus usés est non seulement mondial mais aussi maghrébin et africain.

Dans le bassin méditerranéen, l'Algérie a pris conscience de ce problème et a donné naissance à des stratégies locales ou en coopérations internationales qui font face à la pollution. Sur le plan réglementaire, plusieurs textes et lois ont été promulgués pour définir, gérer et éliminer les déchets. (Journal officiel de la République Algérienne n°77 du 15/12/2001). L'annexe III du décret exécutif n°06-104 classe les pneus hors d'usages comme des déchets spéciaux (classe S) sous le code (16.1.1) sans aucun critère de dangerosité. (Journal officiel de la République Algérienne n°13 du 05/03/2006).



**Figure I.10** Gisement des pneus usagés en Algérie Les statistiques montrent que des millions des tonnes des déchets

## **I.5.2 Les déchets du pneu**

### **I.5.2.1 Définition**

**Déchets du pneu est :** sont des produits issus du processus de granulation, un second broyage fin des pneus en fin de vie, où le caoutchouc est séparé des fibres textiles et des fil métalliques que l'on trouve également dans les pneus. La seule différence entre la poudre et les granulats est la granulométrie.

### **I.5.2.2 les caractéristiques de déchet du pneu**

D'une manière générale, il est possible de caractériser les déchets du pneu par un certain nombre de propriétés :

- Taille de la particule.
- Distribution de taille des particules.
- Morphologie des particules.
- Composition chimique des particules.
- Energie de surface des particules

### **I.5.2.3 les quantités des pneus usages**

Les chiffres des déchets pneumatiques montrent que des millions de tonnes sont jetées, chaque année, dans le monde (Etats-Unis, Canada, Union Européen (EU), Algérie...).

- Le tableau 1 donne l'accumulation annuelle des PU dans l'UE en tonne ([www.etra-eu.org](http://www.etra-eu.org)).
- Le tableau 2 estime les quantités des PU par an en Algérie, selon une étude statistique estimative du gisement des PU (Trouzine *et al*, 2008).

**Tableau I.1** L'accumulation annuelle des pneus découlant par l'UE en tonne

Etat membre	Pneu découlant en tonne	population
france	401000	58265400
allemagne	640000	81845000
italie	434500	57330500
Espagne	280000	39241900
Ukrain	435000	58684000
<b>Union Européen</b>	<b>2659100</b>	<b>372662100</b>

**Tableau I.2** Quantités des PU générés par an en Algérie (Trouzine et al, 2009)

TYPES DE PNEU	Pneu / an	Tonne / an	Pneu /personne / an
Véhicule léger VL	1107410	7967	-
Poids lourd PL	332104	17951	-
<b>Total</b>	<b>1439514</b>	<b>25918</b>	<b>0.0413</b>

#### I.5.2.4 valorisation énergétique

Les pneus possèdent un pouvoir calorifique important : 3 tonnes de pneus se substituent à environ 2 tonnes de fioul. L'industrie principale consommatrice des PU est l'industrie cimentière. Les PU sont introduits déchetés au niveau de la tour de pré-calcination, ou entières au niveau du four ([www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)).

Les inconvénients de ces procédés sont dus à l'utilisation d'installations fixes, le transport des PU et des conditions d'émissions dans l'air. En Algérie cette valorisation est absente vue que l'utilisation du gaz naturel en industrie cimentaire est préférée.

#### I.5.2.5 valorisation en matière première

Les pneumatiques usagés peuvent être broyés en poudrettes ou en granulés de caoutchouc. Ces produits sont utilisés en combinaison avec d'autres matériaux.

**Poudrettes** : il s'agit de particules de caoutchouc dont les dimensions sont inférieures à 2mm.

Son coût d'obtention dépend de sa finesse, de son origine chimique et de l'absence ou non de corps étrangers.



**Figure I.11** Valorisation du pneu

**Les poudrettes** sont utilisées comme charges dans des mélanges servant à produire des pièces, ne subissant pas de contraintes mécaniques ou dynamiques élevées. Comme exemple d'utilisation, on a la fabrication de bandages et de roues pleines (caddie, poubelles, tondeuses, brouettes...), la modification des revêtements routiers (diminution du bruit et de l'aquaplaning du fait d'un drainage en Surface)...etc.



**Figure I.12** Aspect des déchets des pneus

**Granulés** : il s'agit de particules de caoutchouc d'une taille supérieure à celle des poudrettes. Les granulés peuvent être agglomérés par des résines, colorés ou non, et permettent, par moulage, de réaliser facilement des feuilles ou des plaques. Comme

exemple d'utilisation, on a les aires de jeux, les pavés anti-dérapants, les revêtements pour terrains de sport (surfaces souples, diminution des nuisances sonores...).

D'autres types de valorisation de matière, par transformation chimique, sont possibles, telle que la régénération (par combinaison d'actions chimiques mécaniques et thermiques), ou la Pyrolyse – Thermolyse. Les produits issus de cette décomposition, sont des huiles combustibles lourdes et légères, du carbone...etc.

Le développement industriel de ces types de valorisation, est cependant freiné par le coût de mise en œuvre.



**Figure I.13** Copeaux de pneus déchiquetés

#### I.5.2.6 Emploi en domaine génie civil

Les pneus possèdent des propriétés multiples qui leur donnent un intérêt dans l'ingénierie civil et géotechnique : ductilité, faible conductivité thermique.

Plusieurs techniques utilisant les PU en génie civil sont connues dans le monde : la technique Pneusol et ses dérivées « Pneurésil, Pneutex et l'Arma-Pneusol », la technique TDA « Tires Derived Aggregate », la technique Tires Balles et la technique Tirecel. (Trouzine *et al*, 2008).

Le Pneu sol est une association des pneus usés entiers, partiellement ou entièrement découpés à des sols pulvérulents ou cohérents.

Les domaines d'application sont variés « Ouvrages de soutènements, remblai léger, répartiteur des contraintes, protection des pentes... ». Plus de 2000 ouvrages valorisant les PU, selon les différentes techniques sont connus dans le monde, dont environ une vingtaine en Algérie (Long, 1993 ; Trouzine *et al*, 2008 ; Belabdelouahab et Djidjli, 2009).

### I.5.2.7 Autres techniques de valorisation des pneus usés dans le secteur du génie civil

Le TDA "Tires Derived Aggregate" ou Agrégats dérivés des pneus, sont des pneus usés déchiquetés avec différentes formes, dont les tailles varient de 50 et 300mm.

Les copeaux de pneus sont mélangés à du sable avec des proportions volumiques souvent égales.

La technique Tires balles, utilise des pneus usés, généralement de véhicules légers (approximativement une centaine de pneus). Les balles de pneus ayant des formes

Pratiquement parallélépipédiques sont confectionnées à l'aide d'une presse et attachées par des câbles galvanisés ou en acier inoxydable.

Pour la technique Tirecel, les deux flancs des pneus, souvent de véhicules légers, sont enlevés. La bande de roulement ainsi obtenue, est attachée afin de former des cellules en forme du chiffre arabe 8. Les cellules de pneus sont associées au sable.

Ce matériau peut être utilisé pour les mêmes applications que le Geocell commercialisé.

### I.5.2.8 Valorisation originale du pneu usagé

Dans le processus de valorisation matière, le pneu usagé est employé sous différentes formes :

#### a. Pneu entiers

- **Pneu sol** : qui consiste à superposer des couches de pneus reliés entre eux et remplis de matériaux de remblai. Cette technique permet la réalisation d'ouvrages de soutènement, de remblais légers, d'ouvrages absorbants d'énergie comme protection contre les chutes de blocs, et les répartiteurs de contraintes au dessus des conduites enterrées.
- **Arma pneu sol** : associe pneus, remblai et armatures en nappes de treillis soudés.
- **Pneu tex** : associe pneus et membranes en géotextile.
- **Pneu résil** : consiste à empiler des pneus de poids lourds en colonnes et à empêcher le sol courant de remplir les vides créés à l'intérieur et entre les pneus; cette structure, a une masse volumique très faible et peut être utilisée comme soubassement de routes ou comme remblai derrière les culées de pont ou les murs de soutènement.
- **Drainage** : l'utilisation de pneus ligaturés entre eux et mis en place sous forme de tube, permet le drainage de fossés et de parcelles.
- **Protection de quai** : des pneus entiers sont couramment utilisés comme absorbants de chocs le long de quais et de jetées.

- **Ensilage** : certaines techniques agricoles utilisent des pneus pour le maintien des bâches d'ensilage.

b. Pneu découpés

La bande roulement peut être utilisée comme tapis support de voie ferrée pour réduire les bruits et les vibrations.

c. Pneu déchiquetés

Les propriétés drainantes, la compressibilité, la masse volumique faible du produit permettent aux déchiquetés de pneus d'être utilisé comme remblai léger dans la construction de routes ou comme sous couches drainantes de centres d'enfouissement technique.



**Figure I.14** Schéma d'une filière de valorisation matière (Inter state 880/Dixon Landing Road, 2001)

I.5.2.9 Étapes du cycle de vie d'un pneu

La figure I.13 montre les différentes étapes du cycle de vie d'un pneu, depuis l'acquisition des matières premières et la fabrication jusqu'à l'utilisation et à l'élimination définitive. Elle fait en particulier ressortir le fait le rechapage, puisqu'il permet de réutiliser les pneus, ce qui accroît leur durée de vie utile, peut intervenir aussi bien dans la phase de prévention de la production que dans celle de récupération et d'élimination des déchets, où les pneus mis au rebut peuvent soit subir ce traitement, soit faire l'objet d'autres opérations d'élimination écologiquement rationnelle.

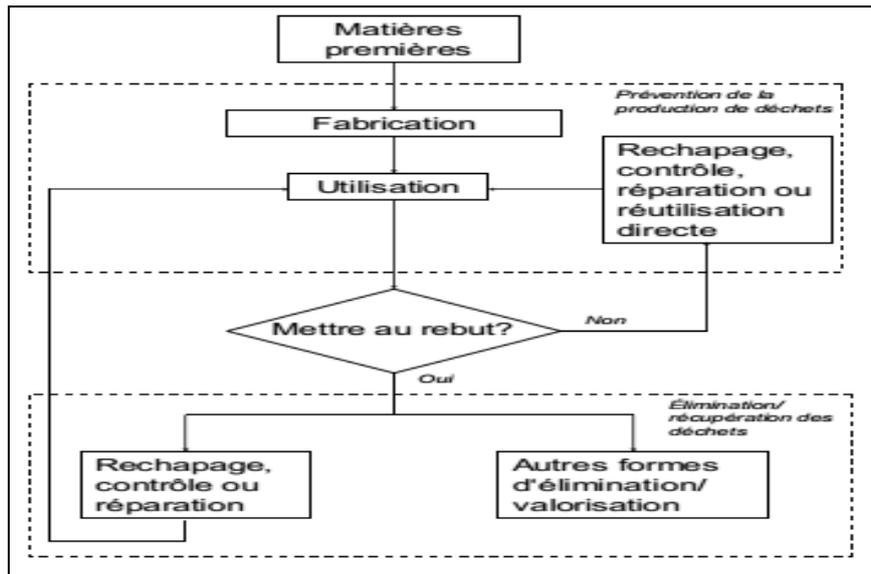


Figure I.15 Étapes du cycle de vie d'un pneu

## I.6 QUEL TRAITEMENT CHOISIR

Le choix d'une technique de traitement de sol dépend des objectifs de modification de comportement et/ou d'état du sol visé en fonction du type d'ouvrage réalisé.

En dehors de considérations économiques (qui restent le facteur prépondérant mais in fine), tout choix de solution devra tenir compte des facteurs suivants :

- le type d'ouvrage réalisé (ou les types d'efforts à reprendre)
- le type de sol concerné
- la profondeur de sol concerné
- les impacts sur l'environnement et les constructions avoisinantes

Les traitements de sols peuvent concerner une épaisseur de sol plus ou moins importante.

On considérera qu'il s'agit d'un traitement :

- ✓ en profondeur : si l'épaisseur de sol est supérieure à un mètre.
- ✓ en surface : si l'épaisseur est inférieure à un mètre.

### I.6.1 Principe de choix d'une méthode de traitement du sol

#### Principes de choix d'une Solution

Le choix d'une technique de traitement des sols en profondeur relève de trois critères principaux :

- La granulométrie du sol.
- La profondeur du traitement.
- Le type d'ouvrage réalisé sur la zone traitée.

### I.6.2 Principales opérations de traitement

La réalisation des travaux de traitement d'un sol en place suit en générale les opérations élémentaires suivantes :

- la préparation du sol à traiter (élimination des éléments blocailleux, homogénéisation, humidification éventuelle).
- l'épandage des matériaux de traitement.
- le malaxage des matériaux avec le sol.
- l'ajustement de l'état hydrique (soit humidifier le sol par arrosage, soit l'assécher par aération).
- Le réglage du mélange.
- Le compactage.
- L'application de la protection superficielle du sol traité (cas d'une couche de forme).

## **I.7 CONCLUSION**

L'utilisation des déchets du pneu dans le domaine du génie civil a connu un développement rapide durant les dernières années. Ils ont entièrement remplacé les matériaux de construction traditionnels.

Dans de nombreux cas, l'utilisation d'un déchet de pneu peut augmenter le facteur de sécurité, et réduire les coûts en comparaison avec les matériaux classiques de construction.



## **II INTRODUCTION**

La reconnaissance des caractéristiques géotechniques d'un sol passe par un certain nombre d'essais au laboratoire. Ces essais ont pour but d'identifier un sol, et déterminé ses trois paramètres essentiels : nature, comportement mécanique et état hydrique.

Le sol utilisé, sujet de la présente recherche, est un sol provenant du site de graa machtat laayoun. Figure II.1.



**Figure II.1** échantillon type du sol à étudier

Le chapitre présente les résultats des essais d'identification du sol (Analyse granulométrique, limites d'Atterberg, Teneur en eau) ainsi que ceux des essais de portance (Proctor normale, cisaillement rectiligne à la boîte, essai oedométrique).

### **II.1 MATERIAUX UTILISES**

#### **II.1.1 L'argile**

##### **Origine :**

Le matériau utilisé est essentiellement l'argile de glissement de machtat laayoun.

L'argile provient du glissement de machta laayoun, situé dans la Daïra d'el kala à 20 km au nord – est d'el tarf.

**Tableau II.1** Localisation de mechta de layon

<b>Lieu dit</b>	<b>Commune</b>	<b>Daira</b>	<b>Wilaya</b>
<b>Machta layoun</b>	Layoun	El kala	El tarf

**Tableau II.2** Propriétés des argiles

<b>Limites de liquidité</b> (%)	<b>38.31</b>
<b>Indice de plasticité</b> (%)	11.45
<b>Limites de plasticité</b> (%)	26.86
<b>Teneur en eau (%)</b>	12.42
<b>Cohésion (bars)</b>	0.21
<b>Angle de frottement</b> (°)	13.73

## **II.2 IDENTIFICATION ET CLASSIFICATION DES MATERIAUX**

### **UTILISENT**

Dans ce chapitre les différents matériaux utilisés lors de ce travail ont été identifiés et caractérisée par une sérier d'essais géotechnique, et qui peuvent être divisées en :

- **Caractérisation physique**
  - La teneur en eau.
  - Analyse granulométrique.
  - Limites d'Atterberg.
- **Caractérisation mécanique**
  - Proctor.
  - Essai de Cisaillement rectiligne.
  - Essai Oedométrique.

## II.2.1 Caractérisation physique

### II.2.1.1 Teneur en eau w (NF P 94-050)

- **Définition :**

La teneur en eau est un paramètre d'état qui permet d'approcher certaines caractéristiques mécaniques et d'apprécier la consistance d'un sol fin.

- **But de l'essai :**

Le but de cet essai est la détermination au laboratoire les différentes densités afin de caractériser un sol pour prévoir son comportement.

- **Principe de l'essai :**

La perte d'eau d'un échantillon de matériaux et provoquée par étuvage les masse de l'échantillon et de l'eau évaporée sont mesurées par pesage.

- **Appareillage :**

- Une balance électronique de précision.
- Une étuve électrique.
- Des tares.



**Figure II.2** Détermination de la teneur en eau

- **Mode opératoire :**

- On prend trois tares et on les pèse vide.
- On pèse les échantillons avec les tares.
- On note le poids humide.
- On met l'échantillon à l'étuve. Après étuvage, on note le poids sec de l'échantillon.

- La différence entre le poids humide et le poids sec donne le poids de l'eau.

La teneur en eau est déterminée par la formule suivante :

$$\text{➤ } w = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100$$

$$\text{➤ } w = \frac{(m_1+m)-(m_2+m)}{m_2} \cdot 100$$

**Tableau II.3** Résultat de la teneur en eau

Paramètres		W (%)	$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	S <sub>r</sub> (%)	W <sub>s</sub> (%)
Sols					
Argile		12.42	1.72	52.68	21.17

#### II.2.1.2 Analyse granulométrique

- **Définition :**

L'analyse granulométrique est une étape fondamentale pour la classification d'un sol. L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions de grains de différentes tailles dans le sol.

L'analyse granulométrique s'obtient par deux opérations successives et complémentaires :

- Le tamisage sous l'eau (par voie humide) pour les particules de dimensions  $\geq 80\mu\text{m}$  (0.08mm), l'essai est effectué selon la norme NF P94-056.
- La sédimentométrie pour les particules de dimensions  $< 80\mu\text{m}$  qui complète la première, elle est effectuée selon la norme (NF P94-056).

Le principe de cet essai est fondé sur la loi de Stokes ou la vitesse de sédimentation des particules en suspension dans un milieu dépend de leurs diamètres.

- **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

- **Appareillage :**
  - Série de tamis.
  - Pinceau.
  - Récipient.
  - Balance.
  - Des cylindres de sédimentation



**Figure II.3** Une série de tamis

- **Mode opératoire :**
  - Détermination de la masse sèche de l'échantillon (de 1h à 4h étuvage à 105°C).
  - Deviser en une ou plusieurs fois, la totalité du matériau à analyser sur une colonne de tamis d'ouverture croissant de bas en haut et procéder au lavage.
  - Séparer par brassage manuel combiné à un arrosage, l'élément retenu sur le tamis s'ouverture de maille plus grande, lorsque le refus sur le tamis est propre le tamis et retirer, l'opération ce poursuit pour les tamis inferieur.
  - Lorsque malgré le brassage et le brossage, des particules fines adhèrent aux grains, un trempage est nécessaire.
  - Verser le contenu de chaque tamis dans un récipient.
  - Placer les récipients dans l'étuve, a ce que deux pesées successives ne varient pas de plus de 2/1000.
  - Peser le récipient contenant le refus sur le tamis d'ouverture la plus grande.
  - Peser le refus cumulés successifs R.

**Tableau II.4** Résultat de l'analyse granulométrie

Paramètres	1	0.4	0.2	0.1	0.08
<b>Tamis</b>					
<b>Refus cumulés (%)</b>	15	101	164	185	186
<b>passant (%)</b>	97	80	67	63	63

A la fin de l'essai on trace une courbe qui s'appelle « La Courbe Granulométrie » la figure II.4 nous montre cette courbe :

La courbe granulométrique de l'argile de machta laayoun montre que :

- Le pourcentage des fines inférieures à 80 $\mu$ m est de 63% contenant une fraction d'argile de 42%.
- La courbe granulométrie est étalée et continue.

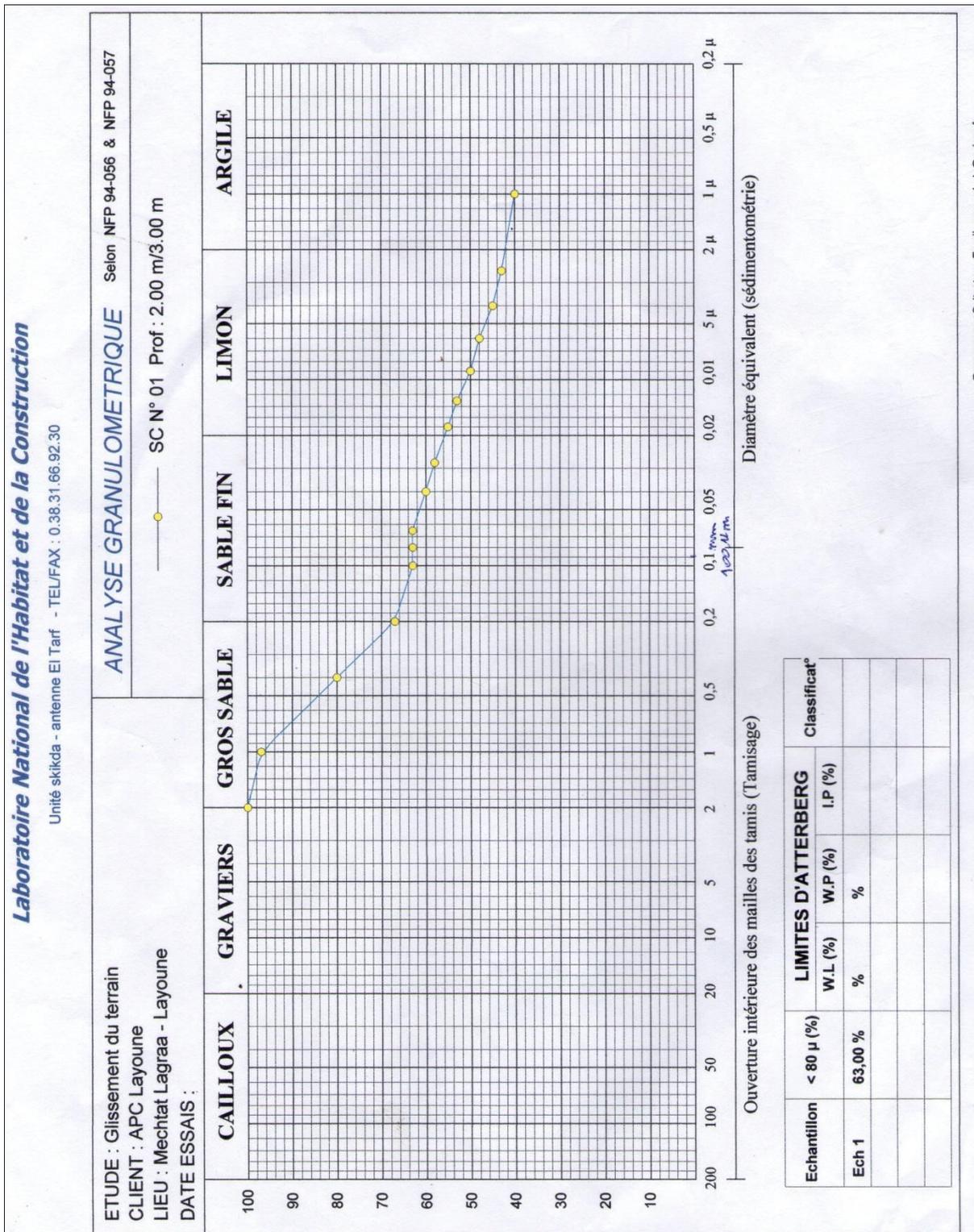


Figure II.4 Courbe Granulométrique de l'échantillon

### II.2.1.3 Limite d'Atterberg (NF P94-051)

- **Définition :**

Les limites d'atterberg sont des essais qui permettent de définir des indicateurs qualifiant la plasticité d'un sol, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau.

Le but de ces tests est de déterminer les limites de consistance qui sont exprimées en termes de teneur en eau marquant les limites entre état solide, plastique, et liquide.

Il est important de noter que ces tests ne s'appliquent que pour les sols fins, définis comme ayant des grains de diamètres inférieurs à 0.06 [mm].

- **Appareillage :**

Le matériel nécessaire à la préparation du sol est distingué du matériel utilisé

- ✓ **Matériel pour la préparation du sol :**

- Un récipient.
- Un bac de dimension minimales en centimètres 30x20x8.
- Un tamis à maile de 400  $\mu\text{m}$  d'ouverture.

- ✓ **Matériel pour la détermination de la limite de liquidité :**

Un appareil de casagrande, se compose

- D'un socle.
- D'un support métallique.
- D'une coupelle : la surface interne de la coupelle est (soit lisse, soit rugueuse).
- D'un outil à rainurer.
- D'une cale de 10 mm d'épaisseur.
- Une étuve dessiccation.
- Une balance.
- Des capsules ou boites de pétri, spatules, truelles.



**Figure II.5** Matériel utilisé dans l'essai de Limites d'Atterberg

- **Préparation du sol :**

1-Après échantillonnage du sol et homogénéisation par brassage, une masse de matériau (m) est mise à imbiber dans un récipient d'eau à la température ambiante, pendant 24 h.

2-Cette mase m, exprimée en grammes, doit être supérieur à 200 fois la dimension des plus gros éléments de sol.

3-Elle doit être telle au le tamisât de 400 mm donne au moins 200 g de particules solides.

4-Une fois imbibé, matériau est tamisé par voie humide au tamis de 400  $\mu\text{m}$ .

5-Après une durée de décantation d'au moins 12 h, l'eau claire du bac est siphonnée sans entrainer de particules solides.

6-L'eau excédentaire est évaporée à une température ne dépassant pas 50<sup>0</sup> C.

7-La totalité du tamisât est malaxée afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide.



**Figure II.6** Préparation de L'échantillon

- **Mode opératoire :**

- a) Détermination de la limite de liquidité :

On utilise la coupelle de Casagrande. Pour réaliser ce test il faut :

- Humidifier l'échantillon de sol fin et l'homogénéiser.
- Etaler l'échantillon dans le bol, de manière à avoir une épaisseur à peu près constante, de 1cm avec une surface horizontale.
- Appliquer une rainure au milieu, séparant l'échantillon en deux parties distinctes et égales, de manière à avoir le fond du bol.
- Tourner la manivelle en comptant la norme de fois que le bol s'est élevé puis rabattu jusqu'à ce que la fente se referme.
- Prendre un peu de l'échantillon où la fente se referme, le peser, et calculer sa teneur en eau.

b) Détermination de la limite de plasticité :

- Prendre un échantillon séché du sol fin.
- Y ajouter un peu d'eau.
- Former trois fils de 3 mm de diamètre et de 10 cm de longueur sur le modèle d'une petite barre de fer.
- Rouler les fils sur une planche de bois, servant à l'assécher au fur et à mesure, jusqu'à l'apparition des premières fissures. les rétrécir si nécessaire pour maintenir la même longueur de 10cm.
- Récupérer l'échantillon, le peser, et calculer sa teneur en eau.

**Tableau II.5** Détermination de la plasticité des sols vis-à-vis de l'indice de plasticité IP

IP	Degré de plasticité
$0 < IP < 5$	Non plastique
$5 < IP < 15$	Moyennement plastique
$15 < IP < 40$	Plastique
$40 < IP$	Très plastique

**Tableau II.6** Détermination du potentiel de gonflement des sols vis-à-vis de l'indice de plasticité IP

% IP	Potentiel de gonflement
0-15 %	Faible
10-25 %	Moyen
25-55 %	Elevé
> 55 %	Très élevé

**Tableau II.7** Détermination de l'indice de consistance des sols vis-à-vis de l'indice de plasticité IP

$I_c$	L'indice de consistance
0 %	Liquide
0.25 %	Très molle
0.5 %	Molle
0.85 %	Mi-consistante
1 %	Consistante
1 <	Très consistante

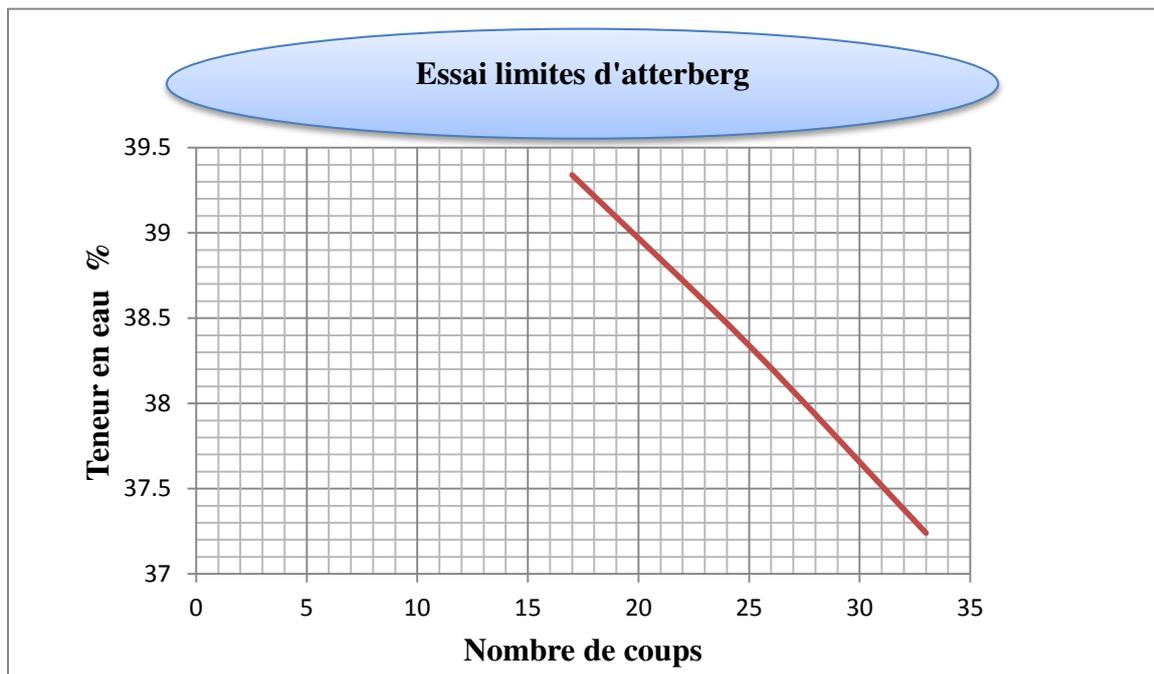
- **Résultats :**

Les limites d'Atterberg ont été effectuées à partir d'un échantillon du sol et les résultats sont les suivantes :

**Tableau II.8** Résultat de limite d'atterberg

<i>Paramètres</i>	$W_L(\%)$	$W_P(\%)$	$I_p(\%)$
<i>Sols</i>			
<i>Argile</i>	38.31	26.86	11.45

Figure II.7 Résultats Limite de Liquidité



Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction

Unité skikda - antenne El Tarf - TEL/FAX : 0.38.31.66.92.30

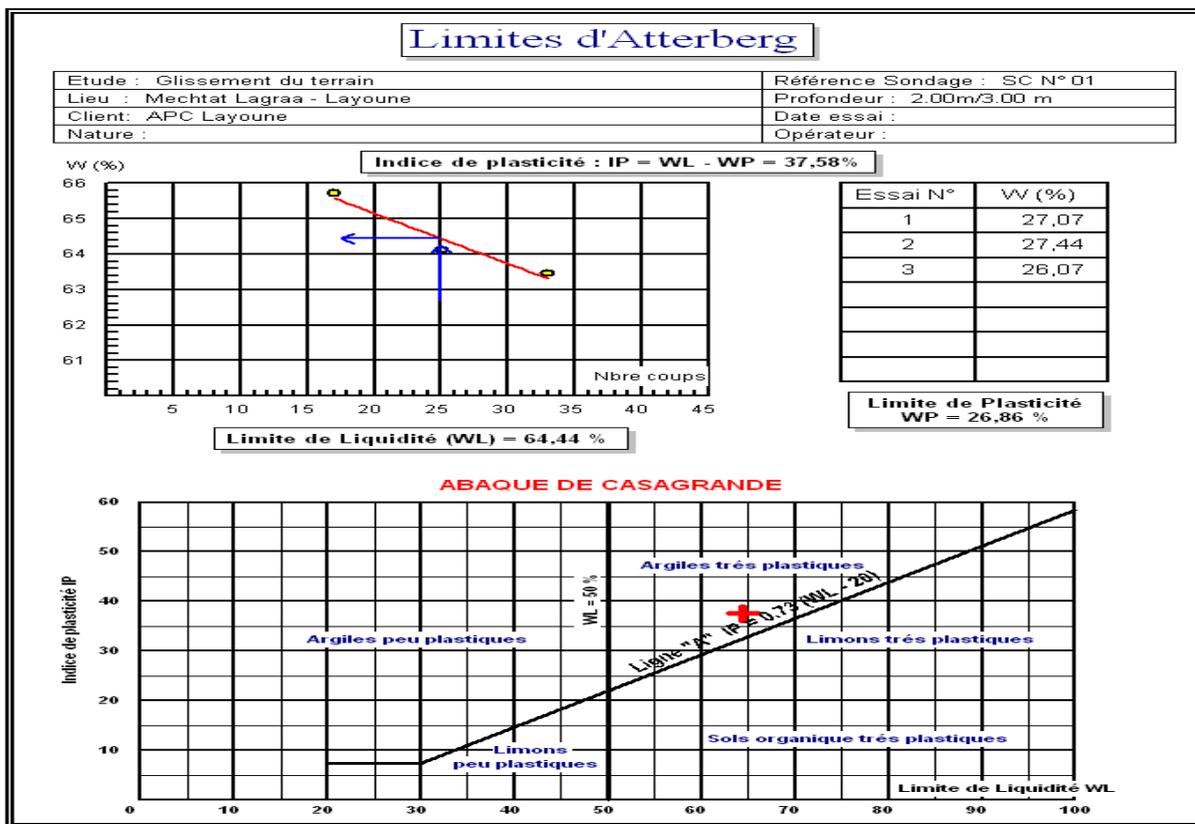


Figure II.8 courbe de limite d'atterberg

**L'indice de plasticité:  $I_p = W_I - W_p = 11.45\%$**

$15 < I_p < 40$  sol reconstitue de classement : plastique à potentiel de gonflement faible à moyen.

- **Conclusion :**

Les tests d'Atterberg, faciles à effectuer, permettent de calculer des limites de plasticité et de liquidité assez précises, et très importantes pour la détermination du type de sol. Pour la courbe granulométrique, la granulométrie et la sédimentométrie nous fournissent la répartition des fractions de sol selon le diamètre des grains. D'où la classification du sol de machta laayoun a été faite selon la classification NF P94-051, NF P94-056.

Le pourcentage des éléments passant à travers le tamis (80 $\mu$ m) est de 63% supérieur à 50% indique que *le sol est fin*.

La limite de liquidité et l'indice de plasticité du sol machta laayoun portés sur le diagramme de Casagrande se rencontrent en un point situé au dessus de la ligne A. Ce qui signifie que le sol est classé comme *une argile très plastique*.

## **II.2.2 Caractérisation mécanique**

### **II.2.2.1 L'essai Proctor (NF P94-093)**

- **But de l'essai :**

L'essai Proctor a pour but de déterminer **la teneur en eau optimale (w)** pour un sol de remblai donné à laquelle doit être compactée cette sol pour obtenir la **densité sèche maximum ( $\gamma_d$ )** et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale.

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir des essais dits : Essai Proctor normal ou Essai Proctor modifié.

- **Principe de l'essai :**

L'essai Proctor consiste à mesurer le poids volumique d'un sol (argile) disposer en trois couches dans un moule Proctor de volume connu, dans chaque couches étant compacter avec la dame Proctor l'essai répété plusieurs fois et on varie à chaque fois la teneur en eau(12- 14- 16 et 18%-24%) et on fixe l'énergie de compactage (3\*25).

- **Appareillage :**

- Dame Proctor normal.
- Moule Proctor avec embase et hausse.

- Règle à araser.
- Disque d'espacement.
- Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau.
- Tamis 5 et 20 mm (contrôle et écrêtage le cas échéant de l'échantillon).
- Truelle, spatule, pinceau, etc...
- Eprouvette graduée et burette d'eau pour humidifier le sol.
- Petits récipients (mesures des teneurs en eau).
- Four.
- Balance de portée supérieure à 6 kg.
- Balance de précision 200 g, précision  $\pm 0,1$  g.



**Figure II.9** Appareillage nécessaire pour l'essai Proctor

• **Mode opératoire :**

- Préparer le matériau d'abord.
- Assembler moule + embase + disque de papier au fond du moule (facilite le démoulage) ; puis peser l'ensemble.
- Introduire la 1er couche et la compacter placer le moule sur un socle en béton d'au moins 100kg, ou sur un plancher en béton de 25 cm d'épaisseur, pour que l'ensemble de l'énergie appliquée le soit à l'échantillon.
- Recommencer l'opération pour chaque couche (3pour de compactage normal.
- Après compactage de la dernière couche, enlever la rehausse. Le sol compacté doit dépasser du moule de 1 cm environ .si non recommencer l'essai.

- Araser soigneusement à partir du centre ; on veillera au cours de l'écrasement à ne pas créer de trous sur la surface arasé.
- Peser l'ensemble juste arasé.
- Enlever l'embase et prélever 2 prises sur l'échantillon, l'une en haut et l'autre en bas, en déterminer la teneur en eau  $w$  et on prendra la moyenne des deux valeurs obtenues.
- Augmenter de 2% la teneur en eau  $w$  de votre échantillon de départ et recommencer 5 à 6 fois l'essai ; après avoir à chaque fois bien nettoyer votre moule.

• **Présentation des résultats :**

Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et l'on trace la courbe des variations de cette masse en fonction de la teneur en eau. Chaque point tracé sur la courbe représente un essai de compactage. La détermination complète de la courbe requiert généralement 5 points.

**Tableau II.9** Résultat de Proctor

<i>Paramètres</i>	<i>Essai 1</i>	<i>Essai 2</i>	<i>Essai 3</i>
<i>Essai</i>			
$W$ (%)	15.14	16.46	17.82
$\gamma_d$ sèche ( $t/m^3$ )	2.01	2.05	1.98

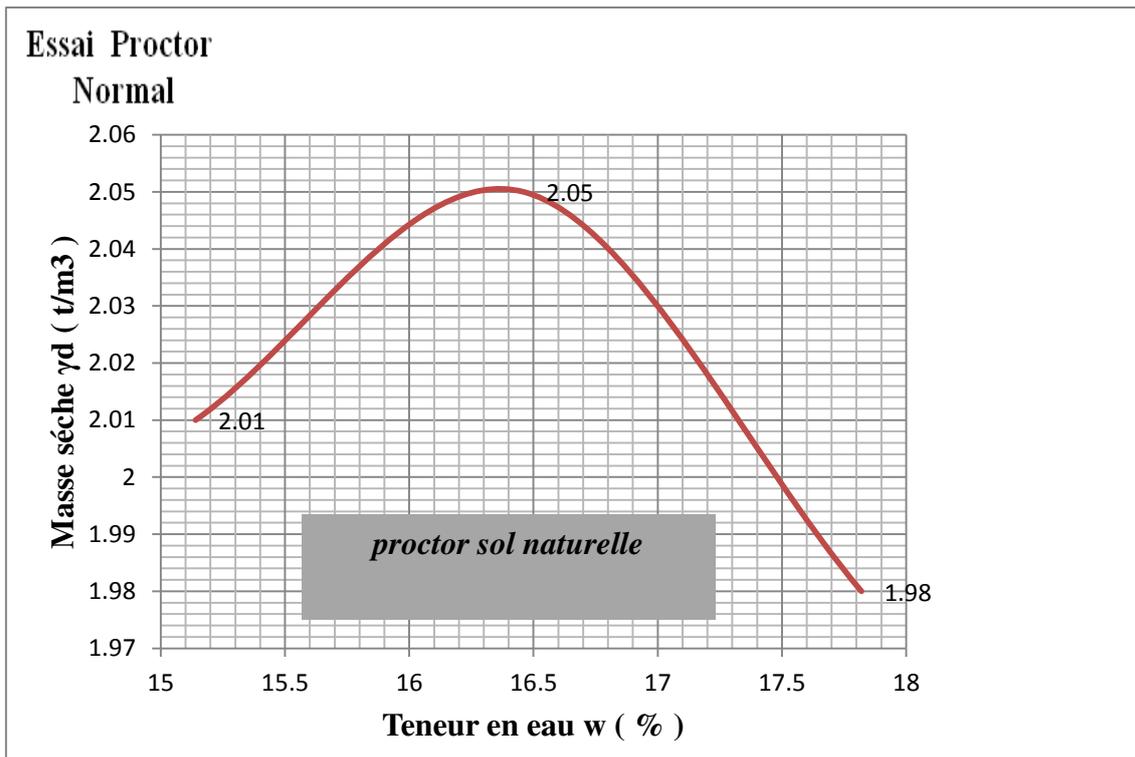


Figure II.10 Courbes Proctor de sol naturel

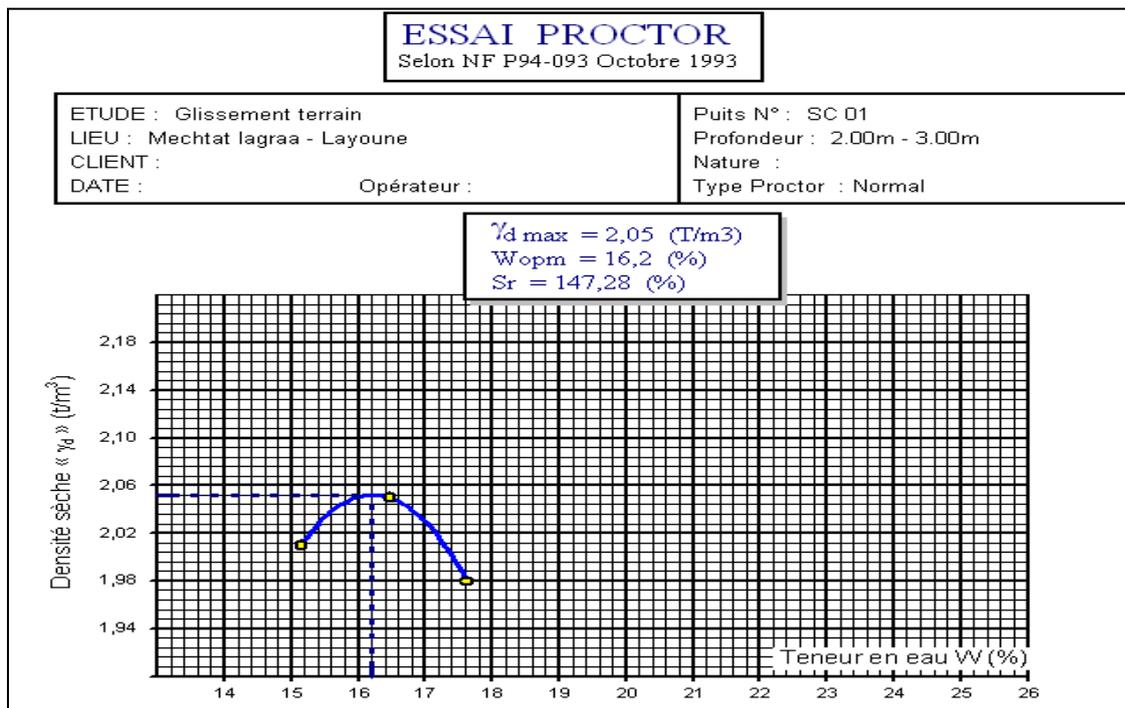


Figure II.11 courbe densité sèche en fonction teneur en eau

• **Conclusion :**

La courbe  $\gamma_d = f(W)$  permet d'apprécier le comportement au compactage du matériau en fonction de la teneur en eau.

On peut également caractériser l'état hydrique d'un matériau par l'écart relatif entre sa teneur en eau avec celle de son optimum Proctor normal OPN ( $W/WOPN$ ).

L'utilisation des références de compactage du matériau ( $\gamma_d$ OPN et WOPN) n'est pas possible que lorsque la proportion d'élément supérieur à 20mm et inférieur à 30%.

#### II.2.2.2 Essai de cisaillement direct (NF P 94-071-1)

- **Principe de l'essai :**

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi-boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette.

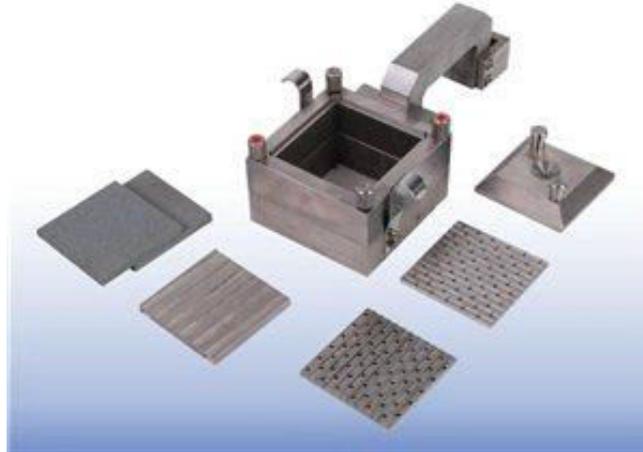
Il consiste à :

- Appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical (N) maintenu constant pendant toute la durée de l'essai.
- Produire un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan horizontal de glissement des deux demi-boîtes, l'une par rapport à l'autre en leur imposant un déplacement relatif  $\Delta l$  à la vitesse constante.
- Mesurer l'effort horizontal de cisaillement (T) correspondant.

- **Appareillage :**

L'appareillage spécifique à l'essai comprend :

- Le bâti.
- La boîte de cisaillement.
- Le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette.
- Le dispositif produisant un déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boîtes.
- Un système de mesurage des efforts, des déplacements et du temps.
- Balances de portées maximale et minimale compatibles avec les masses à peser et telles que les pesées sont effectuées avec une incertitude de 1/1000 de la valeur mesurée.
- Une étuve.
- Les outils nécessaires au découpage et à la préparation des éprouvettes.
- Un chronomètre donnant la seconde.



**Figure II.12** Boîte de Cisaillement

- **Mode opératoire :**

**Mise en place de l'échantillon :**

- Assembler les deux demi- boîtes avec 2 goupilles.
- Positionner les stries perpendiculaires au sens de déformation.
- Mettre l'échantillon bien tassé (jusqu'à 3 mm de l'arase supérieure).
- Placer le piston de chargement (positionner les stries perpendiculaires au sens de déformation).

**Mise en place dans la boîte :**

- La demi- boîte inférieure doit être bloquée dans le chariot par des vis de blocage.
- La demi- boîte supérieure est solidaire de l'anneau dynamométrique (un écrou à visser).
- Mettre en place le dispositif de chargement de la boîte.
- Appliquer sur le dispositif prévu la charge désirée (bras de levier avec un rapport de 10).
- Vérifier le bon positionnement des comparateurs (boîte et anneau).
- Enlever les vis de fixation des demi- boîtes.

**a) Mise en marche :**

- Chronomètre à zéro.
- Comparateur à zéro.
- Réglage de la vitesse d'essai sur le pupitre de contrôle.
- Relever seulement les déplacements du comparateur de l'anneau toutes les 15 secondes.

**b) Fin de l'essai :**

- Lorsque la contrainte de cisaillement est devenue constante.
- Arrêter l'essai en appuyant sur la touche « off » du pupitre de contrôle.
- Relever la valeur du déplacement de la boîte sur le pupitre de contrôle ainsi que sur le comparateur correspondant.

Remettre les vis de fixation de ses deux semi-boîtes, enlever et nettoyer la boîte.



**Figure II.13** Appareil de Cisaillement Direct

- **Résultats des essais de cisaillement à la boîte**

L'objectif de cette partie expérimentale, en premier, est la détermination des paramètres de du cisaillement sol et qui sont : l'angle de frottement interne  $\varphi$ , la cohésion C et la résistance au cisaillement.

**Tableau II.10** Résultat de l'essai de cisaillement

<b>Contrainte normale (bars)</b>	<b>0.5</b>	<b>1.00</b>	<b>1.5</b>
<b>Contrainte cisaillement (bars)</b>	0.34	0.46	0.58

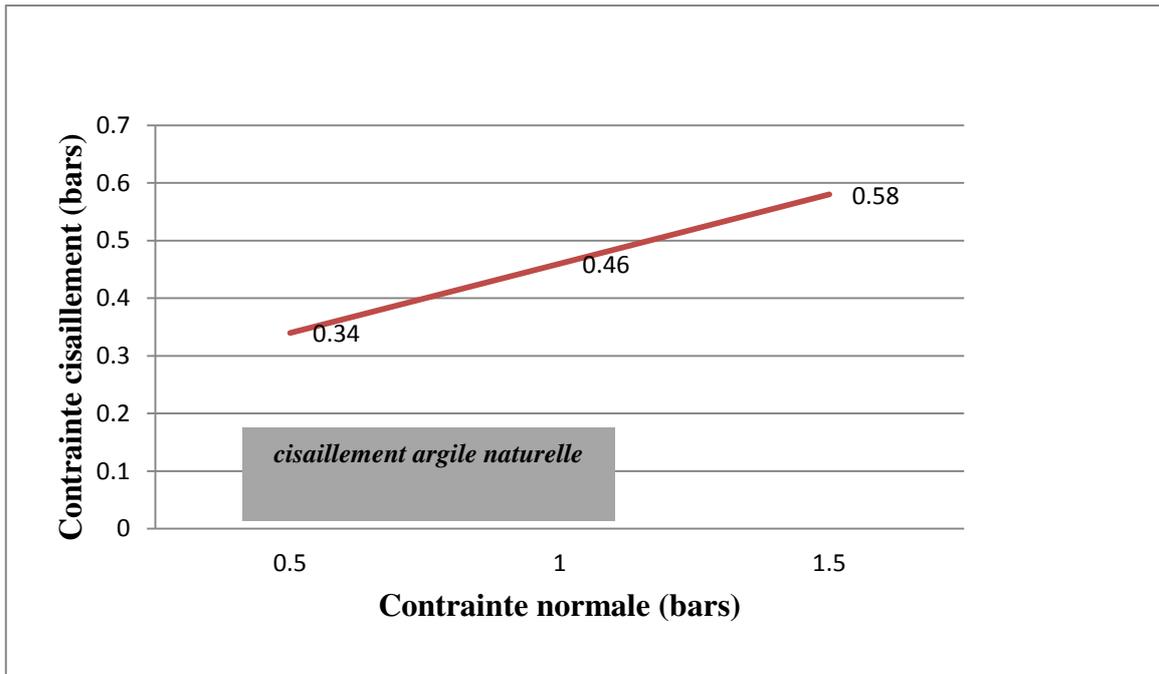


Figure II.14 courbe de cisaillement

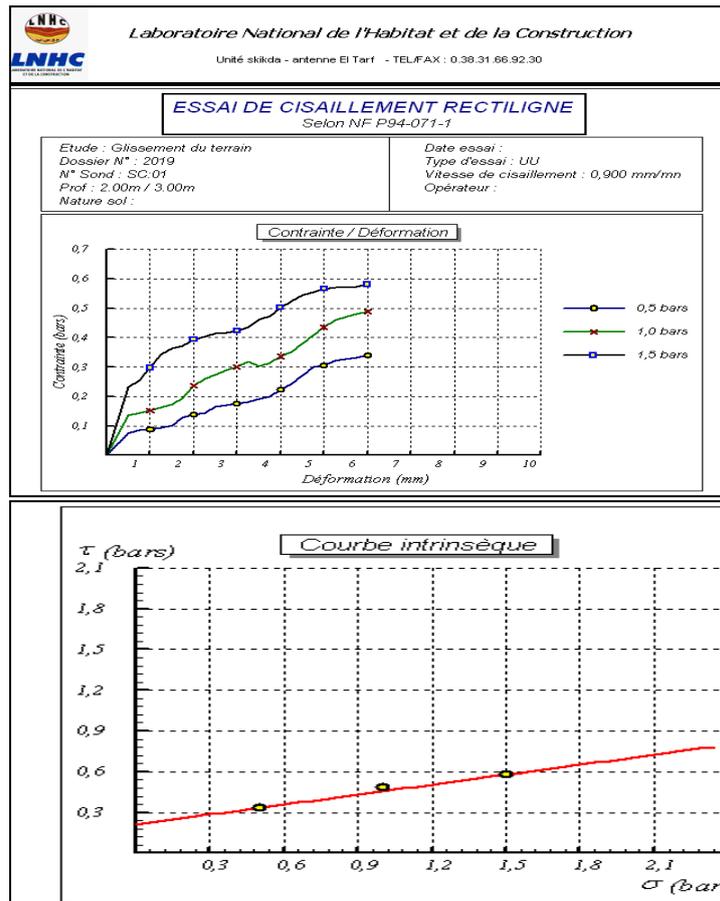


Figure II.15 courbe contrainte de cisaillement

### II.2.2.3 Essai Oedométrique(XP 94-090-01)

- **But De L'essai :**

C'est un essai de compression par paliers et de gonflement à l'oedomètre. L'éprouvette cylindrique est confinée latéralement et en général, soumise à des incréments discrets de chargement ou déchargement axial vertical, le drainage pouvant s'effectuer dans la direction axiale. À partir de cet essai on détermine les caractéristiques suivantes :

- $C_c$  l'indice de compressibilité.
- $C_g$  l'indice de gonflement.
- $P_C$  l'indice de consolidation.
- $\sigma_p$  la contrainte de pré consolidation du sol.

Cet essai constitue une application directe de la théorie de Terzaghi proposée pour l'étude de la consolidation verticale des sols fins saturés. A partir des résultats de cet essai on procède à l'évaluation de l'amplitude du tassement de consolidation primaire d'une couche de sol compressible ainsi que le temps de consolidation qu'elle nécessite.

- **Principe de l'essai :**

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

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

- **Appareillage :**

L'appareil spécifique à l'essai oedomètre :

- le bâti permettant d'appliquer les contraintes de chargement sur l'éprouvette.
- La cellule oedométrique.
- Le dispositif d'application de charge.
- Le système de mesure.

La réalisation de l'essai nécessite en outre l'appareillage courant pour l'extraction des échantillons de leur conteneur, la préparation des éprouvettes et la détermination des teneurs en eau et des masses volumiques des échantillons de sol.



Figure II.16 Les composants de cellule oedométrique



Figure II.17 Vue générale de l'appareil oedométrique

- **Mode Opérateur :**

- Déformation de la cellule oedométrique sur son bâti de chargement.
- Une mesure de déformation de la cellule est effectuée avec éprouvette témoin métallique placée entre les deux disques drainants, éventuellement recouverts de papier-filtre, en passant par les mêmes paliers de chargement que pour l'essai.

Afin de déterminer l'amplitude des corrections à prendre en compte. Suivant les cas, cette mesure est effectuée avant ou après l'essai lui-même. Elle reste utilisable pendant un maximale de six mois sans modification de matériel.

Cette mesure de déformation de l'appareillage est nécessaire en présence de sols gonflants et lors d'essais sous des contraintes supérieures à 1.6 MPa.

- **Déroulement de l'essai :**

L'essai consiste à soumettre éprouvette de section transversale A à une série de palier de chargement d'intensité constante et à mesurer ; pour chacun d'eux, la variation de hauteur  $\Delta H$  de cette éprouvette au cours du temps.

Le palier de chargement de rang n correspond à une contrainte verticale moyenne  $\sigma_{v(n)}$  sous la charge  $N_{(n)}$  appliquée à l'éprouvette telle que :

$$\sigma_{v(n)} = \frac{N(n)}{A}$$

D'un palier à l'autre, le taux d'accroissement de la contrainte i est défini par :

$$i = \frac{\sigma_{v(n+1)} - \sigma_{v(n)}}{\sigma_{v(n)}}$$

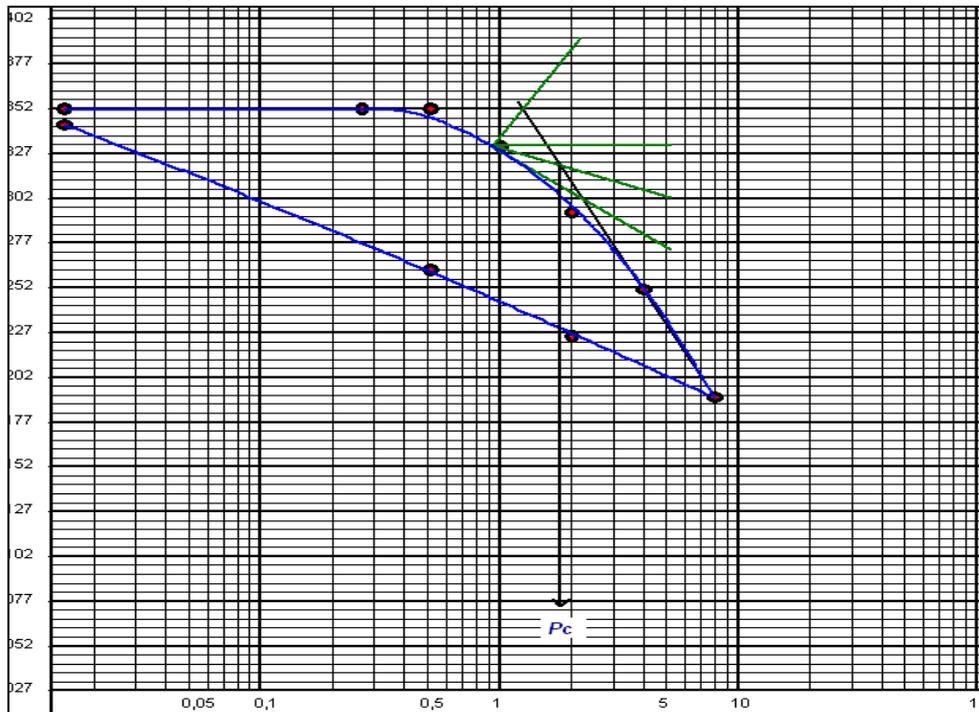
**Gonflement de l'éprouvette à la mise en eau :**

- Dans le cas de sols gonflants, l'éprouvette mise en présence d'eau a tendance à soulever le dispositif d'application de la charge. Celui-ci devra alors être maintenu dans sa position initiale par un chargement qui lui est appliqué immédiatement et progressivement jusqu'à l'apparition du premier tassement stabilisé c'est -à-dire en appliquant par exemple successivement des contraintes voisines de  $0.5\sigma'_{vo}$  ;  $0.75\sigma'_{vo}$  ;  $\sigma'_{vo}$  ;  $1.5\sigma'_{vo}$  .....
- La contrainte correspondant à l'apparition du premier tassement compte tenu de la correction de la déformation propre de l'appareillage est notée:  $\sigma_{v2}$ .
- Le chargement est ensuite poursuivi avec un taux d'accroissement de chargement n'excédant pas 1 (sans déchargement intermédiaire).
- Le dernier palier de se chargement sera choisi en fonction du respect des deux critères suivants, dans la limite des possibilités de l'appareillage :
- Obtention de trois point alignés sur la courbe de variation de hauteur de l'éprouvette en onction du logarithme de la contrainte appliquée ( $\Delta H$ ,  $\lg\sigma_v$ ).

- Contrainte  $\sigma_{v(n)}$  de ce dernier palie de chargement supérieure à la contrainte effective vertical à laquelle sera soumis le sol , au droit du prélèvement , après construction de l'ouvrage auquel se apporte l'étude.
- L'essai se termine par un déchargement comportant au moins quatre palies, dont les deux deniers correspondent aux contraintes  $\sigma_{v2}$  et  $\sigma_{v1}$ .

**Tableau II.11** Résultat de l'oedomètre

<i>Paramètre</i>	<i>C<sub>c</sub>(%)</i>	<i>C<sub>g</sub>(%)</i>	<i>P<sub>c</sub> (bars)</i>
<i>Sols</i>			
<i>Argile</i>	36	19.99	1.81



**Figure II.18** Courbe Indice des Vides – Contraintes

### II.3 CONCLUSION

La courbe granulométrique de l'argile de machta laayoun montre que :

- Le pourcentage des éléments passant à travers le tamis (80 $\mu$ m) est de 63%, supérieur à 50% indique que *le sol est fin*.
- Le pourcentage des fines inférieures à 80 $\mu$ m est de 63% contenant une fraction d'argile de 42%.
- La courbe granulométrie est étalée et continue.
- Les tests d'Atterberg, faciles à effectuer, permettent de calculer des limites de plasticité et de liquidité, et très importantes pour la détermination du type de sol, d'où le classement de notre sol est plastique a potentiel de gonflement faible à moyen.
- La limite de liquidité et l'indice de plasticité du sol machta laayoun portés sur le diagramme de Casagrande se rencontrent en un point situé au dessus de la ligne A. Ce qui signifie que le sol est classé comme *une argile très plastique* .
- La courbe  $\gamma_d = f(W)$  permet d'apprécier le comportement au compactage du matériau en fonction de la teneur en eau. Notre sol à une teneur en eau optimum de 16.46% et une masse sèche à l'optimum de 2,05t/m<sup>3</sup>
- L'essai de cisaillement à donné les résultats de cohésion de 0.21 bars, d'angles de frottements de 13.73°.
- L'essai oedométrique a donné la pression de préconsolidation  $P_c$  (1.81bars), indice de compression  $C_c$ ( 5.27%), coefficient de gonflement  $C_g$ (19.99%),



### III INTRODUCTION

Le traitement des sols est une technique très ancienne dont l'application tant au niveau des travaux de terrassement qu'au niveau de la réfection des routes ainsi que les pistes d'accès connaît actuellement un essor très important au niveau international. Le recours massif à cette technique qui valorise les matériaux en place ce qui entraîne une diminution notable des coûts est dû principalement à la raréfaction des gisements naturels de matériaux de bonne qualité, le souci écologique croissant imposant de préserver d'une part les ressources naturelles existantes en optimisant leur utilisation et de limiter d'autre part la mise en dépôt des matériaux impropres à la réutilisation en remblais ou en couches de forme et enfin le renchérissement des matériaux de substitution et des transports.

Ce chapitre examine l'effet du déchet de pneu sur certaines propriétés mécaniques des sols argileux telles que le compactage et la résistance au cisaillement, Et l'œdomètre.

#### III.1 BUT DE L'ETUDE

Le but de cette étude est l'observation du comportement des argiles et l'influence de l'ajout des déchets du pneu en vue de traitement des caractéristiques de ces argiles et leur exploitation dans les différents domaines des travaux publics en particulier les travaux routiers.

*N.B : Les essais précédents ont été réalisés au niveau du laboratoire LNHC EL TARF*

#### III.2 MATERIAUX UTILISES

**III.2.1. Argile** : L'échantillon prélevé est un matériau argileux qui provient d'un site de machtat laayoun de profondeur de 2 m.

Ce matériau est une argile très plastique de couleur gris.

**Tableau III.1** Localisation de site machtat laayoun

<i>Lieu dit</i>	Machtat laayoun
<i>Commune</i>	Laayoun
<i>Daira</i>	El kala
<i>Wilaya</i>	El tarf



**Figure III.1** L'argile étudiée

**III.2.2 Déchet de pneu** : le déchet de pneu utilisé est manufacturé situé à AIN MLILA wilaya de BATNA. La composition de ce produit est montrée sur les tableaux en dessous.

**Tableau III.2** composition chimique de déchet de pneu

Composition chimique	Valeur
Hydrocarbure polymérisés	49.2%
Caoutchouc synthétique	28.3%
Noir de carbone	19.6%
Acier	0.06%
Tissu	1.4%
Oxyde de zinc	1.8%
Soufre	47 mg/kg
Cadmium	11mg/kg
Chrome	92mg/kg
Nickel	82mg/kg
Plomb	48mg/kg

**Tableau III.3** propriété mécanique de déchet de pneu

<b>Propriétés mécaniques</b>	<b>Valeur</b>
<b>Résistance a la traction (MPA)</b>	11.8
<b>Résistance a la rupture Kg/mm<sup>2</sup></b>	3.1
<b>Elasticité (%)</b>	42
<b>Masse volumique kg/m<sup>3</sup></b>	3.43
<b>Résistance au rayonnement</b>	Excellente
<b>Perméabilité à l'eau</b>	0
<b>Perméabilité au méthane</b>	0.00251
<b>Angle de frottement interne</b>	26.3

**Laboratoire d'analyses physico-chimiques des matériels**  
**مخبر التحاليل الفيز و كيميائية للمواد**

N°10 Bouzabine, Route de Batna, Ain M'Lila Tel : 06.99.54.33.00 - 06.68.91.41.41 ou.40.90-40  
 Site web: www.laboratoire-lacip.com mail: contact@laboratoire-lacip.com , lacipgroup@yahoo.com

EURL LACIP GROUPE Entreprise au capital social : 1000 000 DA. Agr ement ministériel N°30, RC N° 02/B/0402937. IF : 09980040595501429 ART : 040

**RESULTATS D'ANALYSE**

Echantillon N° : ... 201 /2014 ...  
 Client : SARL HOUARA GRAND recyclages des pneus usagées Adresse : tleghma W.Mila Téléphone : 032-  
 Produit analysé : ...polymères (caoutchouc) ... date de prélèvements des échantillons : 05/09/2014. Par : LA

**Composition chimique et constituants d'un échantillon de pneu.**

Paramètres chimico-physiques	valeurs
Hydrocarbures polymérisés	49.2%
(caoutchouc synthétique)	28.3%
Noir de carbone	19.6%
Acier	0.06%
Tissu	1.4%
Oxyde de zinc	1.8%
Soufre	47 mg/kg
Cadmium	11 mg/kg
Chrome	92 mg/kg
Nickel	82 mg/kg
Plomb	48 mg/kg

**Propriétés mécaniques**

Paramètres mécaniques	valeurs
Résistance à la traction (Mpa)	11.8
Résistance à la rupture en kg/mm <sup>2</sup>	3.1
�lasticit� (%)	42
Masse volumique ρ (Kg/dm <sup>3</sup> ) <i>ρ = 1.24</i>	3.43
résistance au rayonnement U.V	Excellente
Perméabilité à l'eau	0
Perméabilité au méthane	0.00251
Angle de frottement interne	26.3 à

**Etude granulométrique**

Dimension	échantillon 1				échantillon 3		
0,00 mm - 0,25 mm	19,36	10,26	6,08	2,67	0	0,00	0
0,25 - 0,40 mm	47,45	25,16	11,67	5,13	0	0,00	0
0,40 -0,63 mm	77,25	40,96	26,56	11,68	0	0,00	0
0,63 - 1mm mm	35,32	18,73	76,85	33,81	0,6	0,30	0
>1 mm	9,24	4,90	106,14	46,70	201,35	99,70	0
3,00 - 4,50 mm	0	0,00	0	0,00	0	0,00	99,63
>4,50 mm	0	0,00	0	0,00	0	0,00	42,47

Fait   : Ain M'Lila le : 12/09/2013

(Cachet et signature du Gérant)

### III.3 PREPARATION DU MELANGE

La méthode utilisée pour la préparation des mélanges (*Argile + déchet du pneu*) est simple ; elle nécessite un matériel de laboratoire approprié (Bacs, petites pelles, étuve, balance électrique, tamis....).

On prend à chaque fois une quantité d'argile tamisée à différentes granulométries selon la spécificité de chaque essai puis on rajoute des quantités croissantes de déchet du pneu selon le pourcentage désigné (2,4 et 6%).



**Figure III.2** Mélange argile + déchet de pneu

### III.4 CARACTERISATION MECANIQUE

#### III.4.1 Essai Proctor

➤ **Influence du pourcentage de déchet du pneu sur le compactage :**

La présente expérience consiste à réaliser l'essai Proctor Normal (NF P 94- 093) sur un échantillon d'argile reconstitué puis après la substitution d'une quantité croissante de déchet du pneu en particules fines et de mesurer les éventuelles variations de la consistance du matériau composé.

Afin de voir l'influence des différents pourcentages d'ajout sur les paramètres de compactage de l'argile traitée au déchet du pneu, une série de 4 essais au compactage Proctor Normal a été effectuée au niveau du laboratoire LNHC d EL TARF



**Figure III.3** les étapes de l'essai Proctor

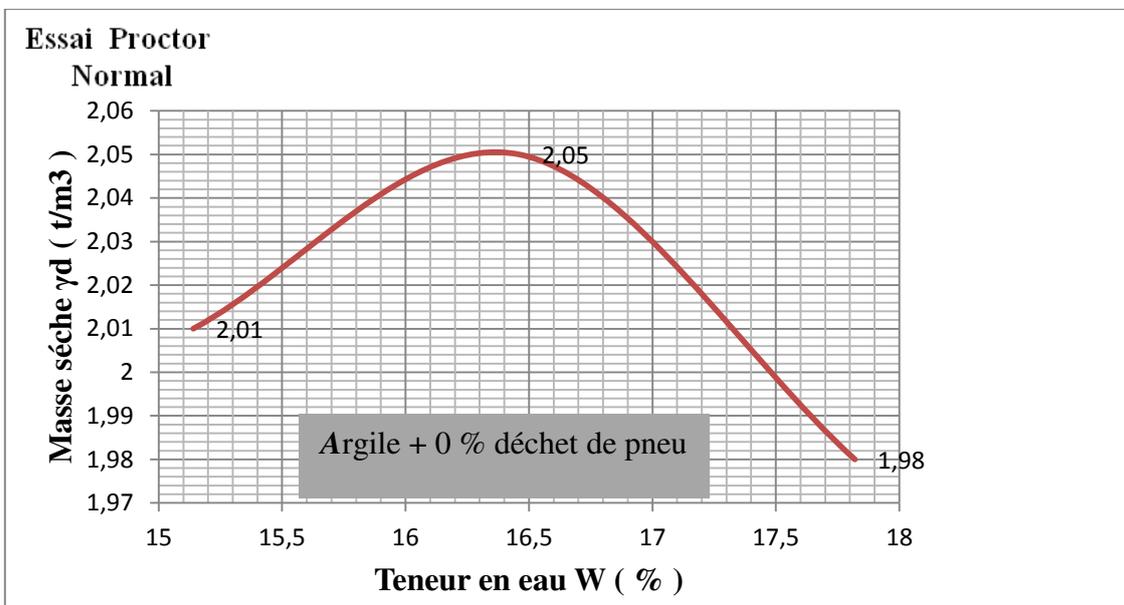
**Tableau III.4** Influence du pourcentage de déchet de pneu sur le Proctor

Paramètres Sols	$W_{OPN}$ (%)	$\gamma_{dsèche\ OPN}$ (t/m <sup>3</sup> )
Argile	16.46	<b>2.05</b>
Argile + 02 % déchet de pneu	17.18	<b>1.99</b>
Argile + 04% déchet de pneu	21.43	<b>1.86</b>
Argile + 06% déchet de pneu	21.82	<b>1.76</b>

Les variations de la densité sèche en fonction de la teneur en eau sont représentées dans les figures suivantes :

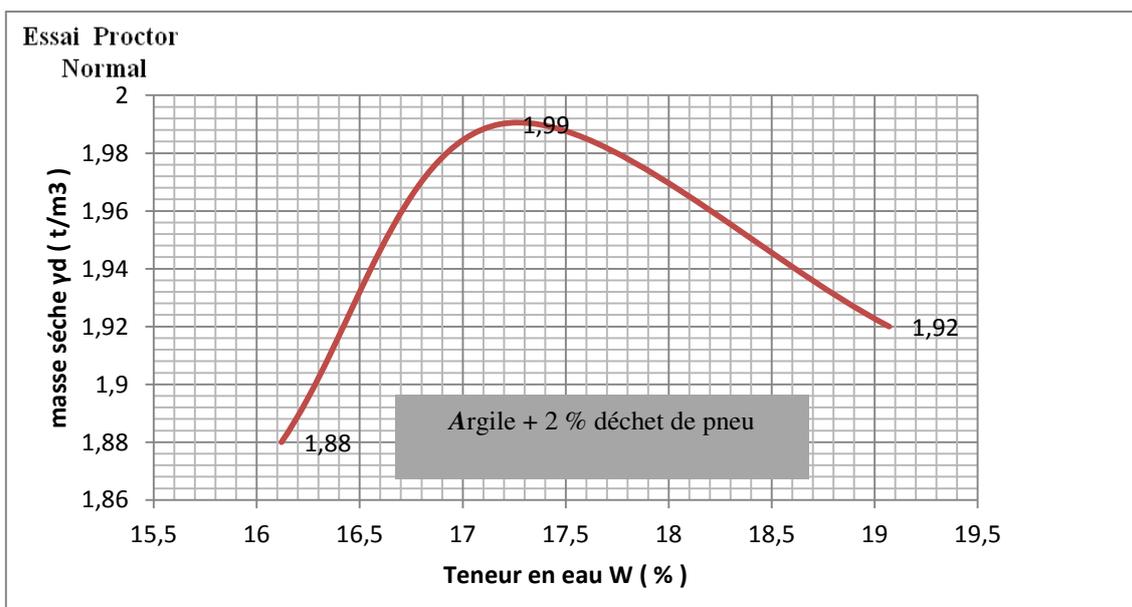
**Figure III.4 Courbes de compactage**

➤ **A l'état naturel (sol reconstitué) :**



**Figure III.4 a** La courbe de compactage Argile reconstituée

➤ **Après ajout de déchet de pneu :**



**Figure III.4 b** La courbe de compactage du mélange (Argile+2% déchet de pneu)

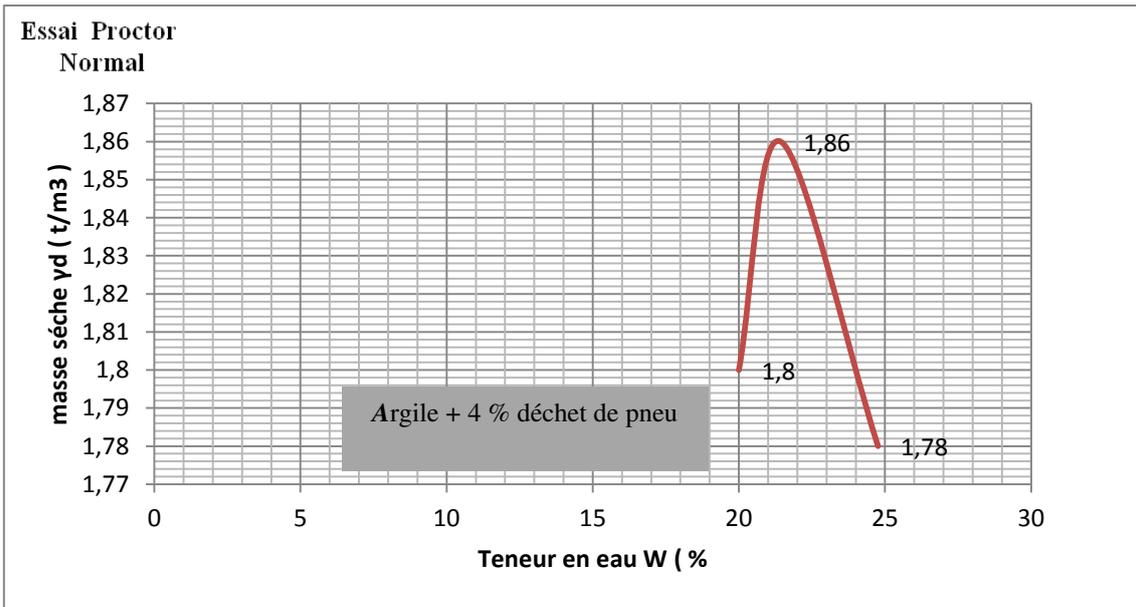


Figure c La courbe de compactage du mélange (Argile+ 4% déchets de pneu)

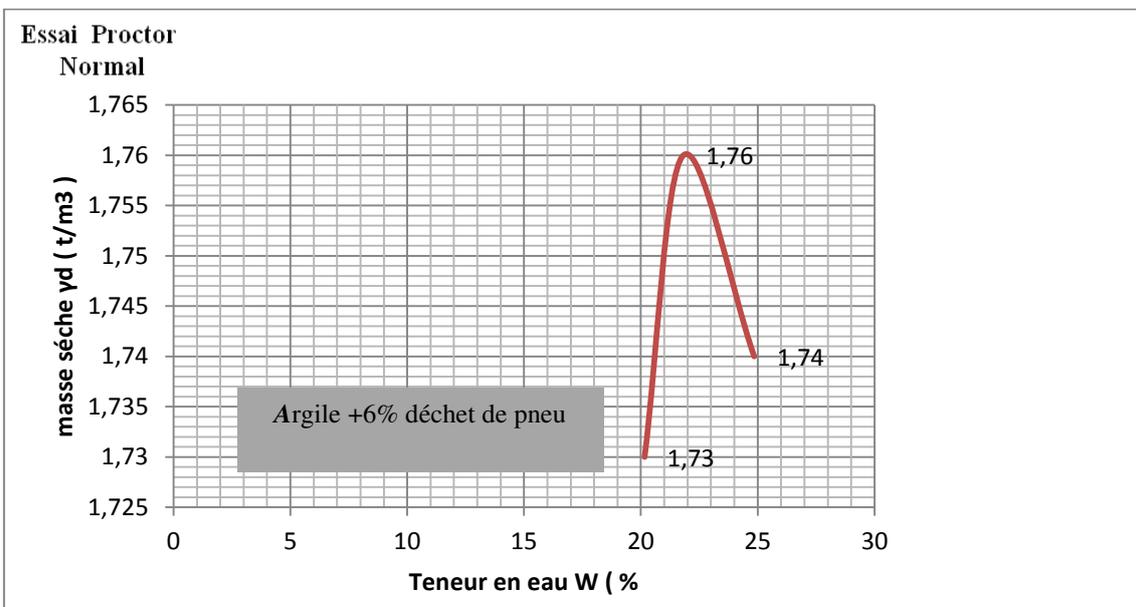
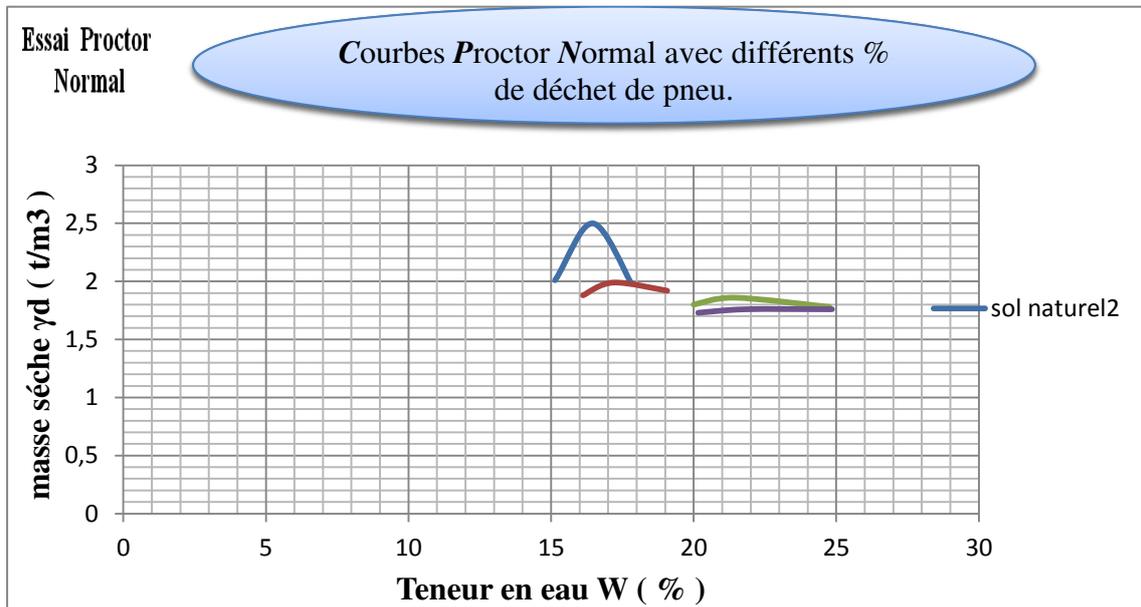


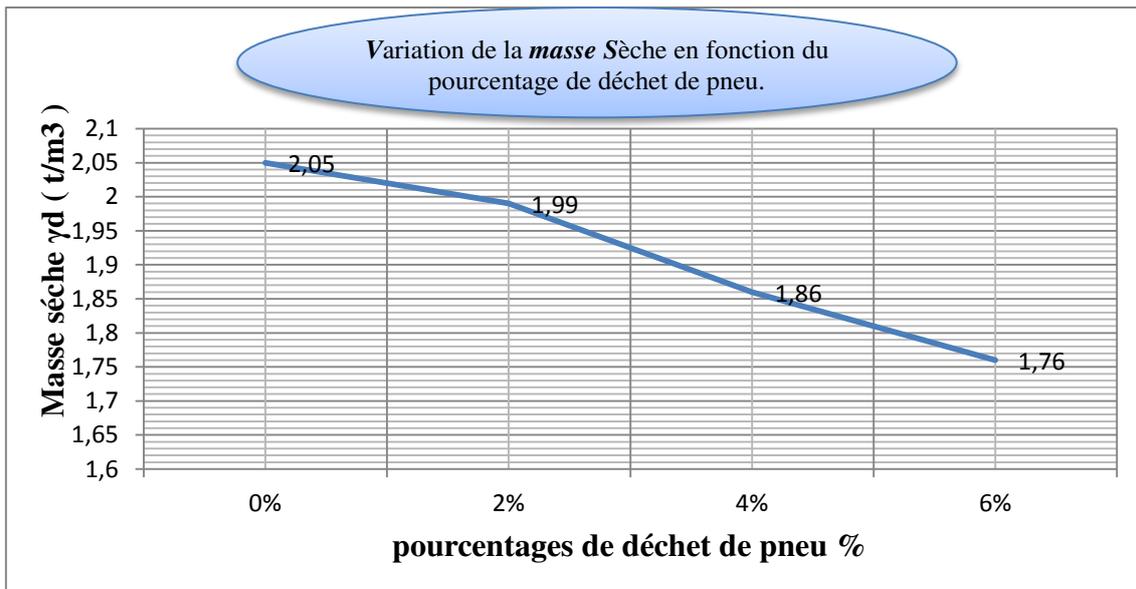
Figure d La courbe de compactage du mélange (Argile+ 6% déchets de pneu)

La variation de la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale sont représentées dans les figures suivantes :

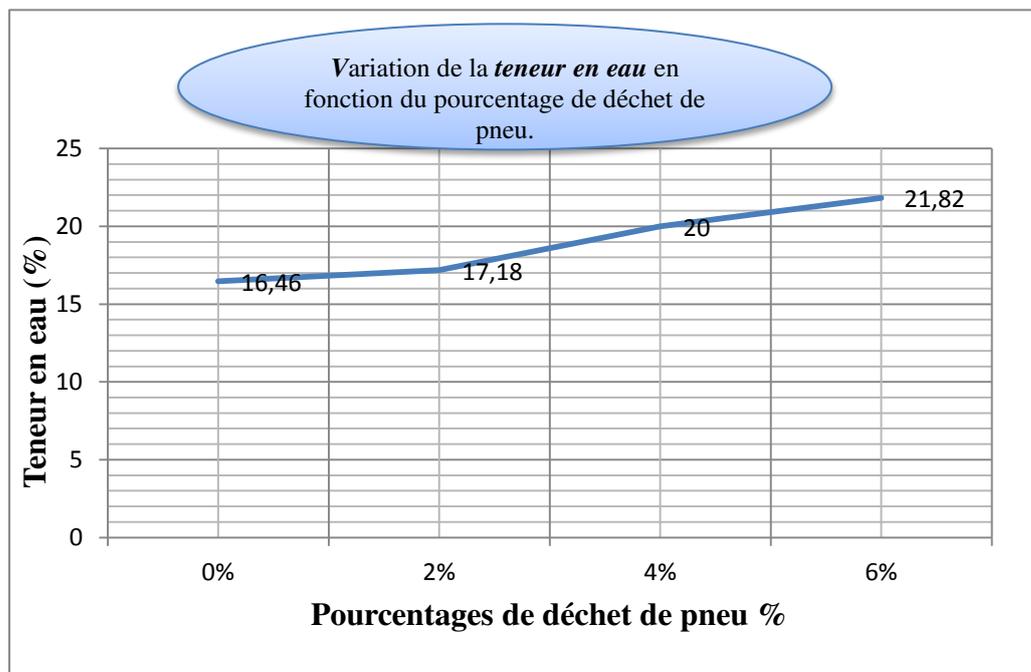


**Figure III.3** Comparaison entre les courbes de compactage Proctor Normal avec différents pourcentages de déchets du pneu

A travers ces figures, nous avons constaté que les valeurs des teneurs en eau optimales augmentent et les densités sèches maximales diminuent avec l'augmentation du dosage en déchet de pneu, un comportement similaire a été observé par différents chercheurs qui ont réalisés le même essai avec d'autres ajouts Koliass 2005, Al Rawas.A.A 2006, Ansary.M.A 2006.



**Figure III.4** variation de la MASSE sèche en fonction du pourcentage de déchet de pneu



**Figure III.5** variation de la teneur en eau en fonction du pourcentage de déchet de pneu

➤ **Interprétation:**

On remarque que la densité sèche optimale diminue et la teneur en eau optimale augmente graduellement en fonction de l'augmentation de la teneur en matériau rajouté (déchet de pneu), un comportement similaire a été observé par Kavak.A 2007, Khattab.S.A.A 2008, qui ont réalisés le même essai avec d'autres ajouts.

Cela est interprété par l'agglomération des particules d'argile qui provoque la visualisation des vides, donc teneur en eau optimum augmente pour les remplir, et par cela il est permis d'accroître la portance du sol en diminuant les pores.

### III.4.2 Essai cisaillement rectiligne

#### ➤ Influence du pourcentage de déchet du pneu sur le cisaillement :

Afin d'étudier l'influence du traitement du déchet du pneu sur les paramètres de résistance des sols reconstitués une campagne d'essais ou cisaillement directe à la boîte de casa-grande a été conduite. Les échantillons de sol reconstitué traité à différents pourcentage du déchet du pneu sont compactés à une teneur en eau optimal et masse volumique sèche maximale.



**Figure III.7** détermination cisaillement

**Tableau III.4** Influence du pourcentage de déchet de pneu sur le cisaillement

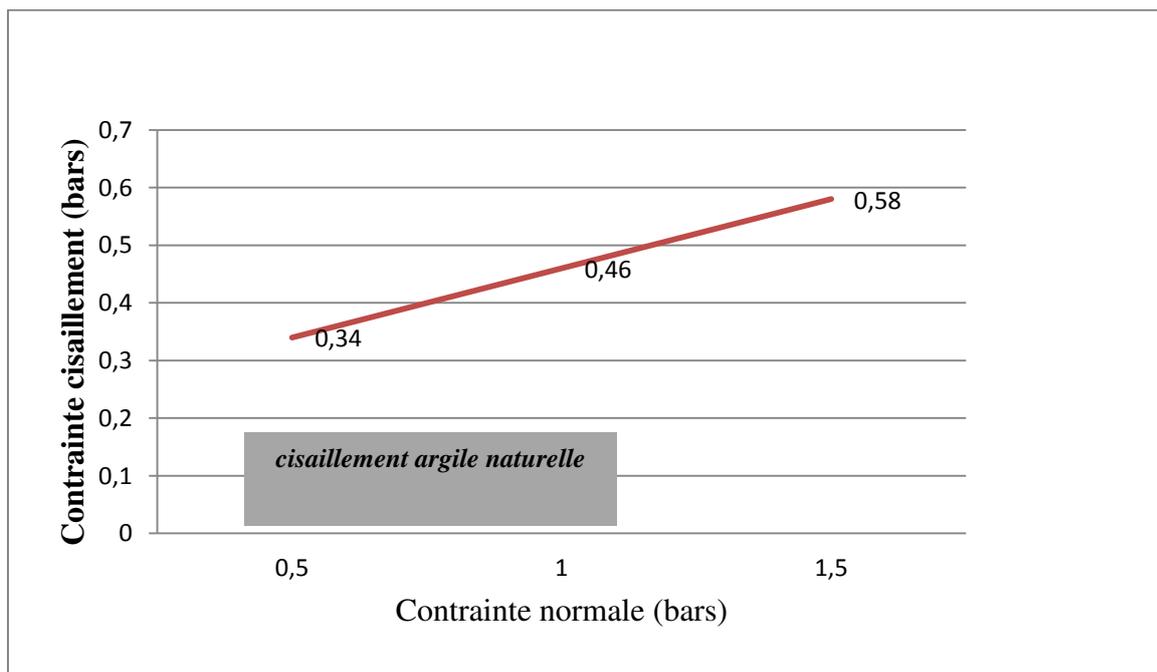
Sols	Paramètres	cohésion (%)	Angle de frottement (°)
	Argile	0.21	13.73
	Argile + 02 % déchet de pneu	0.19	15.24
	Argile + 04% déchet de pneu	0.15	19.02

Argile + 06% déchet de pneu	0.04	28.57
-----------------------------	------	-------

Les variations de la contrainte normale en fonction de la contrainte de cisaillement sont représentées dans les figures suivantes :

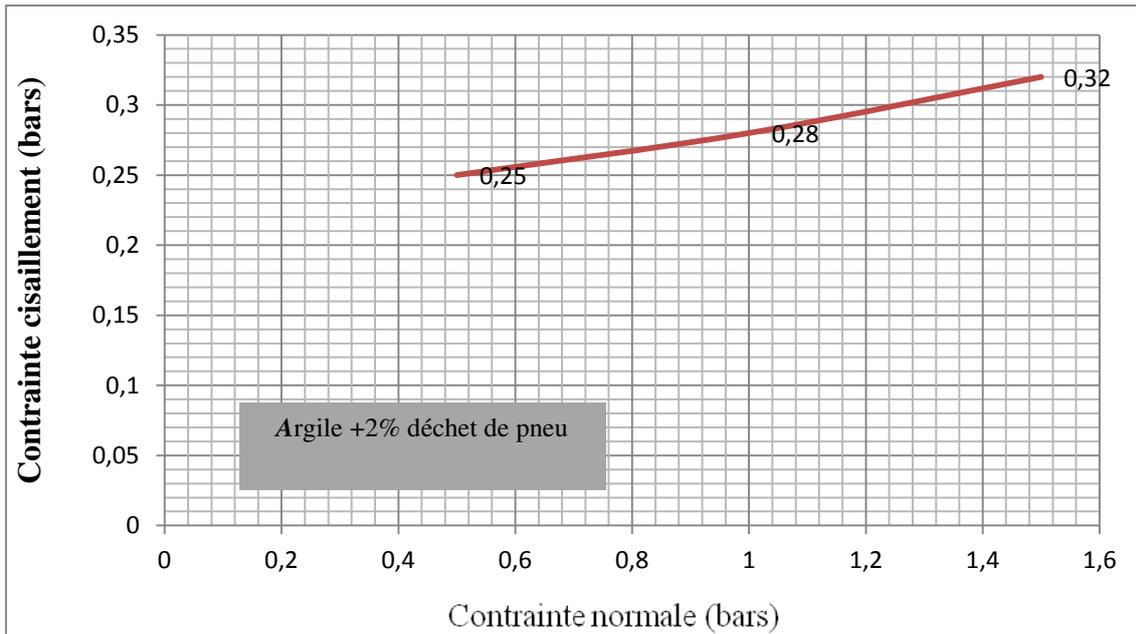
**Figure III.8** Courbes de cisaillement

➤ **A l'état naturel (sol reconstitué):**

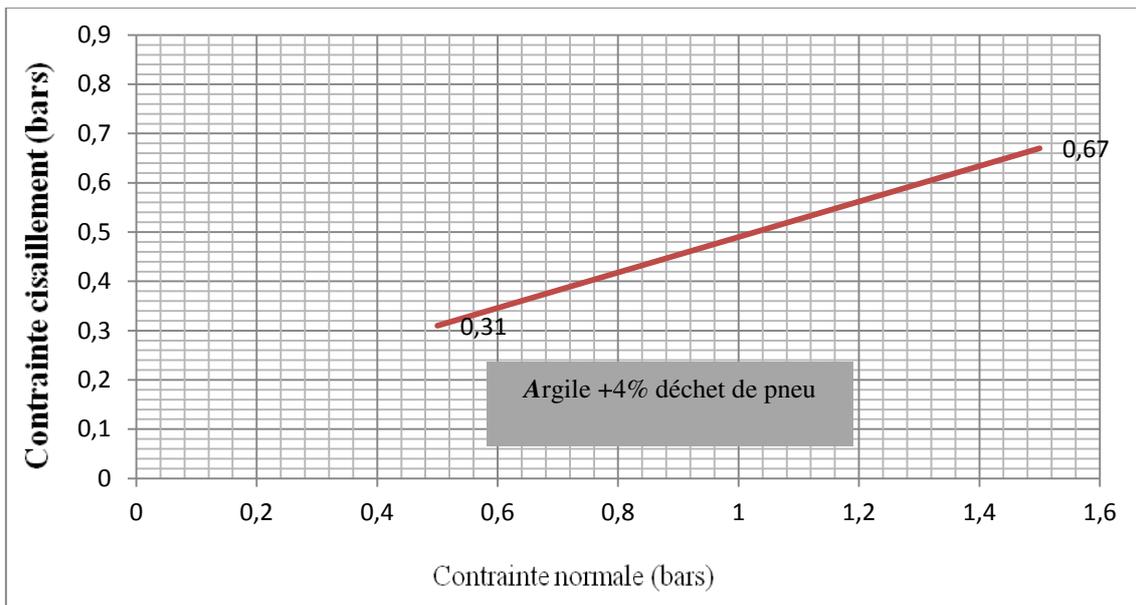


**Figure a** La courbe de cisaillement Argile reconstituée

➤ **Après ajout de déchet de pneu :**



**Figure b** La courbe de cisaillement de mélange (Argile + 2% déchet de pneu)



**Figure c** La courbe de cisaillement de mélange (Argile + 4% déchet de pneu)

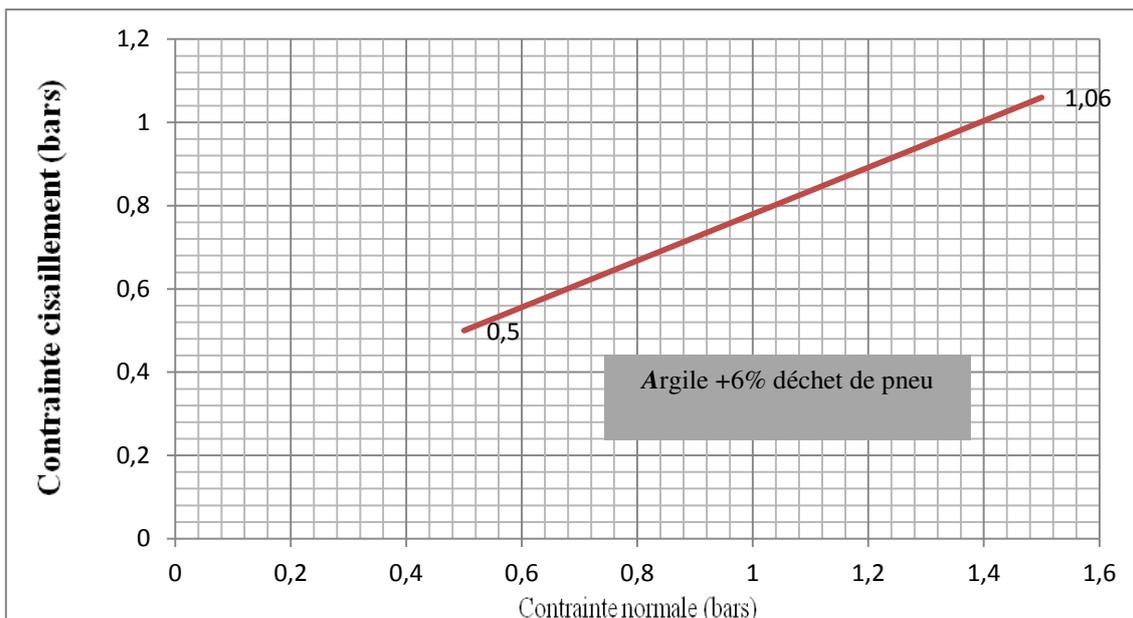


Figure dLa courbe de cisaillementde mélange (Argile + 6%déchet de pneu)

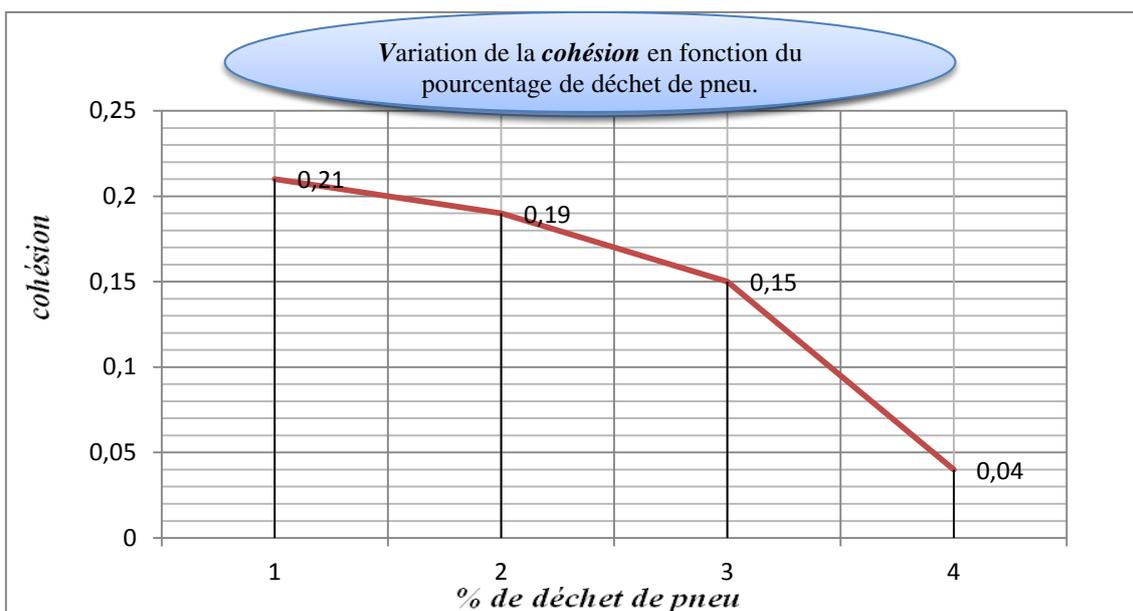
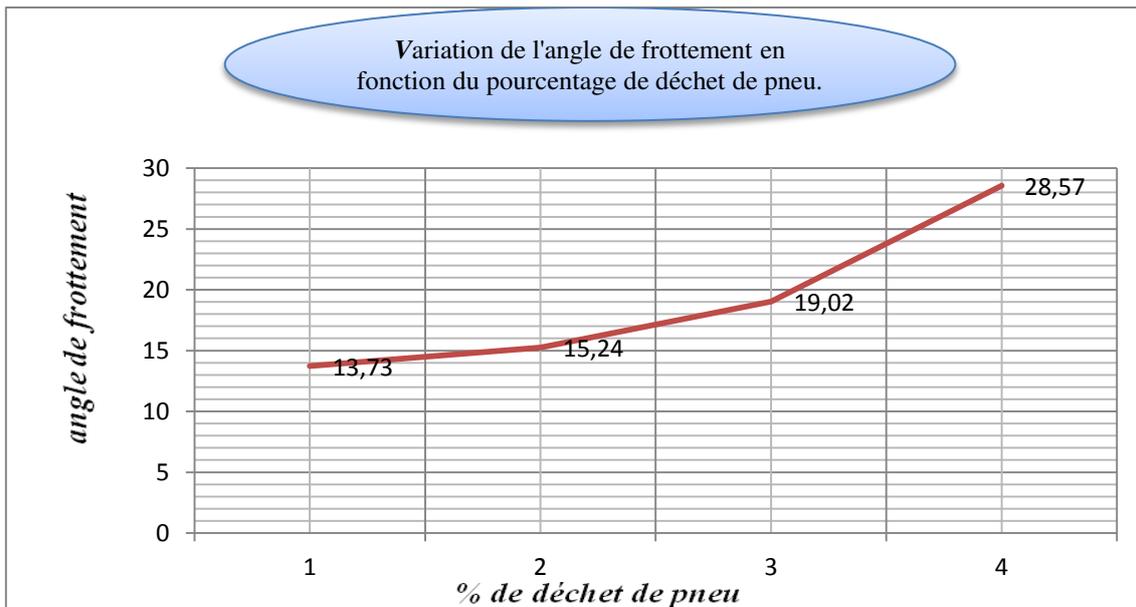


Figure III.7variation de la cohésion en fonction du pourcentage de déchet de pneu



**Figure III.7** variation de l'angle de frottement en fonction du pourcentage de déchet de pneu

➤ **Interprétation:**

Les résultats de l'essai de cisaillement montre que la cohésion diminue et l'angle de frottement augmente au fur et à mesure de l'augmentation de l'ajout, ce qui permet le passage d'un état cohérent vers un état granulaire, et par la suite une augmentation de la résistance.

III.4.3 Essai de compressibilité à l'œdomètre

➤ **Influence du pourcentage de déchets de pneus sur les paramètres de consolidation du sol :**

Les résultats de l'essai œdométrique pour l'argile traitée à différents % de déchet du pneu sont représentés sur le tableau suivant :

**Tableau III.5** Influence du pourcentage de déchet de pneu sur l'essai œdométrique

Paramètres Sols	$C_c(\%)$	$P_c(\text{bars})$	$C_g(\%)$
Argile	36	0.26	6.06
Argile + 02 % déchet de pneu	27	1.04	5.93
Argile + 04% déchet de pneu	26	1.88	5.27

Argile + 06% déchet  
de pneu

19

2.99

5.16

Figure III.8 Courbes œdométriques

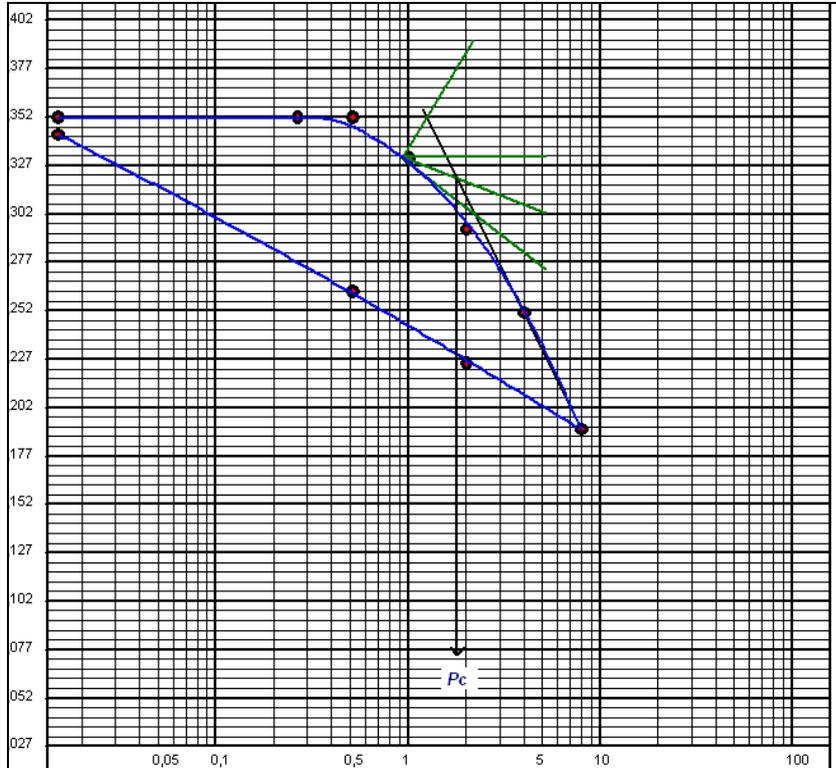


Figure e courbe œdométrique sol naturelle



Figure f courbe œdométrique mélange sol +2% déchet de pneu

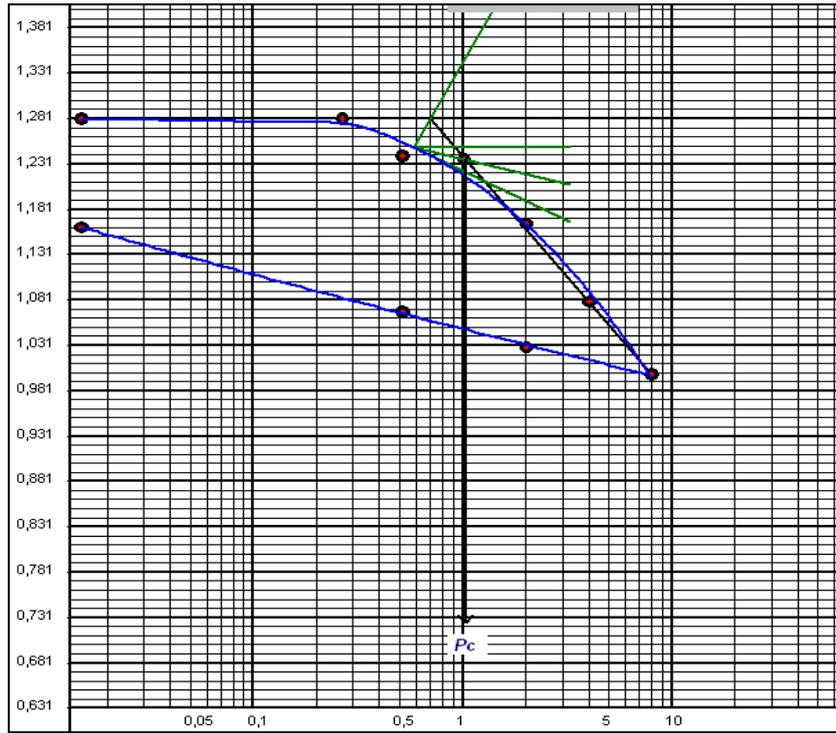


Figure g courbe Edométrique mélange sol +4% déchet de pneu

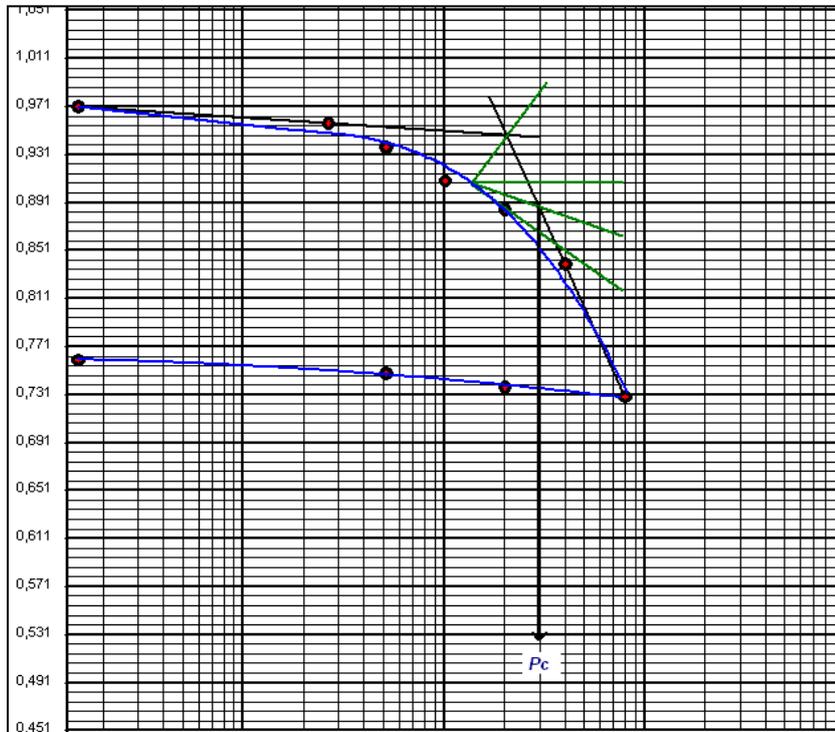


Figure h courbe Edométrique mélange sol +6% déchet de pneu

➤ A l'état naturel (sol reconstitué):

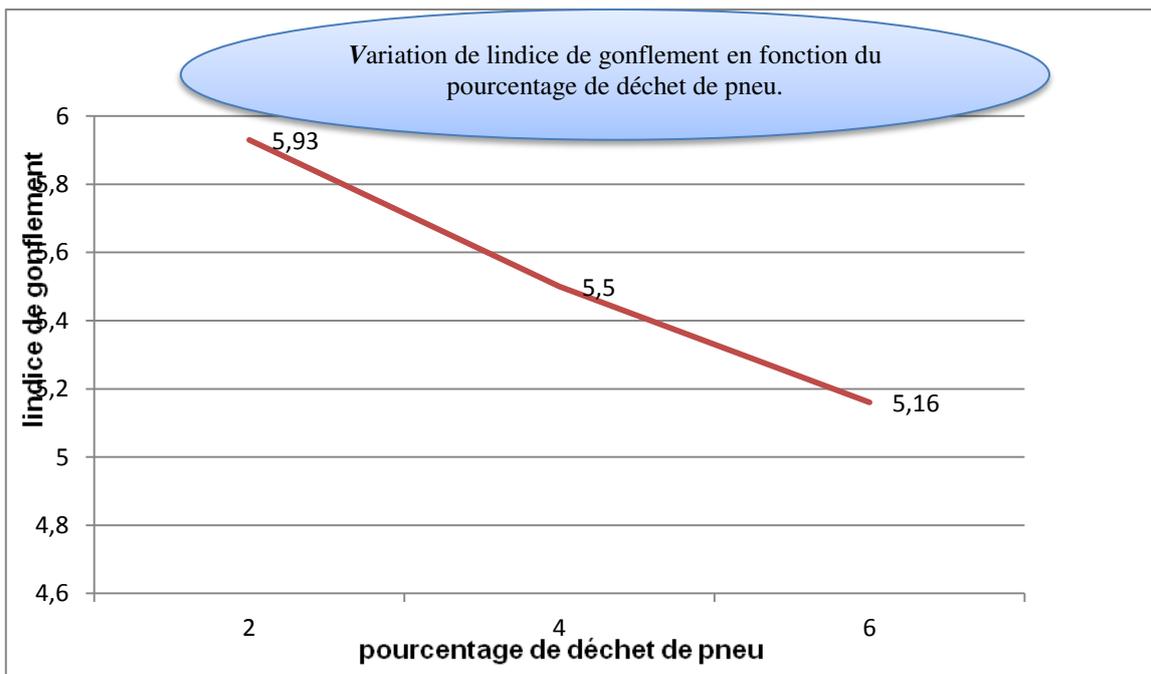
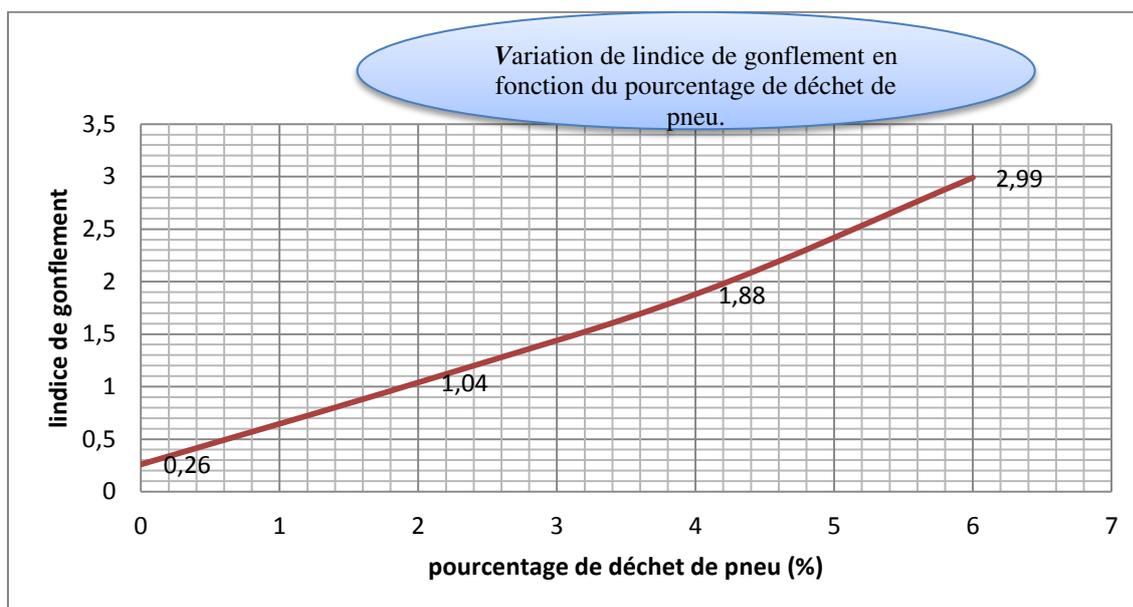


Figure III.9 variation l'indice de gonflement en fonction du pourcentage de déchet de pneu



➤ Après ajout de déchet de pneu :

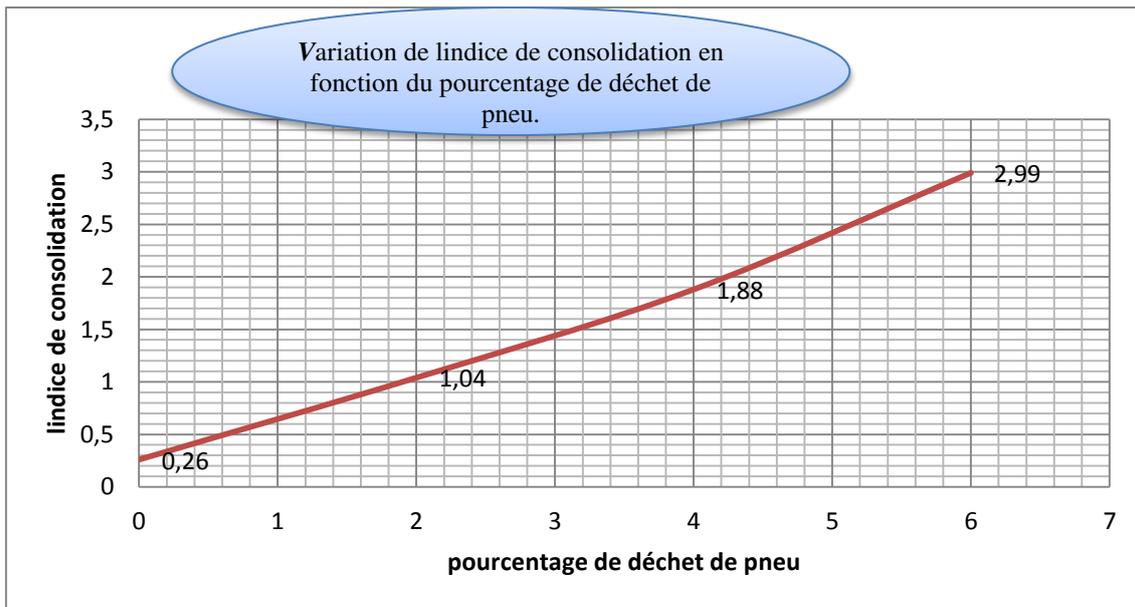


Figure III.10 variation l'indice de consolidation en fonction du pourcentage de déchet de pneu

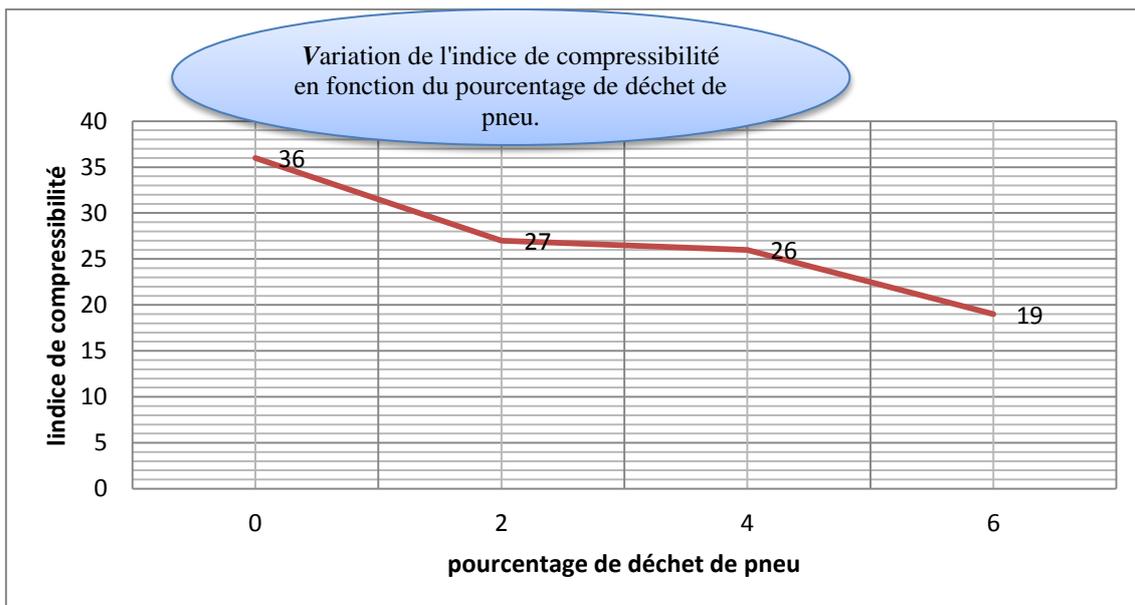


Figure III.11 variation de l'indice de compressibilité  $C_c$  en fonction du pourcentage de déchet de pneu

La classification selon l'indice de compressibilité :

Tableau III.12 Classification de sol selon l'indice de compressibilité

$C_c < 0.020$	Sol incompressible
$0.020 < C_c < 0.050$	sol très peu compressible
$0.050 < C_c < 0.100$	sol compressible
$0.100 < C_c < 0.200$	SOL MOYENNEMENT Compressible
$0.200 < C_c < 0.300$	SOL ASSEZ FORTEMENT COMPRESSIBLE
$0.300 < C_c < 0.500$	SOL TRES COMPRESSIBLE
$C_c < 0.500$	SOL Extrêmement compressible

➤ **Interprétation :**

L'essai de compressibilité à l'œdomètre a donné une diminution graduelle de l'indice de gonflement et de l'indice de compressibilité en fonction de l'augmentation de la teneur en déchet de pneus ad le passage vers un état incompressible où l'intérêt relatif de ces matériaux dans l'amélioration des caractéristiques œdométriques d'un sol argileux et une bonne stabilisation.

### **CONCLUSION GENERALE**

Plusieurs conclusions ont été tirées de ce dernier chapitre :

- A travers ces figures, nous avons constaté que les valeurs des teneurs en eau optimales augmentent et les densités sèches maximales diminuent avec l'augmentation du dosage en déchet de pneu. On remarque que la densité sèche optimale diminue et la teneur en eau optimale augmente graduellement en fonction de l'augmentation de la teneur en matériau rajouté (déchet de pneu).
- Cela est interprété par l'agglomération des particules d'argile qui provoque la visualisation des vides, donc teneur en eau optimum augmente pour les remplir, et par cela il est permis d'accroître la portance du sol en diminuant les pores.
- Les résultats de l'essai de cisaillement montre que la cohésion diminue et l'angle de frottement augmente au fur et à mesure de l'augmentation de l'ajout, ce qui permet le passage d'un état cohérent vers un état granulaire, et par la suite une augmentation de la résistance.
- L'essai de compressibilité à l'œdomètre a donné une diminution graduelle de l'indice de gonflement et de l'indice de compressibilité en fonction de l'augmentation de la teneur en déchet de pneus adèle passage vers un état incompressible où l'intérêt relatif de ces matériaux dans l'amélioration des caractéristiques œdométriques d'un sol argileux et une bonne stabilisation.
- Les déchets de pneus provoquent une irrégularité des grains d'où une augmentation de la stabilité du sol.
- La diminution de l'indice de compressibilité minimise le risque de tassement ou variation de volume ce qui est favorable en période de sécheresse ou pluvieuse.
- Aussi la diminution de l'indice de compressibilité ainsi que l'indice de gonflement minimise le désordre dans les constructions ou dans les réseaux et voiries
- Donc finalement on peut juger que cette technique de mélanger l'argile avec déchets de pneu améliore le sol et aide à éviter le déblaiement, le transport et la mise en décharge, et une bonne gestion du chantier.



## CONCLUSION GENERALE

Plusieurs conclusions ont été tirées de ce travail :

- ❖ Nous avons constaté que les valeurs des teneurs en eau optimales augmentent et les densités sèches maximales diminuent avec l'augmentation du dosage en déchet de pneu, graduellement en fonction de l'augmentation de la teneur en matériau rajouté (déchet de pneu). Cela est interprété par l'agglomération des particules d'argile qui provoque la visualisation des vides, donc teneur en eau optimum augmente pour les remplir, et par cela il est permis d'accroître la portance du sol en diminuant les pores.
- ❖ Les résultats de l'essai de cisaillement montre que la cohésion diminue et l'angle de frottement augmente au fur et à mesure de l'augmentation de l'ajout, ce qui permis le passage d'un état cohérent vers un état granulaire, et par la suite une augmentation de la résistance.
- ❖ L'essai de compressibilité à l'odomètre a donné une diminution graduelle de l'indice de gonflement et de l'indice de compressibilité en fonction de l'augmentation de la teneur en déchet de pneus cad le passage vers un état incompressible d'où l'intérêt relatif de ces matériaux dans l'amélioration des caractéristiques œdométriques d'un sol argileux et une bonne stabilisation.
- ❖ Les déchets de pneus provoquent une irrégularité des grains d'où une augmentation de la stabilité du sol.
- ❖ La diminution de l'indice de compressibilité minimise le risque de tassement ou variation de volume ce qui est favorable en période de sécheresse ou pluvieuse.
- ❖ Aussi la diminution de l'indice de compressibilité ainsi que l'indice de gonflement minimise le désordre dans les constructions ou dans les réseaux et voiries.
- ❖ Donc finalement on peut juger que cette technique de mélange argile - déchets de pneu, améliore le sol et aide à éviter le déblaiement, le transport et la mise en décharge, et une bonne gestion du chantier. Cette technique tient compte du souci écologique croissant imposant de préserver d'une part les ressources naturelles existantes en optimisant leur utilisation et de limiter d'autre part la mise en dépôt des matériaux impropres à la réutilisation en remblais ou en couches de forme et enfin le renchérissement des matériaux de substitution et des transports.



❖ En plus de l'avantage environnemental de l'approche proposée dans cette étude, la création d'une nouvelle application qui permette d'absorber une quantité de déchets de pneu.

## REFERENCES

- [1] Alaa, A., Rory, M., Delfin C., Fikret, A., Stabilization of marginal soils using recycled materials, Florida department of transportation, (2006).
- [2] Al-Akhras, N.M., Attom, M. F., Al-Akhras, K. M., Malkawi, A. I. H., Influence of fibres on swelling properties of clayey soil. *Geosynthetics International*, 15, No. 4(2008), 304–309.
- [3] Akbulut, S., Arasan, S., Kalkan, E., Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers, *Applied Clay Science* 38(2007). pp. 23–32.
- [4] Akbulut, S., Hasiloglu, A.S., Pamukcu, Data generation for shear modulus and damping ratio in reinforced sands using adaptive Journée d'Étude Scientifique et Technique sur les Produits Géosynthétiques 11 Ouargla le, 10/ 03/ 2016 neuro-fuzzy inference system. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, No. 11(2004), 805–814.
- [5] Bledzki, A. K., Gassan, J., Composites reinforced with cellulose based fibers, Elsevier, *Progress in polymer science*, volume 24, pp.221-274, 1999.
- [6] Cai, Y., Shi, B., Charles, W.W., Tang, C., Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil, *Engineering Geology*, 87(2006), pp. 230-240. Caltrans, *Asphalt rubber usage guide*. Caltrans, State of California Department of Transportation, Sacramento, CA, USA (2006), 71 pp.
- [7] Cetin, H., Fener, M., Gunaydin, O., Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as fill material. *Engineering Geology*, 88, No. 1–2 (2006), 110 – 120.
- [8] Consoli, N. C., Moraes, R. R., Festugato, L., Split tensile strength of monofilament polypropylene fiber-reinforced cemented sandy soils. *Geosynthetics International*, 18, No. 2(2011), 57–62.
- [9] Gram, H.E., Durability of natural fibres in concrete, CBI Research No. 1-83, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1983, 255p.
- [10] Hussain, F., Hojjati, M., Okamoto, M., Gorga, R.E., Review article: polymer-matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and application: an overview. *J Compos Mater* 40(2006): 1511–1565.

- [11] Ikizler, S. B., Aytékina, M., Nas, E., Laboratory study of expanded polystyrene (EPS) geofam used with expansive soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 26 (2007) 189–195.
- [12] Izawa, J., Ito, H., Saito, T., Ueno, M., Kuwano, J., Development of rational seismic design method for geogrid-reinforced soil wall combined with fibre-mixed soil-cement and its applications. *Geosynthetics International*, 16, No. 4 (2009), 286–300.
- [13] Kalkan, E., Utilization of red mud as a stabilization material for preparation of clay liners. *Engineering Geology*, 87, No. 3–4 (2006), 220–229.
- [14] Khorrami, M., Vafai, A., Khalilitabas, A. A., Desai, C. S., Ardakani, M. H., Experimental investigation on mechanical characteristics and environmental effects on rubber concrete. *Journée d'Étude Scientifique et Technique sur les Produits Géosynthétiques* 12 Ouargla le, 10/03/2016
- [15] *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 4, No. 1 (2010), 17–23.
- [16] Nilsson, L.H., Reinforcement of concrete with sisal and other vegetable fibres, Swedish Council for Building Research, Document DIY, Stockholm, Sweden, 1975, 68p.
- [17] Park, S.S., Effect of fibre reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fibre reinforced cemented sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 27, No. 2 (2009), 162–166.
- [18] Satyanarayana, B., Behavior of expansive soil treated or cushioned with sand, In *Proceedings of Second International Conference on Expansive Clay Soils*, Texas A&M University, College Station, 1969, TX, p. 308–316.
- [19] Savastano, H., Warden, Jr. P.G., Coutts, R.S.P., “Microstructure and mechanical properties of waste fibre–cement composites”. *Cement & Concrete Composites*. (2005), pp. 583–592.
- [20] Trouzine, H., Asroun, A., Long, N. T., Pneus usés et sols gonflants, *Actes du ORGAGEC'08 Third European Symposium. Organic materials for construction: Technical and environmental performances*, Paris, Marne-la-Vallée, 2008. [21] Trouzine, H., Bekhiti, M., Asroun, N., Effects of scrap tire rubber fibre on swelling behaviour of two clayey soils in Algeria, *Geosynthetics International*, 19, N°. 2 (2012), January 2012.

- [22] Viswanadham, B. V. S., Phanikumar, B.R., Mukherjee, R.V., Swellingbehavior of geofiber- reinforced expansive soil, Geotextiles and Geomembranes, doi: 10.1016 /j.geotexmem. 2008.06.002.
- [23] Viswanadham, B. V. S., Phanikumar, B.R., Mukherjee, R.V., Effect of polypropylene tape fibre reinforcement on swellingbehavior of an expansive soil. Geosynthetics International, 16 No. 5 (2009) 393–401.
- [24] Belabdelouhab F., Djidjli Z., « Recherche-Valorisation pneumatiques usagés dans laprotection de l’environnement » 19ème Congrès Français de Mécanique, Marseille, 2009.
- [25] Bonaparte R., Schmertmann G.R., Williams N.D., « Seismic design of slopesreinforcedwithgeogrids and geotextiles». In:Proceedings of the Third International ConferenceonGeotextiles, Vienna, 1986.
- [26] ETRA, The EuropeanTyreRecycling Association, <http://www.etra-eu.org/> , consulté le 20décembre 2010.
- [27] Journal officiel de la République Algérienne n°13 du 05/03/2006 & n°77 du 15/12/2001.
- [28] Long N T., Le Pneusol : recherches-réalisations-perspectives, Thèse de doctorat du LCPC,INSA Lyon, 1993.
- [29] Quang T. S., Ghazi H., De Buhan P., « Modélisation multiphasique appliquée à l’analyse destabilité d’ouvrages en sols renforcés avec prise en compte d’une condition d’adhérencesol-armatures » Studiagéotechnica et mechanica, Vol. 30, n°1-2, 2008, p. 51-56.
- [30] Trouzine H., Asroun A., Long N. T., « Pneus usés et sols gonflants» Actes Orgagec'08Organic Materials for Construction:Technical and Environmental Performances. Paris, le27, 28 et 29 Aout 2008.

## ANNEX

### TENEUR EN EAU

Echantion	I	II	III
N° Tare	P05	015	04
P.H + Tare (G)	59.69	64.57	62.57
P.S + Tare (G)	55.00	59.90	57.85
P. Tare (G)	19.24	21.12	18.88
P. Eau (G)	4.69	4.67	4.72
P. Sol Sec (G)	35.76	38.78	38.97
Teneur En Eau (%)	13.12	12.04	12.11
Ph+ Paraffine (G)	426.36	514.47	545.16
PoidsHumide (G)	420.60	508.85	540.08
Poids Paraffine (G)	5.76	5.62	5.08
P. Matériaux Dans L'eau (G)	202.05	244.05	266.88
Volume Brut (Cm <sup>3</sup> )	224.31	270.42	284.28
Volume Paraffine (Cm <sup>3</sup> )	6.55	6.39	5.77
Volume Net (Cm <sup>3</sup> )	217.76	264.03	288.51
Densité Humide (T/M <sup>3</sup> )	1.93	1.93	1.94
Teneur En Eau (%)	13.12	12.04	12.11
Densité Sèche (T/M <sup>3</sup> )			

### ANALYSE GRANULOMETRIQUE

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}}$$

Tamis (mm)	Rufut cumulés (%)	Passant (%)
1	15	97
0.4	101	80
0.2	164	67
0.01	185	63
0.08	186	63

## LIMITE D'ATTERBERG

Limite de liquidité  $w_l = w \cdot \left(\frac{N}{20}\right)^{0.121}$

Echantion	I	II	III
N° Tare	06	45	02
Poid total humide (G)	16.743	17.384	16.425
Poid total sec (G)	15.933	16.565	15.497
Poids de la tare (G)	12.941	13.580	11.937
P. Eau (G)	0.810	0.819	0.923
P. Sol Sec (G)	2.992	2.985	3.560
Teneur En Eau (%)	27.07	27.44	26.07

## CISAILLEMENT RECTILIGNE A LA BOITE

Boite de cisaillement : carrée (coté = 60mm)

Coefficient : 0.1507

Vitesse de cisaillement : 0.90 mm / mn

Echantion	I	II	III
N° Tare	03	N14	15
P.H + Tare (G)	65.20	63.53	75.89
P.S + Tare (G)	59.09	57.65	68.84
P. Tare (G)	19.56	18.86	21.11
P. Eau (G)	6.11	5.88	7.05
P. Sol Sec (G)	39.53	38.79	47.73
Teneur En Eau (%)	15.46	15.16	14.77
Poids Humide + moule (G)	290	291	291
Poids moule (G)	154.6	154.6	154.6
P. humide (G)	135.4	136.4	136.4
Volume du moule (Cm <sup>3</sup> )	72	72	72
Densité Humide (g/m <sup>3</sup> )	1.88	1.89	1.89
Densité sèche (g/m <sup>3</sup> )	1.63	1.64	1.65
S <sub>r</sub> (%)	63.36	63.72	62.63

## ESSAI PROCTOR

Teneur en eau optimale  $w_{opt} (\%) = 16.46$

Densité sèche maximale  $\gamma_{max} (t/m^3) = 2.05$

Pourcentage D'eau Ajouté	14 %		16%		18%	
Poids D'eau Ajouté (G)	280		320		360	
PoidSol Humide + Moule (G)	6.984		7.038		6.994	
Poids Du Moule (G)	5164		5164		5164	
PoidDu Sol Humide (G)	1820		1874		1830	
PoidDu Sol Sec (G)	1580.64		1609.14		1553.22	
Volume Du Moule (Cm <sup>3</sup> )	785		785		785	
Densité Séche $\gamma_d$ (T/M <sup>3</sup> )	2.01		2.05		1.98	
N°Tare	P <sub>04</sub>	07	P <sub>02</sub>	12	S <sub>70</sub>	207
Poids Sol Humide + Tare (G)	302	315	328	325	302	334
Poids Sol Sec + Tare (G)	258	280	288	286	264	289
Poids Tare (G)	48	44	48	46	40	40
Poids D'eau (G)	34	35	40	39	38	45
Poids Sol Sec (G)	220	236	240	240	220	245
Teneur En Eau W (%)	15.45	14.83	16.67	16.25	17.27	18.37

## ESSAI OEDOMERIQUE / ESSAI DE GONFLEMENT A L'ODOMETRE

Section la cellule : 38.50

MOYENNE	H-HS-M	$e = \frac{h-hs-m}{hs}$
0.0000	1.1657	1.1324
0.0000	1.1657	1.1324
0.120	1.1537	1.1208
0.0470	1.1187	1.0868
0.1200	1.0457	1.0159
0.2080	0.9571	0.9304
0.2900	0.8757	0.8507
0.2600	0.9057	0.8799
0.2190	0.9467	0.9197
0.1240	0.0417	1.0120