

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE de JIJEL



Département de Génie Civil et Hydraulique

PROJET DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du Diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Civil
Option : Géotechnique

Thème

**Etude expérimentale de sable de Sidi-Abdelaziz
Renforcés par pneumatique usagé**

Présenté par :

Benhabiles Hamza

Derraa Fateh

Encadré par :

M^r: Bezih Kamel

∞ Promotion 2016 ∞

Remerciement

Nous tenons à remercier :

En premier lieu, notre Dieu, le Tout Puissant, de nous avoir donné autant de courage, de patience et de volonté pour atteindre ce but.

Notre encadreur le docteur Bezâh Kamel, nous lui exprimons ici notre attachement et notre profonde reconnaissance de nous avoir proposé un sujet de recherche très riche puis de nous avoir laissé aller jusqu'au bout de nos idées.

Notre remerciements s'adressent ensuite aux membres du jury.

On tient à remercier nos collègues et nos amis.

Nous comptons remercier l'ensemble des personnels de l'entreprise SARL ELGHAZAL, Aïn Djasser (Wilaya de Batna) acteur de référence de la récupération et recyclage pneumatique et dérivés, et plus particulièrement à monsieur Merah Mohamed, responsable du service commerciale et relation externe qui nous à permis de répondre à toutes nos interrogations.

Nous remercierons chaque auteur son travail est cité dans la partie bibliographique de ce mémoire.

Nous n'oublierons pas non plus tous ceux qui, de près ou de loin, par leur compétence, leur aide technique et leurs conseils ont contribué à la réalisation de ce travail.

Merci

Dédicace

*Je dédie ce mémoire à ma cher mère à qui je dois tant et qui n'a cessé de me
témoigner affection, soutient et encouragement durant de longues années
d'études,*

A mes frères

Mes sœurs

Mes cousins

A toute ma famille

A mes chers amis

A mes collègues

Derraa Fateh

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes très cher parents qui ont sacrifiés les plus belle années de leur vie pour me voire un jour réussir et pour leur soutient moral et l'encouragement durant toute ma vie et au moment difficile du projet.

A mon frère

Ma sœur

Mes cousins

A toute ma famille

A mes chers amis

A mes collègues

A les vrais géotechniciens

Benhabiles hamza



Sommaire

Remerciment

Dédicace

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Introduction générale 1

CHAPITRE I : RENFORCEMENT DES SOLS ET ETAT DES CONNAISSANCES

I.1 Introduction..... 3

I.2 Différents types de renforcement de sol..... 3

I.2.1 Terre armée 3

I.2.2 Le renforcement par ancrages 5

I.2.3 Inclusions rigides..... 5

I.2.4 Renforcement des sols par clouage 6

I.2.4.1 Différentes utilisations..... 7

I.2.5 Les géosynthétiques 8

I.2.5.1 Définition..... 8

I.2.5.2 Types de géosynthétiques 8

I.2.5.3 les geosynthetiques les plus utilisés..... 9

I.2.5.3.1 Les géotextiles 10

I.2.5.3.2 Les géogrilles..... 12

I.2.5.3.3 Les géocomposites 13

I.2.6 Colonnes ballastées 14

1.2.7 Jet-grouting (injection).....	16
1.2.8 Soil mixing (<i>mélange de sol</i>)	17
1.2.8.1 Caractéristiques du soil mixing	17
1.2.8.2 Domaines d'application.....	18
1.2.8.3 Méthodes et outils.....	18
1.2.9 Pneu usages	19
1.2.9.1 Définition du pneu	19
1.2.9.2 Principaux constituants d'un pneu.....	19
1.2.9.3 Filières de valorisation.....	20
1.2.9.4 Différents types de pneumatique	21
1.2.9.5 La technique Pneusol en Algérie	23
1.2.9.6 Autres techniques de valorisation des pneus usés dans le secteur du génie civil	24
1.3 Etats des connaissances.....	25
1.4 CONCLUSION.....	34
 CHAPITRE II : ESSAIS D'IDENTIFICATION ET DE CLASSIFICATION DES SOLS	
II.1 Introduction	35
II.2. Essais d'identification.....	35
II.2.1 Essai physique.....	35
II.2.1.1 Equivalent de sable.....	35
II.2.1.2 Essai au bleu de méthylène	37

II.2.1.3 Essai teneur en eau	39
II.2.1.4 Mesure des poids volumiques et calcul des densités des sols	40
II.2.1.4.1 Méthode de l'éprouvette	41
II.2.1.4.2 Méthode de pycnomètre	41
II.2.1.4.3 Méthode de la pesée hydrostatique.....	43
II.2.1.5 Analyse granulométrique par tamisage	44
II.2.1.6 Essai Proctor.....	46
II.2.2 Essai chimique	49
II.2.2.1 Essai calcimètre.....	49
II.2.3 Essai mécanique.....	50
II.2.3.1 Essai cisaillement	50
II.2.3.2 Essai CBR (NF P 94-078).....	55
II.3 Conclusion	58

**CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE DE LA RESISTANCE
MECANIQUE DES SOLS RENFORCES PAR PNEUMATIQUE USAGES**

III.1 Introduction	59
III.2 Granulométrie des granulats de pneumatique usagé	59
III.3 Exécution de l'essai	62
III.3.1 Préparation de l'échantillon.....	62
III.3.2 Résultats et discussion	62
III.3.3 Interprétation des résultats.....	81
III.4 Conclusion.....	82

CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE DE LA CAPACITE PORTANTE DES SOLS RENFORCES PAR PNEUMATIQUE USAGE.

IV.1 Introduction	84
IV.2 Programme expérimental	84
IV.3 Etude de la portance du sol	84
IV.3.1Présentation des résultats	85
IV.3.1.1 Sable entièrement renforcé	85
IV.3.1.2 Analyse des résultats.....	91
IV.3.1.3 Sable partiellement renforcé	92
IV.3.1.3.1 Choix de nombre et le positionnement de la nappe de renforcement	92
IV.3.1.4. Vérification de la validité de pourcentage optimum dans le renforcement partiel du sol.....	97
IV.3.1.5 Discussion et interprétation des résultats.....	99
IV.4 Calcul de la capacité portante d'un sable renforcés par pneumatique usagé.....	99
IV.4.1 Résultats obtenus.....	99
IV.4. 2 Discussion et interprétation des résultats	104
IV.5 conclusion	105
Conclusion générale.....	106
Bibliographie	
Annexe	



Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Renforcement des sols et état des connaissances

Figure (I.1) : Terre armé	4
Figure (I.2): renforcement par ancrages	5
Figure (I.3): Schéma de principe de renforcement par inclusions rigides	6
Figure (I.4) : renforcement par clouage.....	8
Figure (I.5) Exemple de géocellules.....	9
Figure (I.6) Exemple de géocomposite.....	9
Figure (I.7) Les géotextiles tissés.....	11
Figure (I.8) Géogrilles mono-axiales.....	12
Figure (I.9) Géogrilles bi-axiales.....	13
Figure (I.10) : Géocomposite.....	13
Figure (I.11) : Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie humide.....	15
Figure (I.12): Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie sèche.....	16
Figure (I.13) : Coupe transversale d'un pneu.....	20
Figure (I.14) : pneus entiers.....	21
Figure (I.15) : pneus déchiquetés.....	21
Figure (I.16) : granulats.....	22
Figure (I.17) : poudrettes	22
Figure (I.18) : granulats.....	23
Figure (I.19) : Chantier expérimental Pneusol à Bou-Smail	24
Figure(I.20) : Variation de la contrainte de cisaillement avec le déplacement horizontal du sol en fonction du pourcentage de lambeau de pneu	25
Figure (I.21) : Variation de la contrainte de cisaillement avec le déplacement horizontale du sol en fonction du pourcentage de lambeau de pneu	26

Figure (I.22) : Variation de pression de contact en fonction du tassement de fondation pour un sol non renforcé et renforcé.....	28
Figure(I.23) : la plaque de charge.....	30
Figure(I.24) : Effet des puces de pneu avec le diamètre de 4 à 9 mm en BCR.....	30
Figure (I.25) : Variation des valeurs du BCR en fonction de profondeur renforcée.	31
Figure (I.26) : Chambre pour le test de modèle du sol renforcé.....	31
Figure (I.27): Variation de (BCR) et (SRF) avec le nombre de couche de renforcement du sol pour le cas de $D_r=55\%$	32

Chapitre II : Essais d'identification et de classification des sols

Figure (II.1): Agitateur mécanique.....	36
Figure(II.2) : Résultat des essais (ES).	36
Figure (II.3) : Essai au bleu de méthylène.	37
Figure (II.4) : Résultats de l'essai VBS.....	38
Figure(II.5) : Mésure poids de sable humide.....	39
Figure (II.6) : Mesure le poids de sable sache.	40
Figure (II.7):L'éprouvette.	41
Figure (II.8) : Un pycnomètre.....	41
Figure (II.9) : Mesure le poids volumique par pesé hydrostatique.	43
Figure (II.10) : Machine de tamisage.....	44
Figure (II.11) : Courbe granulométrique de sol étudié.	45
Figure (II.12): Détermination de poids humide.....	47
Figure (II.13) : préparation de l'échantillon.....	47
Figure (II.14) : Courbe de compactage.....	48
Figure (II.15) : Essai Calcimètre.....	49
Figure (II.16) : L'appareil de cisaillement à la boîte.....	51
Figure (II.17) : Cisaillement de l'échantillon.....	51

Figure (II.18) : Courbe contrainte déplacement pour $\sigma = 1$ bar.....	52
Figure (II.19) : Courbe contrainte déplacement pour $\sigma = 2$ bar.....	53
Figure (II.20) : Courbe contrainte déplacement pour $\sigma = 3$ bar.....	54
Figure (II.21) : Courbe intrinsèque.....	55
Figure (II.22) : Préparation de l'échantillon	56
Figure (II.23) : L'appareil CBR.....	57
Figure (II.24) : Contrainte-déplacement.....	57
Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatique usagés	
Figure (III.1) : Courbe granulométrique de pneu usagé.....	60
Figure (III.2) : Courbe granulométrique de pneu usagé.....	61
Figure (III.3) : Echantillon sable et granulats de pneu.....	62
Figure (III.4) : boit de cisaillement.....	62
Figure(III.5) : Courbe contrainte – déplacement (Sable non renforcé).....	64
Figure(III.6) : Courbe force – déformation pour (Sable non renforcé).....	64
Figure(III.7) : Courbe intrinsèque pour le sable non renforcé.....	64
Figure(III.8) : Courbe contrainte – déplacement (10% des granulats de pneu).....	67
Figure(III.9) : Courbe force – déformation (10% des granulats de pneu).....	67
Figure(III.10) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé (10% des granulats de pneu).....	67
Figure(III.11) : Courbe contrainte – déplacement (20% des granulats de pneu).....	70
Figure(III.12) : courbe force – déformation pour (20% des granulats de pneu).....	70
Figure(III.13) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé (20% des granulats de pneu).....	70
Figure(III.14) : Courbe contrainte – déplacement (30% des granulats de pneu).....	71
Figure(III.15) : courbe force – déformation pour (30% des granulats de pneu).....	71
Figure(III.16) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé (30% des granulats de pneu).....	71
Figure(III.17) : Courbe contrainte – déplacement (40% des granulats de pneu).....	72

Figure(III.18) : courbe force – déformation pour (40% des granulats de pneu).....	72
Figure(III.19) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé (40% des granulats de pneu).	72
Figure(III.20) : Courbe contrainte – déplacement (50% des granulats de pneu).....	73
Figure(III.21) : courbe force – déformation (50% des granulats de pneu).	73
Figure(III.22) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé (50% des granulats de pneu).	73
Figure(III.23) : Courbes contrainte-déplacement 1 bar	74
Figure(III.24) : Courbe force-déformation 1 bar	74
Figure(III.25) : Courbes contrainte-déplacement 2 bar	74
Figure(III.26) : Courbe force-déformation 2 bar	74
Figure(III.27) : Courbes contrainte-déplacement 3bar	74
Figure(III.28) : Courbe force-déformation 3 bar	74
Figure(III.29) : Courbe contrainte – déplacement (10% des granulats de pneu).....	75
Figure(III.30) : courbe force – déformation pour (10% des granulats de pneu).....	75
Figure (III. 31) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé (10% des granulats de pneu)	75
Figure(III.32) : Courbe contrainte – déplacement (20% des granulats de pneu).....	76
Figure(III.33) : courbe force – deformation (20% des granulats de pneu).	76
Figure (III. 34) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé (20% des granulats de pneu)	76
Figure(III.35) : Courbe contrainte – déplacement (30% des granulats de pneu).....	77
Figure(III.36) : courbe force – déformation pour (30% des granulats de pneu).....	77
Figure (III. 37) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé (30% des granulats de pneu)	77
Figure(III.38) : Courbe contrainte – déplacement (40% des granulats de pneu).....	78
Figure(III.39) : courbe force – déformation pour (40% des granulats de pneu).....	78
Figure (III. 40) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé (40% des granulats de pneu)	78
Figure(III.41) : Courbe contrainte – déplacement (50% des granulats de pneu).....	79
Figure(III.42) : courbe force – déformation (50% des granulats de pneu).	79

Figure (III. 43) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé (50% des granulats de pneu)	79
Figure(III.44) : Courbes contrainte-déplacement 1 bar	80
Figure(III.45) : Courbe force-déformation 1 bar	80
Figure(III.46) : Courbes contrainte-déplacement 2 bar	80
Figure(III.47) : Courbe force-déformation 2 bar	80
Figure(III.48) : Courbes contrainte-déplacement 3bar	80
Figure(III.49) : Courbe force-déformation 3 bar	80

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé.

Figure (IV.1) : courbe force-déplacement entièrement renforcé par pneu 0-4 (55 coups)	85
Figure (IV.2) : courbe contrainte-déformation entièrement renforcé par pneu 0-4 (55 coups).....	85
Figure(IV.3) : variation de l'ICBR en fonction de pourcentage de pneu 0-4 (55 coups)	86
Figure (IV.4) : courbe force-déplacement entièrement renforcé par pneu 0-4 (25 coups)	86
Figure (IV.5) : courbe contrainte-déformation entièrement renforcé par pneu 0-4 (25coups).....	86
Figure (IV.6) : variation de l'ICBR en fonction de pourcentage de pneu 0-4 (25 coups)	87
Figure (IV.7) : courbe contrainte-déformation entièrement renforcé par pneu 0-4 (11 coups).....	87
Figure (IV.8) : courbe force-déplacement entièrement renforcé par pneu 0-4 (11 coups)	87
Figure (IV.9) : variation de l'ICBR en fonction de pourcentage de pneu 0-4 (11 coups)	88
Figure (IV.10) : courbe force-déplacement entièrement renforcé par pneu 0-2 (55 coups)	88

Figure (IV.11) : courbe contrainte-déformation entièrement renforcé par pneu 0-2 (55 coups)	88
Figure(IV.12) : variation de l'ICBR en fonction de pourcentage de pneu 0-2 (55coups)	89
Figure (IV.13) : courbe force-déplacement entièrement renforcé par pneu 0-2 (25 coups)	89
Figure (IV.14) : courbe contrainte-déformation entièrement renforcé par pneu 0-2 (25 coups).....	89
Figure (IV.15) : variation de l'ICBR en fonction de pourcentage de pneu 0-2 (25coups).....	90
Figure (IV.16) : courbe force-déplacement entièrement renforcé par pneu 0-2 (11coups)	90
Figure (IV.17) : courbe contrainte-déformation entièrement renforcé par pneu 0-2 (11 coups)	90
Figure (IV.18) : variation de l'ICBR en fonction de pourcentage de pneu 0-2 (11coups)	91
Figure (IV.19) : Sol renforcé avec granulats de pneu usagé.....	92
Figure (IV.20) : courbe force-déplacement renforcement par 2 couches avec(25) coups	93
Figure (IV.21) : courbe contrainte-déformation de de renforcement par 2 couches (25coups).....	93
Figure (IV.22) : courbe force-déplacement avec Différentes positions de couche renforcée.	94
Figure (IV.23) : courbe contraint-déformation avec différentes positions de couche renforcée.	94
Figure (IV.24) : courbe force-déplacement avec différents positions de renforcement (55coups).	95
Figure (IV.25) : courbe contraint-déformation avec Différentes positions de renforcement (55coups).	95
Figure (IV.26) : courbe force-déplacement avec différents positions de renforcement (11coups).	96

Figure (IV.27) : courbe contraint-déformation avec Différentes positions de renforcement (11 coups).	96
Figure (IV.28) : courbe force-déplacement avec différentes positions de renforcement (25coups).....	96
Figure (IV.29) : contraint-déformation courbe avec Différentes positions de renforcement (25coups).	96
Figure (IV.30) : Comparaison d'I CBR entre deux diamètres de pneu Avec différentes distance (25coups).	97
Figure (IV.31) : courbe force-déplacement avec différentes pourcentages de pneu (25coups).	98
Figure (IV.32) : courbe contraint-déformation avec différentes pourcentages de pneu (25coups).....	98
Figure (IV.33) : Comparaison des résultats de l'ICBR entre le sol renforcé et non renforcé Pour diffèrent énergie de compactage.	98
Figure(IV.34): La déformation de l'échantillon (cas de la semelle filante).	100
Figure(IV.35) : La déformation de l'échantillon (cas de la semelle carrée).....	101
Figure(IV.36) : La déformation de l'échantillon (cas de la semelle circulaire).	102



Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I : Renforcement des sols et état des connaissances

Tableau (I.1) : présente la variation des deux paramètres mécanique du sol en fonction du pourcentage de lambeau de pneu	26
Tableau (I.2) : les Facteurs de sécurité inclinée obtenue de méthodes	27
Tableau (I.3): La valeur de BCR SRF pour une densité relative de 50%	29
Tableau (I.4): les valeurs de SRF pour une densité relative de 50%	29

Chapitre II : Essais d'identification et de classification des sols

Tableau (II.1) : Résultat des essais (ES) en termes d'ESV et ESP	36
Tableau (II.2) : La nature de sol.	37
Tableau (II.3) : Classification des sols en fonction des valeurs VBS	39
Tableau (II.4) : Résultats d'essai pycnomètre.	42
Tableau (II.5) : Résultats d'une analyse granulométrique par tamisage	45
Tableau (II.6) : Echelle de granulométrie selon C_u	45
Tableau (II.7) : Echelle de granulométrie selon C_c	46
Tableau(II.8) : Résultats d'essai Proctor	48
Tableau (II.9) : Classification des sols en fonction des valeurs $CaCO_3$	50
Tableau (II.10) : L'essai de cisaillement pour l'état humide de sable et $\sigma = 1\text{bar}$	52
Tableau (II.11) : L'essai de cisaillement pour l'état humide de sable et $\sigma = 2\text{bar}$	53
Tableau (II.12) : L'essai de cisaillement pour l'état humide de sable et $\sigma = 3\text{bar}$	54
Tableau (II.13) : Résultats CBR du sable	57

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatique usagés

Tableau (III.1) Résultats d'une analyse granulométrique par tamisage des granulats de pneu usagé	60
--	----

Tableau (III.2) Résultats d'une analyse granulométrique par tamisage des granulats de pneu usagé.....	61
Tableau (III.3) : Lecture de l'essai de cisaillement pour l'état humide et pour $\sigma=1$ bar ..	62
Tableau (III.4) : Lecture de l'essai de cisaillement pour l'état humide et pour $\sigma=2$ bar ..	63
Tableau(III.5) : Lecture de l'essai de cisaillement pour l'état humide et pour $\sigma=3$ bar. ..	63
Tableau(III.6) : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=1$ bar avec 10% des granulats de pneu 0-2(mm).....	65
Tableau(III.7): Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=2$ bar avec 10% des granulats de pneu 0-2(mm)	65
Tableau(III.8) : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=3$ bar avec 10% des granulats de pneu 0-2(mm).....	66
Tableau (III.9) : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=1$ bar avec 20% des granulats de pneu 0-2(mm).....	68
Tableau (III.10) : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=2$ bar avec 20% des granulats de pneu 0-2(mm).....	68
Tableau (III.11) : Lectures de l'essai de cisaillement pour $\sigma=3$ bar avec 20% des granulats de pneu 0-2(mm).	69

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé.

Tableau (IV.1) : les résultats de l'ICBR sable entièrement renforcé par pneu 0-4 (55 coups)	85
Tableau (IV.2) : les résultats de l'ICBR sable entièrement renforcé par pneu 0-4 (25 coups).....	87
Tableau (IV.3) : les résultats de l'ICBR sable entièrement renforcé par pneu 0-4 (11 coups).....	88
Tableau (IV.4) : les résultats de l'ICBR sable entièrement renforcé par pneu 0-2 (55 coups).....	89

Tableau (IV.5) : les résultats de l'ICBR sable entièrement renforcé par pneu 0-2 (25 coups).....	90
Tableau (IV.6) : les résultats de l'ICBR sable entièrement renforcé par pneu 0-2 (11 coups).....	91
Tableau (IV.7) : les résultats de l'ICBR du sable partiellement renforcé par pneu 0-4 (25coups) comparé avec l'ICBR du sable non renforcé et du sable renforcé entièrement	93
Tableau (IV.8) : les résultats de l'ICBR du sable renforcé par différent position couche de pneu diamètre 0-4 (25coups).	94
Tableau (IV.9) : les résultats de l'ICBR du sable renforcé par différent position couche de pneu diamètre 0-4 (55coups).	95
Tableau (IV.10) : les résultats de l'ICBR du sable renforcé par différent position couche de pneu diamètre 0-4 (11coups).....	96
Tableau (IV.11) : les résultats de l'ICBR du sable renforcé par différent position couche de pneu diamètre 0-2 (11coups).	97
Tableau (IV.12) : les résultats de l'ICBR du sable renforcé par pneu 0-4 pour $u=1\text{cm}$ (25 coups).....	98
Tableau (IV.13) : les résultats de la charge appliqué sur le sol renforcé et non renforcé (cas de la semelle filante).....	100
Tableau (IV.14) : les résultats de la charge appliqué sur le sol renforcé et non renforcé (cas de la semelle carrée).	101
Tableau (IV.15) : les résultats de la charge appliqué sur le sol renforcé et non renforcé (cas de la semelle circulaire).....	102
Tableau (IV.16) : les résultats de la charge appliqué sur le sol renforcé et non renforcé (cas de la semelle filante).....	103
Tableau (IV.17) : les résultats de la charge appliqué sur le sol renforcé et non renforcé (cas de la semelle carrée).	103

Tableau (IV.18) : les résultats de la charge appliqué sur le sol renforcé et non renforcé (cas de la semelle circulaire).....	104
--	-----



Résumé

Résumé

L'utilisation des pneumatiques usages comme un matériau de renforcement des sols a été développé récemment. Avec ses propriétés telles que la durabilité, flexibilité et poids léger c'est une solution intéressante pour le moment dans le domaine génie civil surtout pour les sables lâches. L'étude présente a pour objectif d'examiner l'effet des pneus superflus broyés sur la résistance au cisaillement et la portance du sable de sidi-Abdelaziz. Pour l'évaluation des paramètres de ce sol renforcé une série d'essais cisaillement à la boîte, Proctor et CBR a été conduit en jouant sur des facteurs quantitatives et géométriques. Les résultats obtenus ont montrés que le renforcement avec pneumatique pour les deux paramètres mécaniques intrinsèques et spécialement dans son optimum qui est 30% pour les deux diamètres des pneus utilisés, pour la portance de sol le pourcentage optimum des pneus est 5% et plus le nombre des nappes diminue le CBR augmente. Enfin la réutilisation de cette méthode peut nous offrir une solution attirante soit pour l'amélioration des sols soit pour la réduction du stockage des pneus usagés.

Abstract

The use of waste tyres as a material of reinforcement of soils was recently developed. With its properties such as the durability, the flexibility and the lightweight. It is an interesting solution for the moment in the domain civil engineering especially for cowardly sands. The present study aim to examine the effect of the unnecessary tires crushed on the resistance in the cutting and the bearing capacity of the sand of sisi-Abdelaziz. For the evaluation of these parameters of this reinforced ground a trial series of direct shear box, Proctor and CBR was driven by playing on factors quantitative and geometrical. The results show that the reinforcement with tyre gives remarkable results for both intrinsic mechanical parameters and especially in its optimum which is 30 % for both diameters of tyres used, for the bearing capacity of soil the optimal percentage of tires is 5 % and more the number of layers decreases the increased indication CBR. Finally the re-use of this method can offer us an attractive solution or for the improvement of grounds or for the reduction of the storage of the worn tires.

ملخص

ان استعمال إطارات العجلات كمادة تعزيز أسس استحدثت مؤخرا, لديها خصائص مثل المتانة والمرونة وخفة الوزن وهي حل مثير للاهتمام في الوقت الراهن في مجال الهندسة المدنية وخاصة بالنسبة للرمال المرتخية. وتهدف هذه الدراسة إلى فحص أثر الإطارات الممزقة الزائدة على قوة القص وتحمل الرمل. لتقييم هذه العوامل سلسلة من التجارب قد تمت و قد كان العامل المتغير هو نسبة و هندسية الطبقة المعززة. وأظهرت النتائج أن تعزيز الإطارات يعطي نتائج باهرة لكل من العوامل الميكانيكية وخاصة في الأمتل لها هو 30%, بالنسبة لتحمل التربة نسبة انخفاض عدد طبقات يزيد مؤشر التحمل و نسبة الإطارات الأمتل هو 5 % , وكلما زاد عدد من الطبقات ينخفض مؤشر التحمل. إذن استخدام هذه الطريقة يمكنه أن يقدم الحل الأمتل إما لتحسن التربة أو للحد من تخزين الإطارات المستعملة.



Introduction

générale

Introduction générale

Le stockage et l'élimination des pneumatiques usagés sont devenus des préoccupations graves pour l'environnement à travers le monde. Chaque année, des centaines de millions de pneus hors d'usage, sont générés et cumulés dans les États-Unis et de nombreux autres pays à travers le monde. Les filières classiques de valorisation des pneus usagés qui nécessitent souvent une technologie avancée, sont généralement concentrées dans les pays riches. Le développement de nouvelles filières de valorisation des pneus usagés, reste cependant toujours en grande demande partout dans le monde. Parmi les domaines de valorisation des pneus usagés, le broyage représente la voie la plus prometteuse permettant de les réduire en copeaux en vue de l'obtention de poudrettes ou de granulés. Comme telles, les poudrettes ou les granulés obtenus pourraient être utilisés comme ajouts dans les surfaces des pistes athlétiques ou de jeu, ou en combinaison avec d'autres matériaux comme les bétons, les mortiers, les enrobés et les remblais d'une part.

D'autre part, le problème de l'augmentation de la densité de la construction dans les régions urbaines où la surface constructible manque, les zones dont le sol est de mauvaise qualité sont de plus en plus recherchées. Pour ces raisons, le renforcement des sols en place demeure un secteur d'activité important dans le domaine de la géotechnique. Il vise à améliorer les qualités mécaniques du sol en augmentant sa résistance, en réduisant sa perméabilité et en contrôlant sa déformabilité. L'intérêt est alors de trouver des solutions fiables, sans danger, peu coûteuses, et rapides à mettre en œuvre. Pas seulement ça, le développement de l'activité humaine impose sur beaucoup d'ouvrages existants, une augmentation des charges appliquées et des vibrations excessives, ce qui raccourcit leurs durées de vie.

Parmi tout ça, le renforcement des sols par pneumatique peut être la solution parfaite entre les différentes techniques de renforcement par ces différents avantages soit son côté environnemental qui est un objectif exigeant, soit son côté économique et finalement son côté d'amélioration des qualités mécaniques de sol.

Ce projet de fin d'étude contient quatre chapitres plus une conclusion et il a pour intérêt de connaître l'efficacité de la méthode de renforcement des sols par pneumatique.

Le premier chapitre présente le contexte des différentes méthodes de renforcement de sol e En mettant l'accent sur la technique de renforcement par pneumatique usagés. Ce chapitre termine par une synthèse bibliographique.

On trouve au deuxième chapitre l'étude des propriétés physique, chimique et mécanique de sable utilisé dans cette étude en effectuant une série d'essais au laboratoire.

- Le troisième chapitre présente une étude expérimentale sur la résistance au cisaillement d'un sol renforcé par des pneus usagés afin de connaître l'influence de renforcement sur l'amélioration des paramètres mécaniques des sols.
- Le quatrième chapitre est contient deux parties ; la première partie traite, la portance du sol renforcé par des pneus usagés. Plusieurs paramètres ont été étudié, pour voir l'effet des pneus usagés, sur la résistance au poinçonnement du sol, et constater le bon renforcement. En deuxième partie, étude de la capacité portante du sol des fondations superficielles renforcé par pneumatique usagé fait l'objet de la deuxième partie, en utilisant trois formes de modèles réduites d'une fondation.

Enfin, une conclusion générale permet de faire une synthèse des résultats obtenus et de tirer quelques perspectives sur des suites liées à cette étude.



CHAPITRE I

Renforcement des

sols et état des

connaissances

I.1 Introduction

Le renforcement des sols regroupe un ensemble de techniques d'amélioration des propriétés mécaniques de ces sols par la mise en place d'inclusions résistants travaillant à la traction, à la compression ou à la flexion, parmi les techniques de renforcement des sols, on peut citer : la terre armée, le clouage, le texsol, pneusol, les géosynthétiques, les micros pieux, les colonnes ballastées et les colonnes en sol stabilisé. Ces techniques couvrent pratiquement tous les domaines de la géotechnique et notamment l'amélioration de la capacité portante des sols de fondation, la réduction d'amplitude des tassements, la stabilisation des pentes et des talus d'excavation, les soutènements tant en remblai qu'en déblai et plus récemment la consolidation des sols mous en mer.

La génération de pneu est toujours sur la tendance croissante partout dans le monde. Le volume croissant de pneus a incité l'intérêt dans le développement de nouvelles façons de les réutiliser. Des pneus en caoutchouc ne se décomposent pas facilement. Tandis que nuisible d'une perspective environnementale, cette propriété peut aider dans l'utilisation d'un tel matériel pour quelques demandes d'ingénierie. L'utilisation de pneu superflue devrait minimiser l'impact sur l'environnement et maximiser la conservation de ressources naturelles. Des pneus superflus ont été utilisés pour renforcer le sol doux dans la construction de route, pour stabiliser des pentes, pour remblai dans retenue de structures. En fait, les ingénieurs étudiant les propriétés physiques de mélanges de lambeau de sol ont conclu que ce mélange peut être utilisé dans beaucoup de projets d'ingénierie. En raison de ce qui précède, l'objectif d'étude est d'examiner l'influence de pneus superflus râpés ou déchiquette simplement sur le comportement de force de sols localement disponibles.

I.2 Différents types de renforcement de sol

I.2.1 Terre armée

La Terre Armée consiste à renforcer un sol granulaire par des armatures linéaires généralement métalliques, flexibles, quasi-inextensibles et de grande résistance à la traction. Le transfert des efforts entre ces deux constituants se fait par le biais du frottement mobilisé. Le matériau Terre Armée est né de l'association de deux éléments ayant des caractéristiques mécaniques différentes : d'une part, les inclusions travaillant en traction et, d'autre part, le sol pulvérulent qui ne résiste pas à la traction. (Didier fau (2010)).

Chapitre I : Renforcement des sols et état des connaissances

L'interaction entre les deux constituants du sol renforcé est un phénomène complexe qui dépend de plusieurs paramètres et notamment de la nature du sol (en particulier, l'angle de frottement interne et la dilatance), des caractéristiques mécaniques des inclusions (rigidité et résistance à la traction), de leur densité dans le massif et enfin des sollicitations appliquées.

Le comportement du matériau terre armée dépend de l'histoire du chargement et du mode de construction. Les conditions de mise en place du sol et des armatures et le compactage ont un effet significatif sur l'état initial des contraintes. (Didier fau (2010)).

Les problèmes rencontrés dans les ouvrages en terre armée sont :

- Les problèmes de stabilité d'ensemble,
- Les problèmes de stabilité interne,
- Les problèmes de drainage.

Ainsi les différents modes de rupture observés, sur modèles réduits ou sur ouvrages en vraie grandeur, sont de trois types :

- Rupture dans laquelle la masse arme ne se déforme pas. Il s'agit alors d'un grand glissement englobant le mur ou d'un poinçonnement du sol de fondation.
- Rupture dans laquelle il y a décohesion de la masse armée par glissement des armatures. Il s'agit d'une rupture par défaut d'adhérence.
- Rupture dans laquelle il y a décohesion de la masse armée par rupture des armatures. Lorsque ces dernières ne sont prises toutes sollicitées de la même manière, il y a propagation de la rupture à partir du point de la première cassure. (Didier fau (2010)).

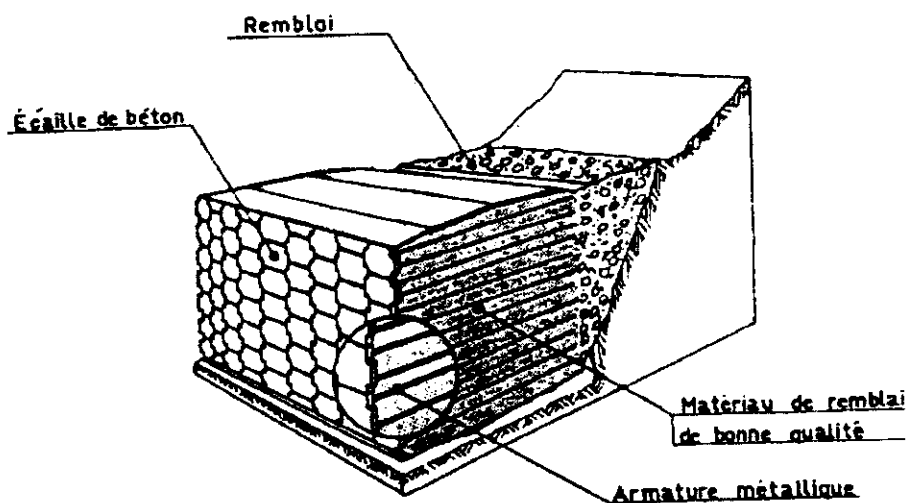


Figure (I.1) : Terre armée.

I.2.2 Le renforcement par ancrages

Il s'agit de renforcer le sol par des barres métalliques au bout desquelles sont placés des blocs d'ancrage. Le renforcement est ainsi assuré par frottement ainsi que par contre butée. Les barres ont une section ronde pour réduire la surface soumise à la corrosion et sont liées au parement composé d'écailles en béton. La figure (I-2) montre le principe de renforcement par ancrages. (Didier fau (2010)).

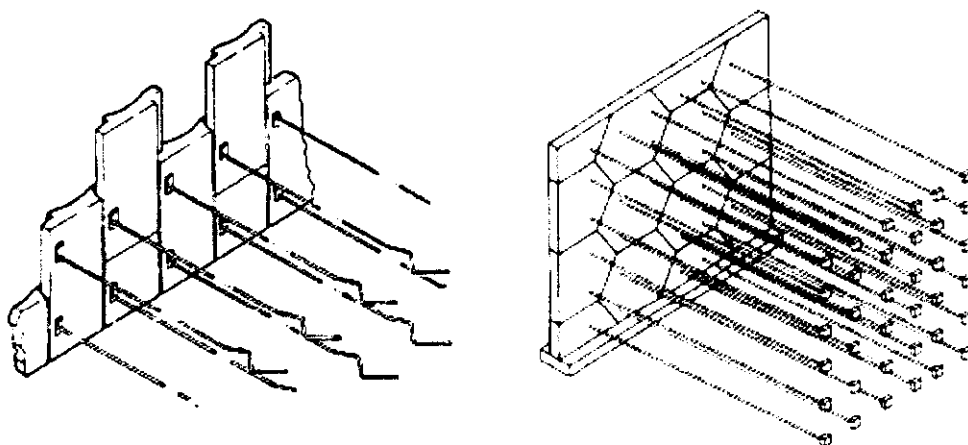


Figure (I.2) : renforcement par ancrages

I.2.3 Inclusions rigides

Le renforcement de sols compressibles par inclusions rigides est une technique développée dans les années 1970. Depuis une quinzaine d'année, cette technique est devenue courante en France afin de remplacer beaucoup d'autres techniques traditionnelles qui sont longues et coûteuses telle que le pré-chargement, le remplacement de sols, etc. Cette technique est basée sur le principe de transmission de charge à travers des inclusions vers un horizon porteur et ceci afin d'améliorer la portance du sol de mauvaise qualité et de réduire les tassements excessifs. (Mathieu Dhaybi (2015)).

Le principe de cette technique de renforcement est basé sur trois éléments principaux qui résument son fonctionnement, Figure (I.3).

Les inclusions rigides installées dans le sol compressible qui développent des efforts de frottement le long du fût de l'inclusion ainsi que des efforts en pointe. La possibilité de coiffer les inclusions par de petites dalles permet d'optimiser l'efficacité de cette technique.

- Le matelas de transfert de charge permettant d'assurer le mécanisme de répartition de charges et la transmission des efforts jusqu'aux têtes des inclusions.
- La nappe de géo synthétique permet d'augmenter les efforts pris en charge par les inclusions. Le tassement différentiel entre le sol du matelas granulaire et la tête des inclusions met cette nappe en tension, ce qui favorise l'efficacité des inclusions due au report de charge par effet membrane. (Mathieu d'Haybi (2015)).

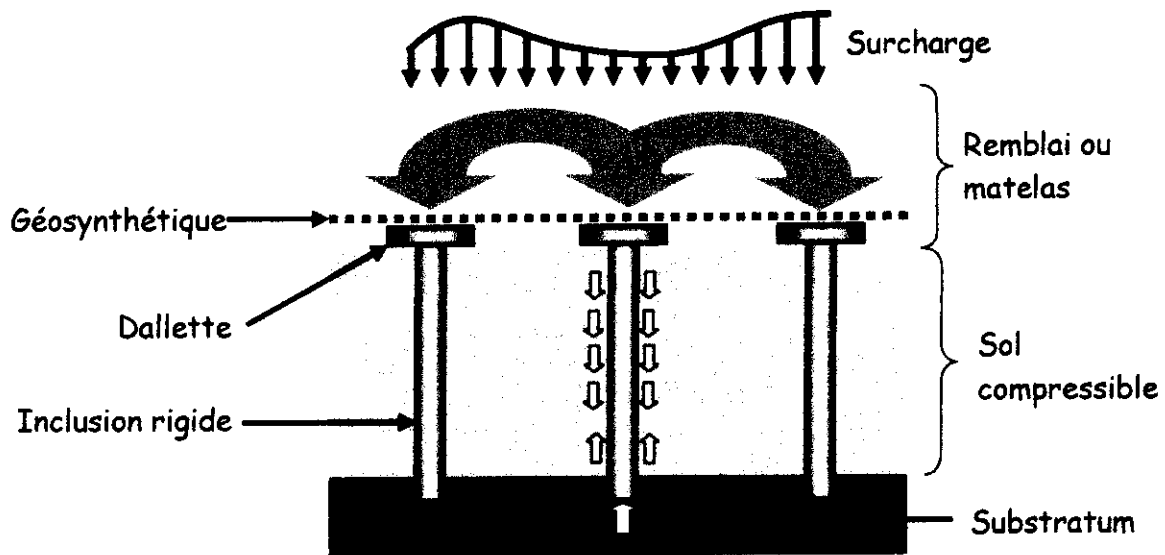


Figure (I.3) : Schéma de principe de renforcement par inclusions rigides .

I.2.4 Renforcement des sols par clouage

Le clouage des sols. C'est une technique de renforcement des sols in situ, en y installant dans le terrain à l'aide des inclusions (appelées aussi clous ou armatures), rigides et passives, éléments linéaires travaillant à la traction et au cisaillement, qui ont pour effet de limiter les déformations du sol, Ces éléments (barres, cornières, tubes, etc.) peuvent être soit mis en place par fonçage ou battage, soit mise en place dans des forages et scellés par un coulis.

Lorsque cette technique est utilisée pour des ouvrages de soutènement, les barres sont généralement horizontales et l'effort principal est la traction. Au contraire, quand cette technique est utilisée pour la stabilisation des pentes, les barres sont généralement verticales et les efforts principaux sont la flexion et le cisaillement.

Dans un massif renforcé, on qualifie d'active la zone qui se déforme et de résistante, la partie rigide. Les mouvements du sol peuvent être très faibles ou plus étendus, la zone active peut rester stable ou, au contraire, s'effondrer suivant la nature et la qualité du renforcement. Les

clous augmentent la cohésion du sol, ainsi que sa résistance à la traction et au cisaillement, et mis en place (par frottement) dans la zone résistante.

La surface qui sépare les deux parties est la surface de rupture potentielle. Le lieu géométrique des points de traction maximale T_{max} permet de séparer le massif soutenu en deux zones :

1. Une zone active située derrière le parement et où les contraintes de frottement latéral exercées par le sol sur les clous sont dirigées vers l'extérieur.
2. Une zone résistante où les contraintes de frottement latéral sont dirigées vers l'intérieur et s'opposent ainsi au déplacement latéral de la zone active.

I.2.4.1 Différentes utilisations

La technique de clouage s'emploie dans deux domaines (figure I.4).

a. Stabilisation des pentes naturelles

En règle générale, les inclusions sont presque perpendiculaires à la surface de rupture potentielle, si bien qu'elles travaillent surtout en cisaillement. Ce type de clouage est souvent utilisé en site montagneux, à titre préventif, et pour les remblais des voies ferrées (inclusions verticales). (Mathieu Dhaybi (2015)).

b. Soutènement d'excavation (pentes artificielles)

La technique de clouage peut également être utilisée pour soutenir les parois d'une fouille. Les inclusions horizontales ou très peu inclinées vers le bas sont disposées au fur et à mesure de l'excavation. Elles travaillent en traction et en cisaillement. Le soutènement de fouille par clouage peut se rencontrer hors nappe phréatique, ou après rabattement, souvent en site urbain chantiers de métro, parkings, égouts, entrées de tunnels, etc.

Le soutènement que l'on désigne par paroi clouée peut être provisoire (travaux d'assainissement), ou définitif (entrée de tunnel ou de passage souterrain). (Mathieu Dhaybi (2015)).

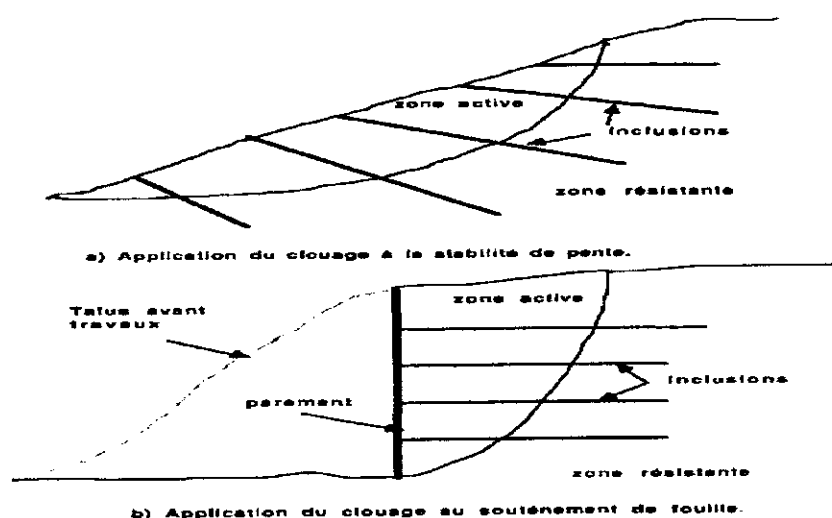


Figure (L4) : renforcement par clouage.

I.2.5 Les géosynthétiques

I.2.5.1 Définition

Les géosynthétiques sont des produits dont au moins l'un des constituants est à base de polymère synthétique ou naturel. Ils se présentent sous forme de nappe, de bande ou de structure tridimensionnelle utilisés en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil. Les géosynthétiques peuvent être produits à partir de différents polymères, polyester (PET) polyvinyle alcool (PVA), polypropylène (PP). L'avantage du (PET) est un faible allongement lié à une grande résistance à la traction (haute ténacité). L'avantage du (PVA) est un allongement extrêmement bas et une excellente résistance chimique. L'avantage du (PP) est aussi une très bonne résistance chimique avec un allongement acceptable. (Bonbouza assma (2011)).

I.2.5.2 Types de géosynthétiques :

Le type de géosynthétique dépend de l'élément constituant, la fibre et la méthode employée. On distingue les géosynthétiques à :

- Une dimension (1D) : bandelettes, filaments.
- Deux dimensions (2D) : produits plans, avec des dimensions typiques de l'ordre de 3-5m de largeur et d'environ 50-300m de long, tandis que l'épaisseur de l'ordre de quelques millimètres ;
- Trois dimensions (3D) : produits volumétrique - dans ce groupe, nous pouvons inclure principalement les géocellules (geocells), qui ont la troisième dimension (hauteur)

dans la fourchette comprise entre environ 0,1 et 0,25 m ; très souvent ils sont fabriqués à partir de bandes qui sont localement connecté et une fois étiré les cellules 3D sont créées, par exemple, sous forme de nid d'abeilles. (Bonbouza assma (2011))

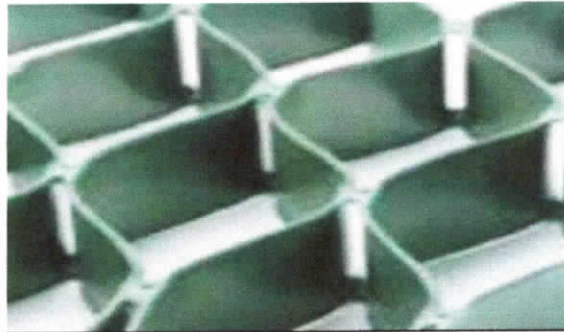


Figure (I.5) Exemple de géocellules.

Les géosynthétiques les plus utilisés sont les produits plans et parmi eux, il est possible de distinguer : les geotextiles, les géomembranes (membrane plane imperméable à partir de polymères d'épaisseur entre environ 0,5 et 3 mm), les géogrilles, les géocomposites (produits créés par la combinaison de plus d'un géosynthétique). (Bonbouza assma (2011))

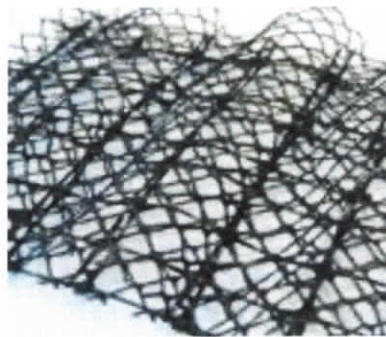


Figure (I.6) Exemple de géocomposite.

Le bon fonctionnement du renforcement exige de la part du géosynthétique, un faible allongement sous sollicitation, et un choix judicieux doit être réalisé en fonction du type de sol. Pour des sols graveleux et non cohésifs (par exemple sables et graviers), les géogrilles conviennent mieux, tandis que les géotextiles tissés et les géocomposites sont plus adaptés aux sols fins et homogènes (argiles). (Bonbouza assma (2011))

I.2.5.3 les geosynthetiques les plus utilisés

Comme mentionné au paravant, dans la pratique les géosynthétiques les plus utilisés sont les suivant :

- Les géotextiles
- Les géogrilles
- Les géocomposites

I.2.5.3.1 Les géotextiles

Les géotextiles sont des produits tissés, non tissés, ou tricotés, perméables, fabriqués à base de polymère et utilisés dans les domaines de la géotechnique et du génie civil. La fonction du géotextile dans le sol peut être la séparation, la filtration, et aussi le renforcement.

Les géotextiles tissés sont produits par entrelacement, habituellement à angle droit, de deux ou plusieurs faisceaux de fils, de filaments, de bandelettes ou autres éléments.

Les géotextiles communément appelés « membranes textiles » sont issus des différents procédés de fabrication textile, soient les technologies des non-tissés, des tissés et des tricots et de la combinaison de ces technologies. Il s'agit de milieux poreux bidimensionnels constitués de fibres et/ou de filaments polymériques, le plus souvent synthétiques.

Compte tenu de la possibilité de varier les paramètres de fabrication des produits, il est aisé de comprendre la multitude de produits potentiellement disponibles.

Cependant, pour faciliter la sélection des géotextiles et leur production donc en définitive réduire leur coût, dans la plupart des cas les manufacturiers proposent des gammes de produits standards dits de commodité, qu'ils proposent pour des applications conventionnelles. Il n'en demeure pas moins que certains adoptent une approche différente en proposant des produits spécialisés « sur mesure » répondant aux besoins spécifiques de l'application visée, définis par l'ingénieur de conception. À la base de l'ensemble de ces produits : les fibres polymériques. Elles sont le plus souvent synthétiques, constituées de polypropylène, de polyester, de polyéthylène et de polyamide. Il est alors aisé de sélectionner les dimensions des fibres les plus intéressantes (diamètre et longueur), leurs caractéristiques mécaniques (force et allongement à la rupture, etc.) et physico-chimiques (par adjonction d'additifs chimiques). Dans certains cas, des fibres naturelles tels les lins, le coco ou le jute sont utilisées, notamment lorsqu'une biodégradation est recherchée.

Il faut comprendre que les caractéristiques et performances des géotextiles sont liées à l'ensemble des caractéristiques des fibres. Sans entrer dans les détails des relations de dépendance, mentionnons que le diamètre des fibres influence principalement les propriétés hydrauliques des géotextiles (ouverture de filtration, perméabilité, transmissivité), la longueur

et les caractéristiques mécaniques des fibres influencent principalement les propriétés mécaniques des géotextiles (résistance en traction par arrachage, résistance en tension, résistance à la déchirure), tandis que la constitution polymérique des fibres influence les caractéristiques physico-chimiques des géotextiles (résistance aux rayonnement UV, inertie chimique, résistance à la chaleur, résistance bactériologique). (Bonbouza assma (2011))

a) Les géotextiles non-tissés

Les géotextiles non-tissés représentent la plus importante part du marché. On retrouve principalement trois procédés de fabrication distincts : les non tissés voie sèche aiguilletée, les non tissés « spun » aiguilletés et les non tissés « spun » thermoliés. (Bonbouza assma (2011))

b) Géotextiles tissés :

À l'opposé des non-tissés qui sont composés de fibres, les géotextiles tissés sont constitués de fils qui peuvent être de différents types : mono filament, fils multi filamentaires, fils de fibres courtes, bandelettes. Ces fils sont entrecroisés dans le plan dans deux directions perpendiculaires, le sens machine (chaîne) et le sens travers (trame), selon un patron donné (nombre de fils par cm, armure ou type d'entrecroisement) pour former une étoffe très anisotrope. (Bonbouza assma (2011))

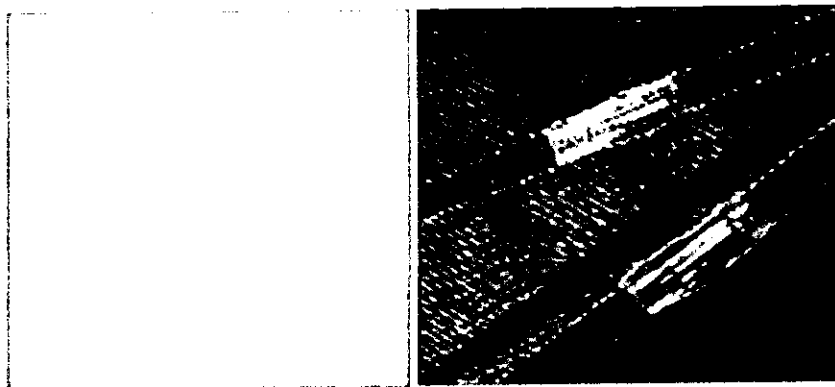


Figure (I.7) Les géotextiles tissés.

c) Les géotextiles tricotés

Traditionnellement, les géotextiles tricotés étaient uniquement ceux utilisés à la façon de bas, autour des tuyaux de drainage. Les tricots trames issus des tricoteuses circulaires semblent en effet appropriés à ce type d'application. Par contre, depuis plusieurs années et suite au développement de nouveaux métiers dit tricoteuses chaînes et la possibilité d'insérer des trames au sein des tricots, plusieurs manufacturiers ont développé une nouvelle famille de

géotextiles tricotés pour diverses applications tels le renforcement et le contrôle de l'érosion. (Bonbouza assma (2011))

I.2.5.3.2 Les géogrilles

Les géogrilles sont des géosynthétiques dont la fonction est le renforcement des sols. Une géogrille est une structure plane à base de polymère, constituée par un réseau ouvert et régulier d'éléments résistants à la traction et pouvant être assemblés par extrusion, par collage ou par entrelacement, dont les ouvertures ont des dimensions supérieures à celles des constituants et permettant le confinement du sol.

Les géogrilles sont les plus souvent utilisées pour le renforcement des sols incohérents et des corps du sol à gros grains. (Bonbouza assma (2011))

On distingue des géogrilles mono-axiales et bi-axiales :

- **Mono-axiale** la résistance à la traction est plus importante dans un sens Longitudinal ou transversal)

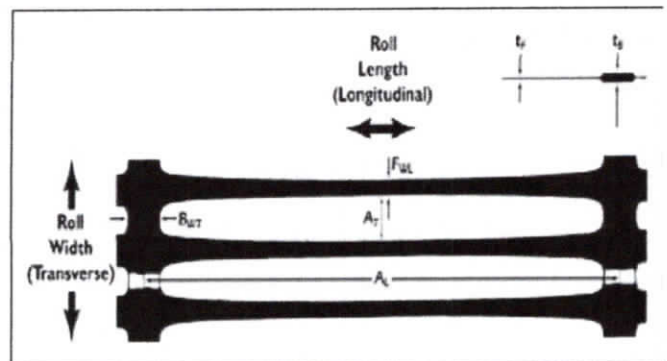
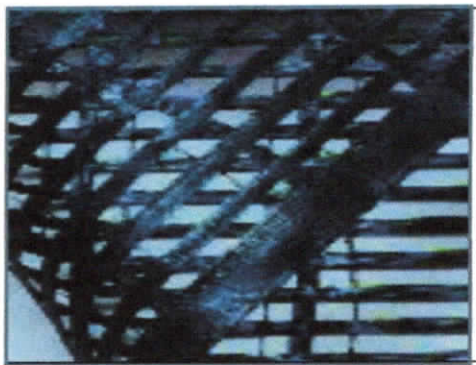


Figure (I.8) Géogrilles mono-axiales

- **Bi-axiale** la résistance à la traction est sensiblement équivalente dans le sens Longitudinal et transversal. (Bonbouza assma (2011))

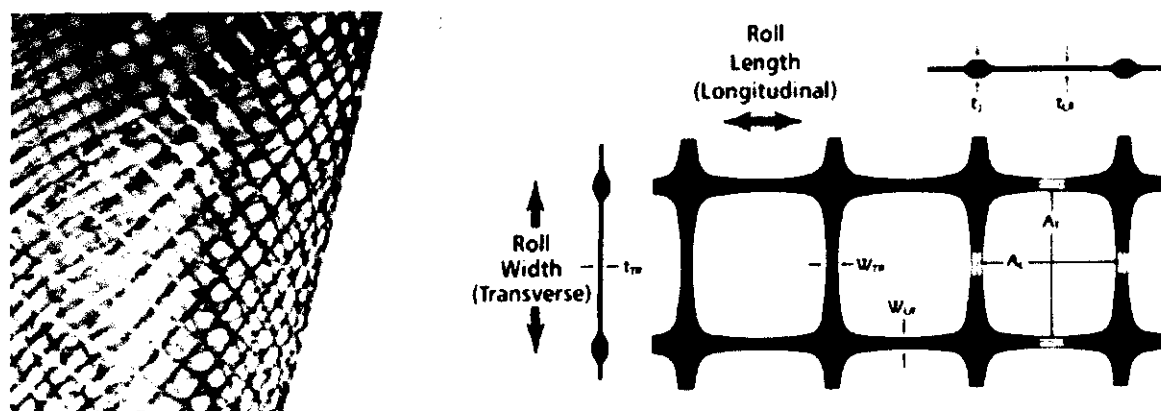


Figure (I.9) Géogrilles bi-axiales.

I.2.5.3.3 Les géocomposites

Un géocomposite est un assemblage manufacturé de matériaux dont au moins l'un des composants est un produit géosynthétique, par exemple une géogridle complexée avec un géotextile non-tissé. Il peut être utilisé, soit en géotechnique (fonctions de séparation et renforcement), soit pour les couches de roulement (fonction de renforcement, particulièrement en réfection), dans le domaine routier. Un géocomposite de renforcement apporte en une pose, les avantages du géotextile non-tissé et ce ceux d'un géosynthétique de renforcement, géotextile tissé, tricoté ou géogridle. (Bonbouza assma (2011))



Figure (I.10) : Géocomposite.

Renforcement des enrobés par des Géocomposites :

- Les matériaux constituant l'enrobé lui confèrent une faible résistance à l'allongement. Il en résulte l'apparition de fissures générant une réduction de la durée de vie de la couche de roulement et de la chaussée. (Bonbouza assma (2011))
- Dans les enrobés, l'utilisation la plus fréquente des géocomposites est le renforcement. Leur choix judicieux augmente la résistance à l'allongement et permet d'absorber une

part importante de la contrainte horizontale sur la couche d'enrobés en la répartissant de manière homogène sur une plus grande surface.

- Les géocomposites empêchent dans le même temps l'apparition de fissures et l'élargissement de celles existantes. Ceci grâce à leur capacité d'absorption des forces de cisaillement. Un composite soigneusement choisi diminue les déformations permanentes et la formation d'ornières.
- Les géocomposites permettent de renforcer les enrobés, non seulement en travaux neufs, mais aussi en entretien et réparation.
- La limitation de l'apparition et de l'élargissement des fissures augmente de ce fait la durée de vie de des chaussées. (Bonbouza assma (2011))

I.2.6 Colonnes ballastées

Les colonnes ballastées sont des colonnes constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement du sol et compactés par passes successives. Ces colonnes ne comportent aucun liant sur toute leur profondeur. Elles peuvent être réalisées en maillages réguliers ou variables, en lignes, en groupes ou même de manière isolée. Le dimensionnement tient compte du type d'ouvrage, de la nature des charges, des tassements absolus et différentiels ainsi que de la nature du sol à traiter. (Mathieu dhaybi (2015)).

Le procédé est adapté pour traiter les sols présentant des caractéristiques mécaniques faibles à très faibles (sables limoneux, argiles, limons, remblais hétérogènes...), mais il doit être exclu dans les sols présentant un caractère évolutif (matériaux organiques, tourbes...) dans lesquels l'étreinte latérale autour des colonnes n'est pas garantie à long terme. La réalisation des colonnes ballastées se fait suivant deux différentes techniques :

- **Par voie sèche** : On utilise le lançage à l'air.
- **Par voie humide** : On utilise le lançage à l'eau.

Le choix de l'outil et de la méthode de réalisation des colonnes dépend de la nature et de l'état de saturation du sol, des caractéristiques du matériau d'apport ainsi que du domaine d'utilisation du terrain renforcé. Les matériaux d'apport doivent donc être de qualité et de granulométrie contrôlée et doivent être les plus homogènes possibles (graves naturelles, roulées ou concassées). (Mathieu dhayb (2015)).

Notons que la technique des colonnes ballastées est pénalisante en termes de moyens de surface. Elle nécessite un apport de matériaux de ballaste ainsi qu'un apport d'eau, ce qui génère parallèlement, une nécessité d'emprise suffisante pour l'atelier en surface. (Mathieu Dhaybi (2015)).

a) Colonnes ballastées par voie humide

La réalisation des colonnes par voie humide consiste à saturer le sol dans la zone du renforcement et à faire descendre un outil vibreur. La saturation du sol ainsi que les vibrations générées provoquent un phénomène local et temporaire de liquéfaction du sol. Cela permet à l'outil de s'enfoncer dans le sol sous l'effet de son poids propre. Lorsque la profondeur de traitement requise est atteinte, le lançage à eau est réduit, de telle façon que l'espace annulaire autour du vibreur et ses extensions reste ouvert grâce à la pression hydrostatique. Les matériaux d'apport sont alors introduits dans le trou pendant que l'alimentation permanente en eau assure que les matériaux atteignent bien la base du vibreur et que les particules fines du sol en place sont bien évacuées à l'extérieur du trou.

En remontant et en redescendant le vibreur de façon contrôlée par passes successives jusqu'à la surface, le matériau d'apport est expansé et compacté dans le sol en place pour former la colonne ballastée. (Mathieu Dhaybi (2015)).

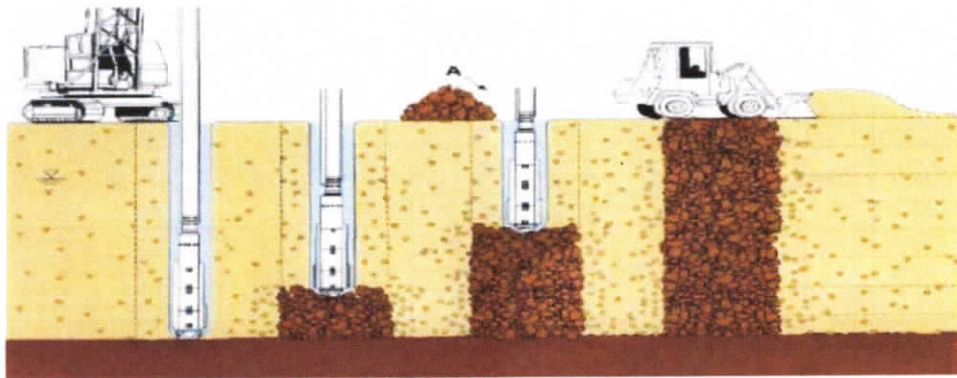


Figure (I.11) : Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie humide

b) Colonnes ballastées par voie sèche

Dans le cas de la réalisation des colonnes par voie sèche, l'air comprimé permet de maintenir un flux continu de matériau jusqu'à l'orifice de sortie. Le vibreur descend, en refoulant latéralement le sol, jusqu'à la profondeur prévue, grâce à l'insufflation d'air comprimé et à la

poussée sur l'outil. Lorsque la profondeur finale est atteinte, le vibreur est légèrement remonté et le matériau d'apport se met en place dans l'espace ainsi formé.

Le vibreur redescend pour expansé le matériau latéralement dans le sol et le compacter. La colonne est exécutée ainsi, par passes successives, jusqu'au niveau prévu. (Mathieu Dhaybi (2015)).

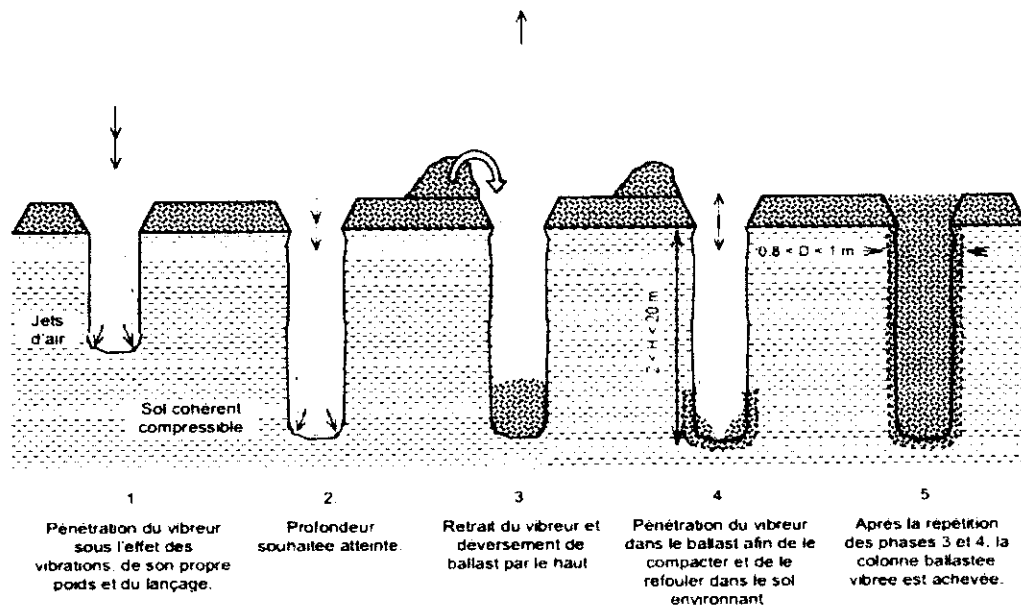


Figure (I.12) : Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie sèche.

I.2.7 Jet-grouting (injection)

Le traitement des sols par jet-grouting est une technique de renforcement de sol qui est née dans les années 50 au Royaume-Uni. La présence d'un substratum très profond rend l'ancrage des fondations difficile et coûteux. Il s'agit donc d'un procédé de mélange hydrodynamique permettant de former un béton de sol et d'ancrer les fondations dans la couche superficielle qui surplombe le substratum et qui a, en général, de moins bonnes caractéristiques mécaniques.

Afin d'appliquer la technique du jet grouting, il faut faire appel à trois phénomènes physiques:

- La déstructuration du terrain en profondeur en utilisant un jet rotatif à haute pression et à très grande vitesse dans le forage.
- L'extraction d'une partie du terrain vers la surface par des fluides de jetting.

L'incorporation d'un liant apporté par le coulis permettant d'obtenir en profondeur une structure de renforcement ayant des caractéristiques mécaniques supérieures à celles du sol en place. (Mathieu Dhaybi (2015)).

En premier lieu, il est nécessaire de réaliser un forage de 100 à 200 mm de diamètre sur la hauteur à traiter. Ce forage permet à l'outil d'injection (moniteur) d'arriver à la profondeur déterminée au préalable. La mise en rotation de l'outil vient en deuxième lieu en diffusant le coulis à une très haute pression (plusieurs dizaines de MPa). La remontée progressive du moniteur permet le traitement du sol sur la hauteur désirée en créant des colonnes de sol traité. Un excès du mélange sol-ciment doit nécessairement être évacué pendant la montée de l'outil afin d'éviter de créer un désordre au voisinage de la structure. Le résultat final dépend de plusieurs paramètres reliés non seulement aux caractéristiques mécaniques du sol traité mais aussi du protocole du grouting, du dosage en ciment ainsi que du type de liant utilisé. (Mathieu Dhaybi (2015)).

I.2.8 Soil mixing (mélange de sol)

Créée dans les pays scandinaves et au Japon pendant les années soixante, la technique de soil mixing est utilisée comme une méthode de traitement de sol permettant d'améliorer ses caractéristiques mécaniques et environnementales. Il s'agit de mélanger mécaniquement le sol sur place avec un liant hydraulique en utilisant un outil approprié. Cette méthode de renforcement de sol présente de nombreux avantages qui font qu'elle est en plein essor depuis le début années 1990. En effet, cette technique ne nécessite pas d'avoir à gérer de déblais et de mise en décharge, ce qui la rend plus économique et écologique.

De plus, cette technique est polyvalente, vu qu'elle peut être utilisée pour la stabilisation des pentes, la réalisation de parois étanches ainsi que le renforcement des terrains. (Mathieu Dhaybi (2015)).

I.2.8.1 Caractéristiques du soil mixing

Dans son état de l'art, Probaha (1998) présente les différentes caractéristiques du soil mixing qui constituent des atouts pour que cette méthode de renforcement prenne le dessus sur beaucoup d'autres conventionnelles. Parmi ses avantages, on peut citer :

- La rapidité de la construction des structures de renforcement,
- La possibilité de calibration des caractéristiques mécaniques du renforcement en

contrôlant le dosage en ciment et en le choisissant d'une manière à ce qu'il convienne aux exigences des projets,

- La fiabilité et la précision au niveau des outils de soil mixing permettent de créer des éléments ayant des formes géométriques maîtrisables et homogènes,
- La variabilité des domaines d'application du soil mixing allant du renforcement des structures jusqu'au traitement des sols pollués, rend cette technique très attractive,
- L'utilisation efficace des ressources est un atout majeur de cette technique. Le soil mixing permet l'utilisation du sol existant sur place sans avoir recours au transport des matériaux granulaires.
- La technique de soil mixing est considérée comme écologique. Elle produit peu de déblais, de faible nuisance sonore en comparaison avec beaucoup d'autres

techniques de renforcement, ainsi que peu de vibration. (Mathieu Dhaybi (2015)).

I.2.8.2 Domaines d'application

L'utilisation de la technique de soil-mixing connaît globalement deux champs d'applications principaux :

1. Le soil-mixing de surface, ou Shallow Soil-Mixing (SSM), consiste en la création d'une couche de forme pour les routes ou les plateformes d'aéroport. Le procédé diminue la plasticité générale du sol et facilite le compactage des engins de chantier.
2. Le soil mixing profond ou « Deep soil mixing », consiste à créer des éléments de soil mixing en profondeur sans aucun remaniement de matériaux après avoir été mis en place (maturation et durcissement du mélange in-situ).

Dans le cadre de notre étude on s'intéresse plutôt au « deep mixing », dont l'utilisation est assez variée. Cette technique peut être considérée comme un bon moyen pour renforcer les fondations, stabiliser les pentes, confiner des sols pollués, etc. (Mathieu Dhaybi (2015)).

I.2.8.3 Méthodes et outils

La méthode de soil mixing consiste à créer un mélange de sol, d'eau et d'un liant afin d'obtenir un matériau pouvant durcir dans le temps et monter en caractéristiques mécaniques. Lorsque la teneur en eau sur place est supérieure à la limite de plasticité du sol, le liant hydraulique est injecté par voie sèche sans apport d'eau. Cependant, lorsque la teneur en eau naturelle du sol est inférieure à la limite de plasticité du sol, il y aura une injection de coulis contenant un mélange d'eau et de liant. Topolnicki (2004) présente dans son étude une

classification des différentes méthodes de soil mixing in situ. Solétanche Bachy a développé un outil permettant de renforcer les fondations existantes par soil mixing. Il s'agit de l'outil springsol qui est repliable et qui peut être introduit dans un tubage de faible diamètre et qui se déplie dès qu'il dépasse la zone superficielle requise (radier, ballast, etc.). Le renforcement se fait suivant les démarches suivantes :

- Choix de la zone à renforcer et la mise en place de l'outil,
- Mise en rotation de l'outil suivie par son enfoncement dans le sol jusqu'à une profondeur prédéfinie en déstructurant le sol à renforcer.
- Une fois l'outil arrivé à la bonne profondeur, les bras de l'outil s'ouvrent pour que son diamètre passe de 12 cm à 40 cm ou 60 cm suivant le type de l'outil.
- La remontée de l'outil sera accompagnée par l'injection d'un liant hydraulique.
L'injection peut se faire par voie sèche ou humide suivant l'état hydrique du sol traitée et la position de la nappe phréatique.

L'injection du coulis et la rotation de l'outil permettent de mélanger le sol sur place avec le liant. En remontant l'outil, cette technique assure la création d'une colonne de soil mixing qui, après durcissement, aura des caractéristiques mécaniques largement supérieures à celles du sol sur place. (Mathieu Dhaybi (2015)).

I.2.9 Pneu usages

I.2.9.1 Définition du pneu

Il convient de distinguer les pneus usagés (PU) et les pneus usagés non rechapé (PUNR). C'est ces derniers qui sont effectivement des déchets. En effet un pneu usagé et surtout celui du poids lourd, peut avoir une deuxième voir une troisième vie après rechapage. Des traces de vieillissement, peuvent apparaître sur les PUNR telles que l'usure de la bande de roulement, des craquelures ou des fissures. (Aoudai karima (2014)).

I.2.9.2 Principaux constituants d'un pneu

Si on effectue une coupe, d'un pneumatique de type radial, dans le sens transversal (Figure 1), sa complexité, par le nombre de constituants, apparaît avec beaucoup de netteté, on distingue alors :

- Une feuille d'un caoutchouc synthétique ;

- La nappe carcasse ;
- Un bourrage zone basse ;
- Les tringles ;
- Les flancs ;
- Les nappes sommets ;
- La bande de roulement.



Figure (I.13) : Coupe transversale d'un pneu.

Il reste ensuite à réaliser les sculptures et à vulcaniser l'ensemble pour rendre cet assemblage parfaitement solidaire. (Aoudai karima (2014)).

I.2.9.3 Filières de valorisation

Le cheminement des pneus usagés est organisé comme suit : Après le démontage des pneus usagés, ils sont stockés par les garagistes puis collectés par les collecteurs qui trient les pneus pour sélectionner les pneus pouvant être réutilisés ou faire l'objet d'un rechapage. Les pneus usagés non réutilisables sont, soit stockés entiers ou déchiquetés ou broyés. La valorisation des pneus usagés, peut se présenter sous l'une des formes suivantes :

a. La valorisation énergétique

Le pneumatique, de par son origine polymérique, a un excellent pouvoir calorifique (3 tonnes de pneus = 2 tonnes de fuel) Sa composition homogène en fait par ailleurs un combustible de substitution stable. La valorisation énergétique, est cependant limitée en France où 18 % des pneus usagés sont valorisés, contre 63 % au Japon, 44 % en Allemagne et 29 % en Grande-Bretagne. Elle repose de surcroît, quasi essentiellement, sur les cimenteries. Le recours à des installations dédiées, étant très faible. (Aoudai karima (2014)).

En Algérie, le problème reste posé puisque la réglementation n'est pas encore claire sur la

valorisation énergétique. Les cimenteries algériennes préfèrent utiliser du gaz naturel qui est nettement moins coûteux que les pneus usés déchiquetés.

b. La valorisation sous forme de matières premières

Les pneumatiques usagés peuvent être broyés en poudrettes ou en granulés de caoutchouc. Ces produits sont utilisés en combinaison avec d'autres matériaux. (Aoudai karima (2014)).

I.2.9.4 Différents types de pneumatique

a. Pneu entiers

Le pneumatique usagé entier peut être utilisé dans les applications suivantes : remblais de route, ouvrages de soutènement, murs antibruit ... L'une des techniques employées est le procédé "pneusol", qui consiste à supposer des couches de pneus de poids lourds reliés entre sol, de répartir les contraintes, d'absorber les vibrations et d'amortir les chocs. (Aoudai karima (2014)).



Pneus entiers

Figure (I.14) : pneus entiers

c. Pneus découpés

La bande de roulement peut être utilisée comme tapis support de voie ferrée pour réduire les bruits et les vibrations. (Aoudai karima (2014)).



Pneus déchiquetés
Dimension ≈ 50 mm

Figure (I.15) : pneus déchiquetés.

d. Pneus déchiquetés

Durant le déchiquetage les pneus sont broyés en petits morceaux. Le déchiquetage permet de diminuer d'avantage la dimension des morceaux de caoutchouc obtenus par le premier déchiquetage afin d'ajuster précisément la granulométrie de la poudrette. Les deux technologies ambiantes les plus performantes pour effectuer un déchiquetage sont le déchiquetage à température ambiante et le déchiquetage par cryogénie. Ces produits sont utilisés en combinaison avec d'autres matériaux. (Aoudai karima (2014)).

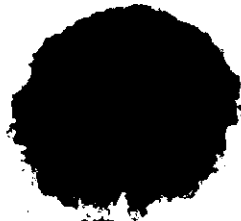


Granulats 0,5/2 mm

Figure (I.16) : granulats.

e. 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. Les poudrettes sont utilisées comme charges dans des mélanges servant à produire des pièces, ne subissant pas de contraintes mécaniques ou dynamiques élevées. Exemple d'utilisation, la modification des revêtements routiers (diminution du bruit et de l'aquaplaning du fait d'un drainage en surface) ...etc. (Aoudai karima (2014)).



Poudrettes 0,5 mm

Figure (I.17) : poudrettes

e. 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 antidérapants, les revêtements pour terrains de sport (surfaces souples, diminution des nuisances sonores...). (Aoudai karima (2014))



Granulats 7/15 mm

Figure (I.18) : granulats.

1.2.9.5 La technique Pneusol en Algérie

Le Pneusol est formé par l'association de pneus usagés non rechapés (poids lourds ou tourisme) entiers, partiellement découpés (enlèvement d'un flanc), ou totalement découpés (deux flancs et une bande de roulement) et de sols pulvérulents, cohérents ou déchets.

Les éléments de pneus, sont utilisés comme renforts du massif de sol.

Les bandes de roulement ou les flancs, sont découpés et associés en nappe par des attaches.

Ces bandes peuvent être posées sur chant ou aplaties.

Dans le cas de l'emploi des flancs, ceux-ci sont posés à plat. Cette technique développée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris par Dr Nguyen Thanh LONG ingénieur du LCPC de Paris, est largement diffusée depuis 1982. Les différentes applications concernent des ouvrages de soutènement, des ouvrages réducteurs de poussées ou de charges, des murs anti-bruit, des ouvrages de protection des berges et des pentes et talus.

L'avantage essentiel de ce type d'ouvrage, outre ses performances techniques, est essentiellement sa simplicité d'exécution et l'adaptabilité des ouvrages au relief et à la déformabilité du terrain. (Aissa asroun (2011)).

Plus de 2000 ouvrages valorisant les pneus, selon les différentes techniques, sont connus dans le monde, en Algérie, au Canada, aux Etats-Unis et en France. Plus de 12 ouvrages Pneusol Anti Marston, sont réalisés en Algérie en 1986. Le premier chantier expérimental algérien de la technique Pneusol, était les travaux de stabilisation d'un talus de remblai d'une hauteur de 5 m environ avec une largeur de 50 m (soit environ 3500 pneus poids lourds utilisés) au niveau d'un ouvrage courant OC 1-1 du projet de contournement de Bou –Smail. L'étude du projet expérimental, assortie d'une note de calcul, a été confiée à l'Organisme National de Control Technique des travaux Publics (CTTP) avec l'étroite collaboration des experts de l'Ecole Nationale des Travaux Publics (ENTP). (Aoudai karima (2014)).



Figure (I.19) : Chantier expérimental Pneusol à Bou-Smail

I.2.9.6 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. L'utilisation du TDA en Génie Civil, fait l'objet de la norme ASTM6270-98.
- La technique Tires balle, 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. (Aissa asroun (2011)).

I.3 Etats des connaissances

Vinot et al. (2009) ont utilisé deux types du sol : un limon et un sable qui sont mélangé avec les lambeaux des pneus, afin de calculer la teneur en eau optimum et la densité maximum sèche. Dans le cas du sable mélangé avec lambeaux des pneus, la densité sèche maximale et minimale a été déterminée en utilisant des tests vibratoires en variant le contenu de lambeau de 0 à 100 par le pas de 10%. En suite, Ils ont effectué deux essais de consolidation et de cisaillement pour examiner la force de cisaillement des mélanges des lambeaux des pneus de 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, et 50% avec le sable. Ils ont remarqué que pour les résultats de l'essai Proctor, et pour les deux types du sol (le limon ou le sable), il y a une diminution de la teneur en eau optimum et la densité sèche maximum avec l'augmentation de la quantité de lambeau de pneu. Ainsi que, ils ont constaté que l'augmentation de contenue des lambeaux de pneu donne une amélioration de la capacité portante après sept jour de consolidation du sol. Ils ont montré une amélioration de la résistance au cisaillement du sol dans le cas du sable par un contenu de lambeau de pneu de 30% (voir figure I.19). (Vinot et al. 2009).

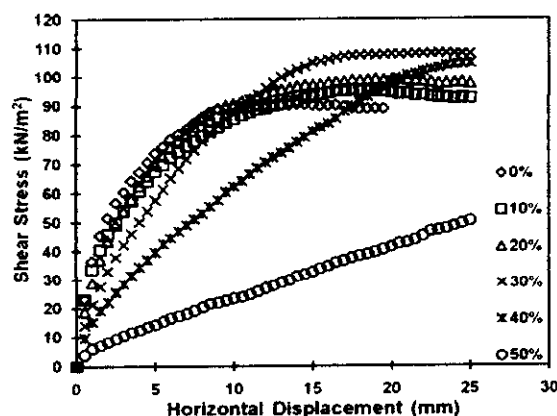


Figure (I.20) : Variation de la contrainte de cisaillement avec le déplacement horizontal du sol en fonction du pourcentage de lambeau de pneu (Vinot et al. 2009).

Chapitre I : Renforcement des sols et état des connaissances

D'autre part, des études sur le renforcement du sol par des pneus creux aplatis ont été présentées par Vinot et al. (2012). Ils ont utilisé des essais de cisaillement à la boîte sur un sable avec l'ajout des pneus creux aplatis de 10 x 20 mm. Les lambeaux de pneu ont été uniformément mélangés avec le sable dans des pourcentages diverses de 0% à 100 % par le poids de sable par un pas de 10 % pour calculer la force de cisaillement des mélanges. Les mélanges ont été rendus compacts dans la boîte de cisaillement afin d'obtenir la densité sèche maximale correspondante. Les tests de la boîte de cisaillement ont été effectués avec un déplacement de 0.5mm/min sous toutes les cinq forces normales de 25,50, 75, 100 et 125 kN/m². Les résultats de la figure (I.20) ont montré que le contenu 30% de lambeau de pneu donne une résistance au cisaillement du sol maximal. Par conséquent, c'est le contenu optimum de lambeau de pneu qui donne une résistance maximale au cisaillement. (Vinot et al. (2012)).

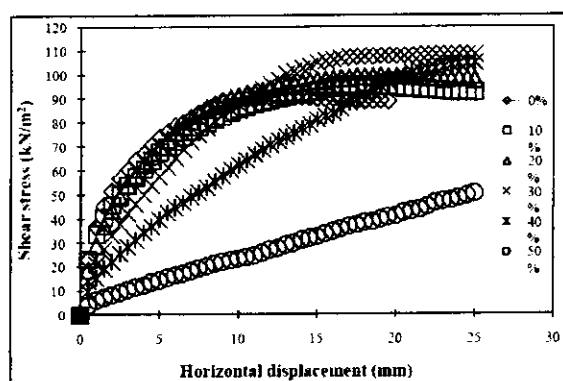


Figure (I.21) : Variation de la contrainte de cisaillement avec le déplacement horizontale du sol en fonction du pourcentage de lambeau de pneu (Vinot et al. (2012)).

Tableau (I.1) présente la variation des deux paramètres mécaniques du sol en fonction du pourcentage de lambeau de pneu (Vinot et al. (2012)).

Pourcentage de pneu	Les paramètres	
	c' (kPa)	Φ' (°)
0	12,1	36,6
10	5,8	41,3
20	7,2	42,7
30	19,7	40,7
40	27	28,5
50	36	8

Chapitre I : Renforcement des sols et état des connaissances

Le contenu 30% de pneu donne une amélioration maximale des deux paramètres mécaniques (*c'* et Φ') et *par* conséquence, c'est le contenu optimum qui donne une résistance maximale au cisaillement. (Vinot et al. (2012)).

L'étude de stabilité d'un talus renforcé par des pneus déchiquette donne un coefficient de sécurité maximal par un contenu de lambeau de 30% par les trois méthodes comme il à t montré dans le trableau (I.2) suivant :

Tableau (I.2) : Facteurs de sécurité inclinée obtenue par différent de méthodes (Vinot et al. (2012)).

Pourcentages de pneu	méthode de Bishop simplifie	Méthode de Janbu simplifie	Méthode de Morgenstern
0	1,677	1,589	1,673
10	1,792	1,695	1,787
20	2.190	2.070	2.185
30	2.926	2.772	2.922
40	2.495	2.370	2.491
50	2,477	2,351	2,473

Moghaddas Tafreshi et al. (2012), ont effectué environ cinquante et un (51) tests différents pour examiner l'effet du contenu en caoutchouc (hrs/B) dans le sol renforcé par caoutchouc et aussi l'épaisseur de sol sans renforcement sur la réponse de la fondation carré. Le model de test est composé de trois couche, la première couche non renforcée, la deuxième couche est renforcée par des lambeaux de pneu mélangé avec le sable et pour différent pourcentage de 2.5 %, 5 % et de 7.5 %. Comparés au volume total de couche de mélange, et la troisième couche non renforcé de base (avec l'augmentation de la couche renforcé jusqu'à la première couche égal à 0, par rapport a la base d'appui B de la fondation). Ils ont observé que pour le pourcentage de lambeau de pneu de 0 à 5%, il y a une augmentation dans la valeur de CBR avec les variations du rapport (hrs/B). Au-delà de cette valeur le rapport de la capacité portante diminue (figure I.21 a,b et c). (Moghaddas Tafreshi et al. 2012).

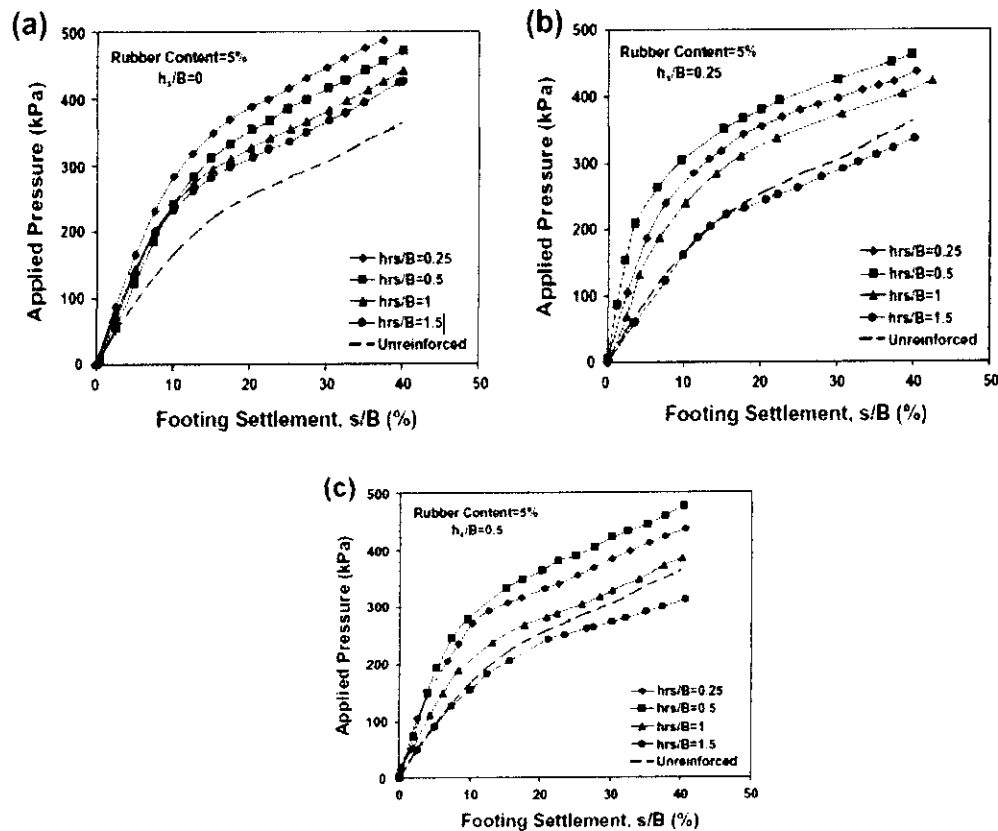


Figure (I.22) : Variation de pression de contact en fonction du tassement de fondation pour un sol non renforcé et renforcé. (Moghaddas Tafreshi et al. 2012).

Moghaddas et al. (2012) ont déduit que, le pourcentage optimum de pneu-sol est autour de 5 % du volume total de mélange. La profondeur optimale de couche de sol au dessous de l'appui (c'est-à-dire l'épaisseur de la couche de sol sur le mélange) est obtenue environ 0.25 fois la largeur d'appui ($h_s/B = 0.25$) qui résulte la meilleure performance dans l'augmentation de la capacité portante de la fondation superficielle. Donc, ils ont conclu que l'épaisseur optimale de la couche de sol renforcée par caoutchouc à fin d'avoir une augmentation maximale de la capacité portant de la fondation du sol est de 0.5 fois de la largeur de cette fondation.

Récemment, Sanjeev et al. (2013) ont appliqué une charge statique sur une fondation rectangulaire de largeur B , l'échantillon de sol de 10 cm de profondeur est constitué par deux couche ; la première couche de sol est de hauteur (H_1) renforcée par des fibres de pneu et la deuxième couche de sol non renforcée de hauteur (H_2). Ils ont varié la hauteur (H_1) entre 0.5 à 2.0 B . Les fibres de pneu ont été mélangés avec le sable avec des pourcentages différentes de 0.25 %, 0.50 %, 0.75 % et 1.0 % par rapport au poids du sable et jusqu'aux profondeurs différentes de 0.5 B , 1.0 B , 1.5 B et 2.0 B . Chaque couche a été compactée à une épaisseur

Chapitre I : Renforcement des sols et état des connaissances

indiquée pour réaliser la densité relative désirée de 60 %. Ils ont effectué environ dix sept tests pour déterminer le BCR et le Facteur de Réduction de Tassement (SRF), à partir d'un système de fondation superficielle qui se reposant sur un sol non renforcé et renforcé avec le contenu de fibre de pneu différent. Ils ont obtenu les résultats indiqués sur les tableaux (I.2) et (I.3) suivants :

Tableau (I.3) : La valeur de BCR pour une densité relative de 50%.

% de pneu	0.25%	0.50%	0.75%	1.0%
0.5B	1.21	1.29	1.43	1.35
1B	1.26	1.32	1.44	1.38
1.5B	1.29	1.38	1.53	1.46
2B	1.24	1.34	1.47	1.43

Tableau (I.4) : les valeurs de SRF pour une densité relative de 50%

% de pneu	0.25%	0.50%	0.75%	1.0%
0.5B	0.62	0.59	0.5	0.53
1.0B	0.61	0.54	0.45	0.52
1.5B	0.57	0.52	0.43	0.45
2.0B	0.6	0.52	0.47	0.43

Ces études ont montré que la quantité des fibres de pneu de 0,75% est le pourcentage optimum ajouté dans le sol qui donne un rapport de la capacité portante (BCR) maximale et un facteur de réduction de tassement (SRF) minimal, donc il y a une amélioration de la capacité portante et une diminution dans le tassement de sol.

D'autre part, le renforcement à une profondeur de 1,5B (B est la base d'appui de la fondation), est la profondeur optimum qui donne un rapport de la capacité portante (BCR) maximale et un facteur de réduction de tassement SRF minimal.

Mahmood Anvari et al. (2014) ont exécuté une série des tests d'appuis d'une fondation superficielle sur un sable fin de densité relative de 55% renforcé par des poudrettes de pneu de diamètre entre 4 et 9 mm pour déterminer l'effet cette renforcement sur la capacité portante du sol de fondation et aussi sur le calcul du tassement. (Mahmood Anvari et al. (2014)).

Le sable a été renforcé par des différents pourcentages des poudrettes des pneus 5, 9, 10, 11, 12 et 15%. La figure (I.23) suivante montre la procédure expérimentale de l'essai à la plaque de charge.



Figure (I.23) : la plaque de charge

La figure (I.23) montre l'effet de diamètre des poudrettes de pneu en fonction de BCR (Mahmood Anvari et al. (2014))

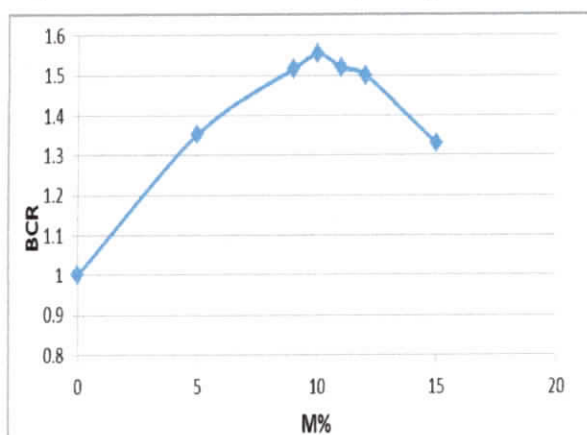


Figure (I.24) : Effet de la poudrette de pneu en fonction de BCR (Mahmood Anvari et al. (2014))

Mahmood Anvari et al. (2014) ont constaté que le mélange du sable avec la poudrette de pneu augmente la capacité portante et diminue le tassement du sol de fondation, et surtout quand la teneur en poudrette de pneu est de l'ordre de 10%, ce dernier augmente la capacité portante autour de 55%.

D'autre part, Mahmood Anvari et al. (2014) ont effectué des essais CBR sur des différentes profondeurs renforcées (D) qui est égale à 0.5B, 1B et 1.25B. (B est la largeur d'une fondation). La figure (I.24) montre la variation des valeurs du BCR en fonction de profondeur (D) renforcée. Ils ont conclu que pour une teneur de poudrette de pneu de 10% la profondeur

optimum est de 1B (10cm) à fin d'augmenter la capacité portante et de diminuer le tassement de la fondation. (Mahmood Anvari et al. (2014)).

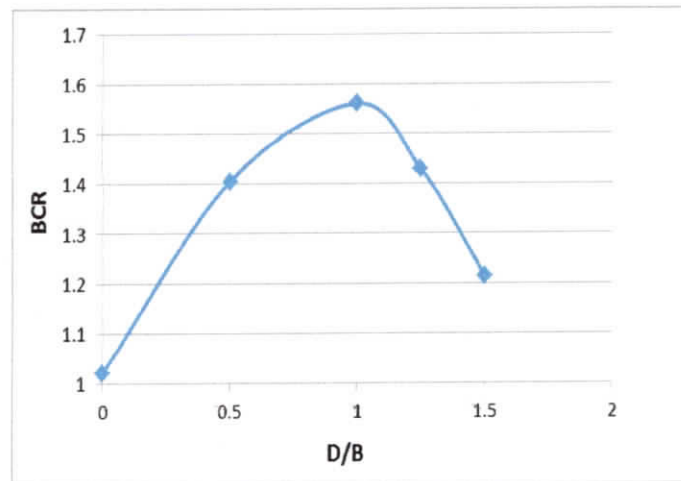


Figure (I.25) : Variation des valeurs du BCR en fonction de profondeur renforcée (Mahmood Anvari et al. (2014)).

Yeo Won Yoon et al. (2004) : ont effectué une série d'essais de charge de plaque sur le sable, on ajoutant une combinaison de bandes de roulement et des parois latérales des pneus pour étudier l'effet de renforcement des ces pneus sur la variation de la densité relative du sable à 40%, 55% et 70%, les résultats sont exprimé en terme de (BCR) et (SRF).

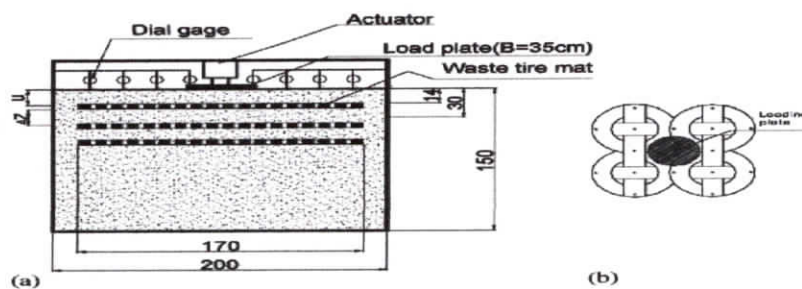


Figure (I.26) : Chambre pour le test de modèle du sol renforcé (Yeo Won Yoon et al. (2004)).

Ils ont constaté que le renforcement d'un sol compacté est efficace et c'est le même résultat obtenu dans le cas pour calculer le tassement. Par conséquent, Il y a une amélioration de (BCR) avec l'augmentation de nombre de couche renforcé et une diminution du (SFR).

Finalement, ils ont conclu que le renforcement de sol augmente la capacité portante et diminue le tassement et plus lorsque on augmente le nombre des couches renforcées plus on arrive à des meilleurs résultats en termes de (BCR) et (SRF). (Yeo Won Yoon et al. (2004)).

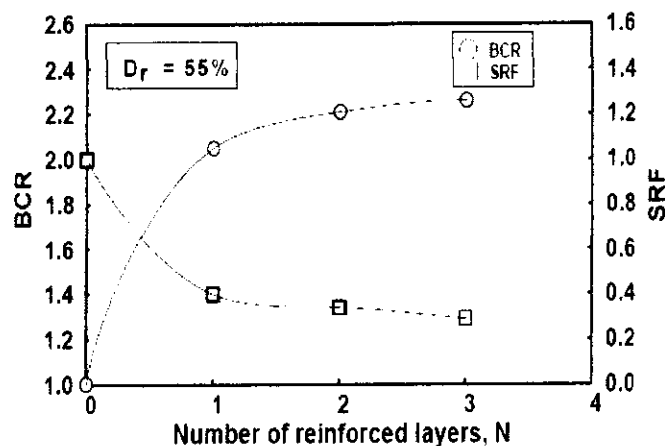


Figure (I.27): Variation de (BCR) et (SRF) avec le nombre de couche de renforcement du sol pour le cas de $D_r=55\%$ (Yeo Won Yoon et al. (2004)).

Très récemment, Swarna et al. (2015) ont effectué plusieurs essais pour déterminer les paramètres mécaniques de sol mélangé avec différents pourcentages des pièces de pneu, sur des échantillons préparés comme suit : au début, ils ont considéré des pièces de pneu comme un matériel additif, ajouté au sol dans les proportions de 2.5, 5, 7 et 10 en termes de pourcentage par le poids du sol et les tests de compactage effectués pour déterminer la teneur en eau optimale et la densité maximum sèche. Les pièces de pneu sont aléatoirement placées dans le sol et qui sont considérées comme un matériel de renforcement comme des géo synthétiques. Les tests de CBR ont été exécutés sur l'échantillon pour déterminer le contenu de pneu optimum dans la condition trempée et non trempée.

Pour le teste de Proctor : il y a une diminution dans la valeur de la teneur en eau optimale et la densité maximum sèche avec l'augmentation du pourcentage de pneus mixtes avec le sol. Pour le teste CBR : la variation de valeur de CBR avec les différents pourcentages de pièces de pneu 0 ,2.5 %, 5 % et 7.5 %. Par conséquent ils ont indiqué qu'il y a une augmentation de la valeur de CBR dans le pourcentage de pneus superflus mixtes avec le sol de 5 %, et diminuant ensuite à 7.5 % dans le cas des conditions trempée et non trempée.

Swarna et al. (2015) ont déduit que: l'indice CBR atteint sa valeur maximum pour un contenu de pneu de 5 % par une augmentation de 1,63% par rapport à l'indice CBR de sol sans pneu et par conséquent une réduction d'épaisseurs de la chaussée et le coût de projet. (Swarna et al. (2015))

➤ Remarques

À partir des études des chercheurs rencontrées dans la bibliographie on peut distinguer que :

- L'indice (CBR) atteint sa valeur maximale pour un contenu de pneu de 5 % par une augmentation de 1,63% par rapport à l'indice (CBR) de sol sans pneu.
- La profondeur optimale de couche de sol au-dessous de l'appui de la fondation est obtenue environ 0.25 fois la largeur (B) d'appui de la fondation.
- L'épaisseur optimale de la couche de sol renforcée de caoutchouc pour réaliser l'amélioration maximale de la capacité portante de la fondation du sol est mesurée pour être environ 0.5 fois de la largeur (B) de l'appui de la fondation.
- La quantité (0,75%) est le contenu optimum ajouté des fibres de pneu dans le sol qui donne un (BCR) maximale et un (SRF) minimal.
- Le renforcement à une profondeur de 1,5B, est la profondeur optimum qui donne un (BCR) maximale et un (SRF) minimale.
- Il y a une amélioration de la résistance au cisaillement par un contenu de 30% de lambeau de pneu dans le sol.
- Le contenu (30%) de pneu donne une amélioration maximale des deux paramètres mécaniques (*c'* et Φ). Par conséquent c'est le contenu optimal qui donne une résistance maximale au cisaillement.
- L'étude de stabilité d'un talus renforcé par des pneus aplatis donne un coefficient de sécurité maximal par un contenu de lambeau de (30%).

I.4 Conclusion

Les méthodes de renforcement du sol présentées dans ce chapitre permettent d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols traités. Chaque technique présente ses avantages et ses inconvénients en termes de portance, de nuisance sonore, de contrainte, de fiabilité et de coût. La terre armée, les géotextiles sont utilisés pour renforcer des sols rapportés. Le clouage, les colonnes ballastées, les micros pieux s'utilisent sur le terrain en place. En ce qui concerne les pneus ou produits pneu usagés sont utilisés dans le renforcement du sol, ils interviennent peut-être dans la réalisation d'ouvrages neufs ou dans des opérations d'entretien ou de confortement d'ouvrages existants.

L'utilisation des pneus usagés dans le renforcement de sol est une méthode de disposition sûre. Avec tous ceux-ci, c'est une bonne économie aussi. A la fin, cette technique est une méthode qui dépend essentiellement du type, densité, et la granulométrie de sol renforcé et aussi de type de pneu utilisés (pneu découpé, poudrette, aplatis ou granulé....) et à partir de tout ses facteurs on peut déterminer la quantité optimale de pneu ajouter au sol pour l'amélioration de telle paramètre physique ou mécanique et qui influe sur le comportement du sol en terme de déformation ou déplacement.



CHAPITRE II

Essais

d'Identification et de

Classification des

Sols

II.1 Introduction

Identifier un sol, c'est déterminer un ensemble de propriétés physiques, mécaniques et chimiques qui permettent de le caractériser. Ces propriétés sont déterminées par des essais simples et rapides, appelés « essais d'identification ».

Les essais d'identification conduisent à une description précise et chiffrée, et non seulement descriptive du sol. Une définition chiffrée est nécessaire car des sols d'aspects très voisins peuvent présenter des comportements (mécaniques, en particulier) très différents. Les essais d'identification servent de base aux divers systèmes de classification des sols. Leurs résultats permettent aussi d'estimer au moyen de corrélations des ordres de grandeur des propriétés mécaniques des sols et d'établir un prédimensionnement grossier des ouvrages au stade des premières études.

Durant la préparation de ce projet de fin étude on a réalisé des essais au sein du laboratoire mécanique des sols (MDS) à l'Université de Jijel sur un sable de dune (Sidi-Abdelaziz, Jijel) pour déterminer les paramètres physiques, chimiques et mécaniques du sable et faciliter sa classification selon le GTR (Guide des Terrassements Routiers) et le LPC.

II.2. Essais d'identification

II.2.1 Essai physique

II.2.1.1 Equivalent de sable

L'essai d'équivalent de sable permet de déterminer dans un sol la proportion relative de sol fin et de sol grenu. Cet essai est important, car la présence d'éléments fins peut modifier le comportement de ces sols. En particulier la présence de particules argileuses dans le sable d'un mortier ou béton. Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable.

a. Manipulation

- Tamiser le matériau à teste de façon à séparer les éléments sableux les plus grossiers des particules fines, puis en prélève 120g.
- Remplir une éprouvette avec la solution lavant jusqu'au premier trait de jauge.

Chapitre II : Essais d'identification et de classification des sols

- Verser les 120g de l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide de l'entonnoir.
- Laisser l'éprouvette au repos pendant 10 minutes.
- Boucher l'éprouvette à l'aide des bouchons et les agiter avec la machine agitatrice.

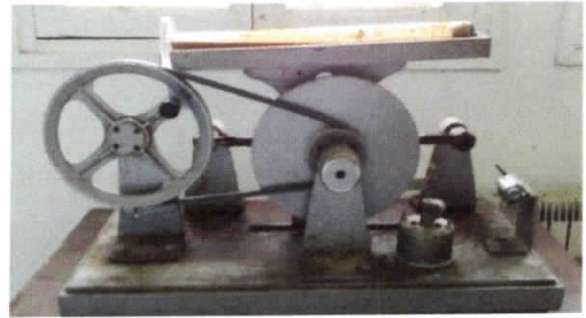


Figure (II.1) : Agitateur mécanique.

- Remplir l'éprouvette jusqu'au second trait de jauge en lavant le bouchon et la paroi intérieure.
- Laisser reposer l'éprouvette 20 minutes.
- On abaisse le piston dans le liquide pour séparer le floculat de l'eau
- On lit les valeurs de h_1 et h_2 à l'aide du régllet et h'_2 par le piston.
- On remplace h_1 et h_2 ou bien h'_2 dans les formules suivantes par leurs valeurs respectives
- On refaire la même expérience une autre fois.

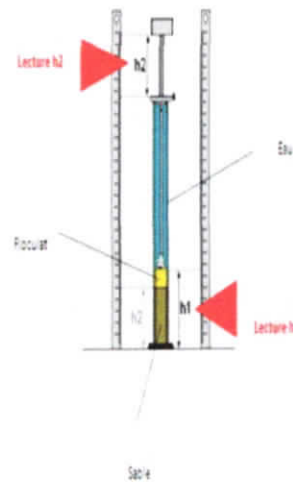


Figure (II.2) : Equivalent de sable.

$$ESV = \frac{h_2}{h_1} \times 100.$$

$$ESP = \frac{h'_2}{h_1} \times 100.$$

b. Présentation des résultats

Tableau (II.1) : Résultat des essais (ES) en termes d'ESV et ESP.

Résultats	h1	h2	h'2	ESV %	ESP%
Essai1	9,8	9,5	9,5	96,93	96,93
Essai2	9,6	9,4	9,3	97,91	96,87
Essai3	9,7	9,5	9,4	97,93	96,69
La moyenne				97,59	96,83

A partir du tableau (II.2), on peut déterminer la nature de sable suivant les valeurs d'ESV et EPS en pourcentage.

Tableau (II.2) : La nature de sol.

Nature	Equivalent de sable
Argile pure	0
Sol plastique	20
Sol non plastique	40
Sable pur et propre	100

Suivant le tableau de classification de sol et a partir des résultats obtenue de ESV et EPS, le sol étudié est un sable pure et propre, et qu'il contient une quantité presque nul des particules fins.

II.2.1.2 Essai au bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène permet de déterminer la propreté d'un sol et de connaitre le type d'argile qu'il contient (sensibles à l'eau = gonflement). L'essai consiste à mesurer la capacité d'absorption des particules argileuses du matériau.

On injecte successivement des doses élémentaires d'une solution de bleu de méthylène et on contrôle l'absorption du bleu après chaque ajout en effectuant une tâche sur un papier filtre. Le test de la tâche consiste à prélever après chaque injection et à l'aide d'une baguette de verre une goutte de suspension que l'on dépose sur le papier filtre. La tâche ainsi formée se compose d'un dépôt central (d'argile et de bleu de méthylène) d'un bleu généralement soutenu, entouré d'une zone humide incolore.

La goutte prélevée doit être telle que le diamètre du dépôt soit compris entre 8 et 12 mm. Le test est dit positif si, dans la zone humide apparaît autour du dépôt central une auréole bleu-clair, les particules argileuses du matériau sont alors saturées.

a. Manipulation

- Tamiser l'échantillon à étudier au tamis 0.5 mm.
- Prélever une masse de 120 gr.
- Calculer la teneur en eau W de la prise d'essai.
- Déduire la masse humide de l'échantillon par :

$$[\text{Masse Humide}] = [\text{Masse sèche}] / (1 + [\text{Teneur en eau}]).$$

- Verser un échantillon de 30 gr de sol sec dans le bécher



Figure (II.3) : Essai au bleu de méthylène.

Chapitre II : Essais d'identification et de classification des sols

et ajouter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Agiter sans arrêt le mélange à l'aide de l'agitateur à ailettes.

- Ajouter 5 cm³ de bleu de méthylène dans le Bécher
- Prélever une goutte de mélange et la placer sur papier filtre.
- Si la tache centrale est entourée d'une auréole bleue turquoise, le test est positif. Dans ce cas l'essai est terminé, les particules argileuses sont alors saturées en Bleu de Méthylène. On recommence l'essai à l'identique, cinq fois à intervalle d'une minute pour le confirmer.

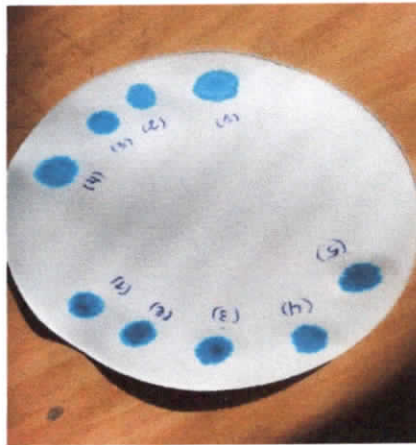


Figure (II.4) : Résultats de l'essai VBS

- Si la tache est entourée d'une auréole humide incolore, le test est négatif. Dans ce cas, on ajoute du bleu de méthylène par prises de 5cm³ jusqu'à ce que le teste soit positif. On répète l'essai à l'identique, cinq fois à intervalle d'une minute pour le confirmer.
- Calculer la valeur au bleu du sol (VBS) en appliquant la formule suivante :

$$VBS = \frac{B}{m_0} \times 100 \quad (\text{II.1})$$

$$B = V_0 \times 0,01 \quad (\text{II.2})$$

$$w = \frac{m_{h2} - m_{s2}}{m_{s2}} \quad (\text{II.3})$$

$$m_0 = \frac{m_{h1}}{(1+w)} \quad (\text{II.4})$$

m_0 : La masse sache de la prise d'essai.

B : La masse de bleu introduit.

w : La teneur en eau.

Chapitre II : Essais d'identification et de classification des sols

b. Présentation des résultats

$w = 3,316 \%$. $m_0 = 49,04 \text{ g}$. $B_0 = 0,17$; $VBS = 0,346 \%$.

Tableau (II.3) : Classification des sols en fonction des valeurs VBS.

0,2	Seuil de sensibilité à l'eau
$0,2 < VBS < 1,5$	Sols sablo-limoneux
$1,5 < VBS < 2,5$	Sols limoneux peut plastique
$2,5 < VBS < 6$	Sols limoneux moyennement plastique
$6 < VBS < 8$	Sols argileux
$8 < VBS$	Sols très argileux

Suivant le tableau de classification de sol et à partir des résultats obtenue de l'essai VBS, le sol étudié : est un sol sablo-limoneux.

II.2.1.3 Essai teneur en eau

La teneur en eau d'un sol et le paramètre d'état fondamental de son comportement. Elle est définie par le rapport du poids de l'eau au poids des particules solide d'un volume donné de sol. Cette grandeur est notée (w) et s'exprime en pourcentage (%) et facilement mesurable en laboratoire. La connaissance de la teneur en eau est très importante car elle permet, avec d'autre caractéristique, d'apprécier l'état dans la quelle se trouve ce sol.

a. Manipulation

- Prélever un échantillon de sol représentatif.
- Placer le prélèvement sur un verre de montre ou dans un bécher de poids (T).
- Peser immédiatement on note le poids humide, soit (w).
- Mettre à l'étuve à 105°C . Jusqu'à dessiccation complète et poids stable.

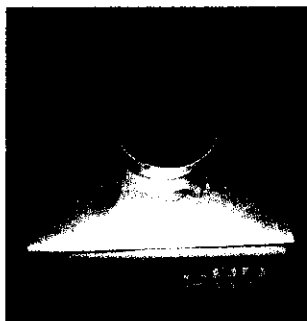


Figure (II.5) : Mesure poids de sable humide.

Chapitre II : Essais d'identification et de classification des sols

- Peser l'échantillon sec immédiatement à la sortie de l'étuve, on note le poids sec, soit (w_d).
- La différence entre le poids humide (w) et le poids sec (w_d) donne le poids de l'eau
- En déduire la teneur en eau (w) de l'échantillon par la relation suivante :



Figure (II.6) : Mesure le poids de sable sèche.

b. Présentation des résultats

$$w = \frac{(W - T) - (w_d - T)}{(w_d - T)} \times 100 \quad (\text{II.5})$$

$$w_1 = 3,46\%, \quad w_2 = 3,34\%. \quad \text{Et} \quad w_3 = 3,15\%.$$

Donc la teneur en eau moyenne est donnée par l'équation (II.6) suivante:

$$w = \frac{w_1 + w_2 + w_3}{3} \quad (\text{II.6})$$

$$w = 3,316\%.$$

Cet essai est un procédé simple pour déterminer la teneur en eau naturel, à partir des résultats obtenus on peut distinguer que la teneur en eau de ce sable est très petite et donc on peut constater que la capacité de l'absorption de ce type de sol est très faible.

II.2.1.4 Mesure des poids volumiques et calcul des densités des sols

Le poids volumique des grains solides est un paramètre de nature du sol, indique le caractère intrinsèque du sol. Il ne varie pas au cours du temps et utilisé pour connaître les paramètres d'état du sol, afin d'étudier le comportement du sol qui intervient dans le calcul des ouvrages de génie civil.

II.2.1.4.1 Méthode de l'éprouvette

- Mettre dans une éprouvette graduée un volume d'eau v_1
- On pèse une masse sèche de l'échantillon m_s
- Verser l'échantillon dans l'éprouvette remplie d'eau, éliminer aussi bien que possible les bulles d'air.
- Relever le nouveau volume v_2 .



Figure (II.7): L'éprouvette.

a. Présentation des résultats

$$\rho_{app} = \frac{m_s}{v_1 - v_2} \quad (II.7).$$

$$\rho_{app1} = 2,56 \text{ g/cm}^3.$$

$$\rho_{app2} = 2,63 \text{ g/cm}^3.$$

$$\rho_{app3} = 2,56 \text{ g/cm}^3.$$

$$\rho_{app} = \frac{\rho_{app1} + \rho_{app2} + \rho_{app3}}{3} \quad (II.8).$$

$$\rho_{app} = 2,58 \text{ g/cm}^3$$

II.2.1.4.2 Méthode de pycnomètre

- Prendre un pycnomètre vide, le peser après l'avoir lavé et séché, soit (m_1) de poids.
- Remplir le pycnomètre jusqu'à la base de col d'eau distillée, éliminer toutes les bulles d'air.
- Sécher l'extérieure du pycnomètre et peser, soit (m_2) de poids.



Figure (II.8) : Un pycnomètre

Chapitre II : Essais d'identification et de classification des sols

- Vidé le pycnomètre de son contenu, le séché.
- Prélever approximativement 25g de matériau sec si le sol n'est pas cohérent et 10g s'il est cohérent.
- Mettre l'échantillon ainsi prélevé dans le pycnomètre et mesurer le poids, soient (m_3).
- Compléter avec l'eau distillée jusqu'au repère, chasser les bulles d'air et relever le poids, soit (m_4).

a. Présentation des résultats

$$m_s = m_3 - m_1. \quad (\text{II.9})$$

$$V_s = \frac{(m_2 - m_1) - (m_4 - m_3)}{\gamma_w}. \quad (\text{II.10})$$

$$\gamma_s = \frac{m_s}{V_s}. \quad (\text{II.11})$$

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}. \quad (\text{II.12})$$

Tableau (II.4) : Résultats d'essai pycnomètre.

Essai	Unité	Essai1	Essai2	Essai3
M1	G	231	231	231
M2	G	619	619	620
M3	G	256	256	256
MS	G	25	25	25
γ_s	g/cm ³	27,77	27,77	31,25
G_s		2,77	2,77	3,12

$$\gamma_s = 28,93 \text{ g/cm}^3.$$

$$G_s = 2,89.$$

1. Remarque

Les deux essais de pycnomètre et de l'éprouvette permettent de déterminer le poids des grains solide γ_s . Les résultats sont :

$$\gamma_s = 28,93 \text{ g/cm}^3. \text{ (D'après la méthode de pycnomètre).}$$

$$\gamma_s = 25,8 \text{ g/cm}^3. \text{ (D'après la méthode de l'éprouvette).}$$

II.2.1.4.3 Méthode de la pesée hydrostatique

- Prendre un échantillon de sol et peser m_1 .
- Enduire l'échantillon de paraffine.
- Peser l'échantillon paraffiné m_2 .
- Placer l'échantillon dans la corbeille prévue pour le peser.
- Peser l'échantillon paraffiné dans l'eau m_3 .



Figure (II.9) : Mesure le poids volumique par pesé hydrostatique.

a. Présentation des résultats

$$\rho_d = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \rho_w \quad (\text{II.13})$$

$$\rho_{d1} = 14,33 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{d2} = 14,32 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{d3} = 14,22 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_d = 14,29 \text{ kg/m}^3$$

2. Remarque

Les deux essais méthode de la pesée hydrostatique et Proctor permettent de déterminer le densité sèche des grains ρ_s .

$$\rho_d = 1,624 \text{ g/cm}^3 \text{ (essai Proctor).}$$

$$\rho_d = 1,429 \text{ g/cm}^3 \text{ (la méthode de la pesée hydrostatique).}$$

II.2.1.5 Analyse granulométrique par tamisage

L'analyse granulométrique traite la granulométrie par tamisage pour les particules supérieures à $80\mu\text{m}$, et on utilise la voie sèche pour les matériaux sans cohésion (pour les sols cohérents), on utilise la voie humide. Elle permet de déterminer la grosseur et pourcentage pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon.

a. Manipulation

On met l'échantillon de sol dans l'étuve pour le sécher (24h), la masse utile pour cet essai est $M=1000\text{g}$, verser la masse M séchée au tamis supérieur et on met le couvercle pour éviter la dispersion de poussière, agiter manuellement ou mécaniquement la colonne de tamis, puis terminer le tamisage en remuant soigneusement le matériau à la main, jusqu'à ce que plus aucun élément ne passe à travers les mailles de chaque tamis. On pèse des refus cumulés, par différence on en déduit le tamisât cumulé et on prend les résultats.



Figure (II.10) : Machine de tamisage.

Chapitre II : Essais d'identification et de classification des sols

b. Présentation des résultats

Tableau (II.5) : Résultats d'une analyse granulométrique par tamisage.

Poids de l'échantillon	Dimension Tamis (mm)	Poids des Refus partiels(g)	Poids des refus cumulés	%Des refus cumulés	Complément à 100 des refus cumulés	Tamisât %
P=1000g	0,8	5	5	0,5	99,95	100
	0,63	18	23	2,3	97,7	98
	0,5	96	119	11,9	88,3	88
	0,4	228	347	34,7	65,3	65
	0,315	491	838	83,8	16,2	16
	0,25	113	951	95,1	4,9	5
	0,2	36	987	98,7	1,3	1
	0,16	7	994	99,4	0,6	1
	0,125	3	996	99,6	0,4	0
	0,1	1	997	99,7	0,3	0
	0,08	1	998	99,8	0,2	0

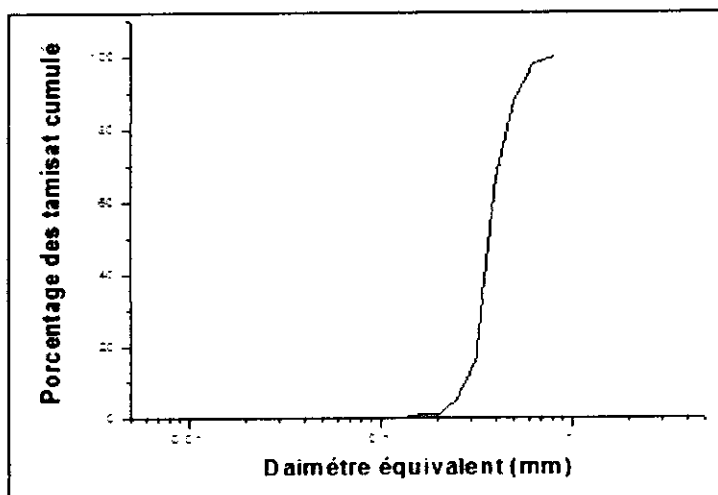


Figure (II.11) : Courbe granulométrique de sol étudié.

Tableau (II.6) : Echelle de granulométrie selon C_u .

C_u	Granulométrie
1	à une seule grosseur
1-2	très uniforme
2-5	uniforme
5-20	peu uniforme
>20	très étalée

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

(II.14)

Chapitre II : Essais d'identification et de classification des sols

$$C_u = 1,42$$

Suivant la valeur de coefficient de hazan, le sable étudié est très uniforme.

Tableau (II.7) : Echelle de granulométrie selon C_c .

C_c	Granulométrie
$1 < C_c < 3$	bien graduée
$C_c < 1$ ou $C_c > 3$	Mal graduée

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} D_{10}} \quad (\text{II.15})$$

$$C_c = 1,03$$

Suivant la valeur de C_c obtenu donc, le sable étudié est bien graduée.

II.2.1.6 Essai Proctor

L'essai consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau et à la compacter selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du sol et on établit la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. D'une manière générale, cette courbe appelée courbe Proctor présente une valeur maximale de la masse volumique sèche, elle est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces 2 valeurs qui sont appelées caractéristiques de compactage Proctor Normal ou Proctor Modifié suivant l'essai réalisé. Le compactage est nécessaire afin d'augmenter sa résistance mécanique, et son module de Young et ainsi diminuer les déformations et diminuer la perméabilité et la sensibilité à l'eau.

- L'essai Proctor Normal est réalisé avec la dame normale (petite dame), quelque soit le moule.
- L'essai Proctor Modifié est réalisé avec la dame modifiée (grande dame), quelque soit le moule.
- Il existe une teneur en eau particulière w optimale notée (w_{opt}) pour l'essai Proctor normal et w_{opt} pour l'essai Proctor modifié pour laquelle le compactage conduit à une masse volumique sèche ρ_d (ou un poids volumique) maximum.
- La masse volumique maximale correspond donc à un état de compacité maximum et à une capacité de résistance maximale.

a. Manipulation

- Ajouter le sol pour obtenir la teneur en eau existante
- Malaxer le sol avec l'eau ajouté
- Peser le moule vide avec l'embase soit P_m
- Monter la hausse sur le moule, compacter le sol en 3 couches en assenant pour chaque couche 25 coups de dame
- Enlever la hausse et araser soigneusement le haut de moule
- Peser le moule avec le sol soit P_h enlever l'embase et prélever 2 prises sur l'échantillon l'une en haut et l'autre en bas, déterminer la teneur en eau. On prendra la moyenne de deux valeurs w .
 - On détermine le poids volumique sec
 - Répéter les étapes pour les autres teneurs en eau (4% ,6%,8%,10%,12%). Pour déterminé :
 - w_{opt} : La teneur en eau optimale.
 - γ_{dopt} : La densité sèche maximale correspondante.



Figure (II.12) : Détermination de poids humide



Figure (II.13) : préparation de l'échantillon

Chapitre II : Essais d'identification et de classification des sols

b. Présentation des résultats

Tableau (II.8) : Résultats d'essai Proctor.

N° d'essai	1		2		3		4		5	
Poids d'eau ajoutée à chaque compactage g	100		150		200		250		300	
Poids total Humide de sol kg	14,774		14,819		14,84		14,875		14,907	
Poids de moule kg	13,098		13,098		13,098		13,098		13,098	
Poids net du sol humide kg	1,676		1,721		1,747		1,777		1,808	
Volume de moule c	0,001		0,001		0,001		0,001		0,001	
Poids volumique sec	1,612		1,624		1,618		1,616		1,615	
Poids total humide g	93,5	84,6	89	90,8	90,6	94,5	92,9	95	99,1	90,3
Poids total sec g	90,7	82,2	85	86,9	85,4	88,3	86	88,7	90,9	82,3
Poids de la tare g	18,4	18,3	18	18,3	18,3	18,4	18,2	18,5	18,2	18,3
Teneur en eau %	4,25	3,75	5,97	5,66	7,6	8,86	10,17	8,97	11,27	12,5
Moyenne %	4		5,81		8,23		9,57		11,88	

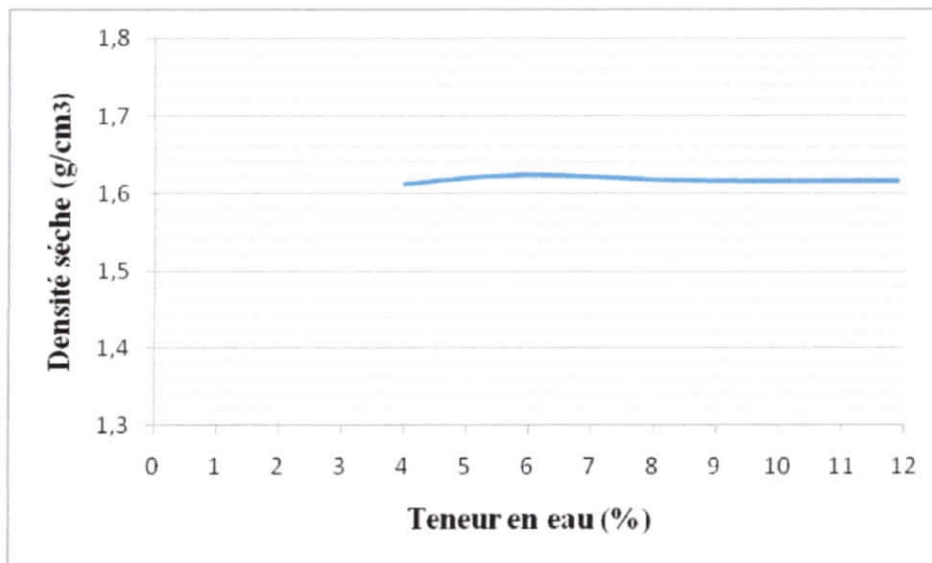


Figure (II.14) : Courbe de compactage.

A partir de la courbe on trouve que $\gamma_{dopn} = 1,624 \text{ g/cm}^3$

$$w_{opn} = 5,81 \%$$

II.2.2 Essai chimique

II.2.2.1 Essai calcimètre

Un essai calcimètre permet de mesurer le volume de CO_2 dégagé par action de l'acide chlorhydrique (HCl) sur le carbonate de calcium (CaCO_3) d'un échantillon de sol ou de roche.

a. Manipulation

- Relever la température et la pression de la pièce.
- On prépare une solution saturée de NaCl.
- Tarer la balance puis peser 0.25g de l'échantillon broyé.
- On remplit au même niveau de la solution saturée en NaCl du tube gradué et de l'ampoule du calcimètre et on note la division correspondante au v_1 sur le tube gradué.
- On introduit 0.25g de carbonate pur ou 0.25g de l'échantillon à étudier dans le flacon.
- On remplit un petit tube avec de l'acide chlorhydrique (HCl) et on l'introduit dans le flacon avec une pince et avec précaution pour ne pas le verser.
- On bouche le flacon avec le bouchon relié au tube gradué de calcimètre de Bernard.
- On renverse l'acide contenu dans le tube sur l'échantillon.
- On agite de temps en temps le flacon pour activer la réaction.
- à la fin de l'effervescence on note la division correspondante au v_2 sur le tube gradué.
- Le volume de CO_2 dégagé est la différence des volumes $v_2 - v_1$.

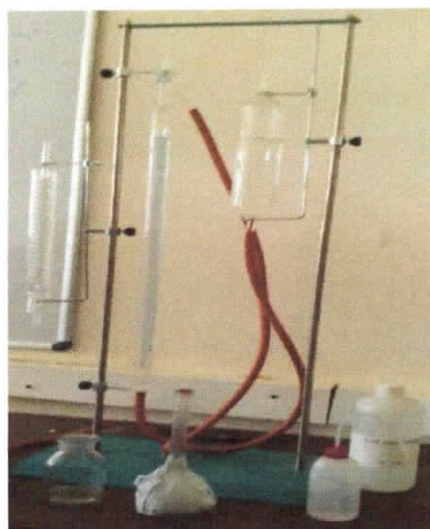


Figure (II.15) : Essai Calcimètre.

Chapitre II : Essais d'identification et de classification des sols

b. Présentation des résultats

$$m_t = 0.25\text{g} \longrightarrow V_t = 45\text{ ml}$$

$$m_{ech} = 0.25 \longrightarrow V_{ech} = 5\text{ml}$$

$$45\text{ ml dégage de } CO_2 \longrightarrow \text{échantillon témoin } 100\% \text{ } CaCO_3$$

$$5\text{ ml dégage de } CO_2 \longrightarrow \text{échantillon } X\%$$

Donc, le pourcentage de $CaCO_3$ qui contient dans le sol étudié est égale à 11,11%.

Tableau (II.9) : Classification des sols en fonction des valeurs $CaCO_3$.

Teneur en carbonate %	Classification	Dénomination
< 10	Non calcaire	Argile sable siliceux
10 à 29	Peu calcaire	Argile marneuse
30 à 69	Moyen calcaire	Marne
70 à 89	Fortement calcaire	Calcaire marneux
90 à 100	Calcaire	Calcaire

D'après le tableau (II.9) de la classification des sols en fonction des valeurs de $CaCO_3$: le sable et peu calcaire.

II.2.3 Essai mécanique

II.2.3.1 Essai cisaillement

Il s'agit de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un sol en procédant au cisaillement rectiligne d'un échantillon sous charge constante. L'essai de cisaillement permet de tracer la courbe intrinsèque du sol étudié, et de déterminer son angle de frottement interne φ et sa cohésion C . Ces valeurs servent entre autres à déterminer la contrainte admissible par le sol dans le cas de fondations superficielles et la poussée du sol sur un mur de soutènement.

a. Manipulation

- Placer l'étrier de charge sur le piston de la boîte,
- Placer le comparateur vertical et le mettre à zéro,
- Monter l'anneau dynamométrique sur la machine, le relier à la boîte et compenser les jeux en mettant l'anneau légèrement en traction et en ramenant lentement le comparateur de l'anneau au zéro,
- Appliquer sur l'éprouvette la charge désirée, en principe :

Pour un sol pulvérulent : 100,200, 300 kPa.

Pour un sol cohérent : essai non consolidé, non drainé : 50,100, 200,300 kPa

Chapitre II : Essais d'identification et de classification des sols

Essai consolidé, drainé ou non : appliquer les mêmes pressions que pour la consolidation de l'éprouvette.

- Désolidariser les deux demi-boîtes en enlevant les goupilles,
- Mettre en route à la vitesse désirée.
- Lire, à intervalles réguliers les indications du comparateur de l'anneau, du comparateur de déplacement horizontal et du comparateur vertical. Arrêter l'essai lorsque la contrainte de cisaillement est devenue constante.



Figure (II.16) : L'appareil de cisaillement à la boîte

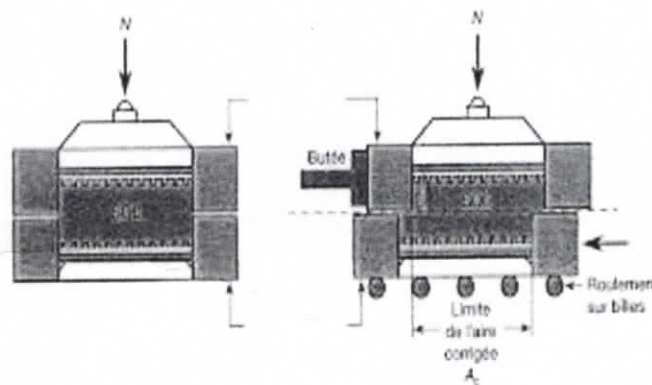


Figure (II.17) : Cisaillement de l'échantillon

Chapitre II : Essais d'identification et de classification des sols

b. Présentation des résultats

Tableau (II.10) : L'essai de cisaillement pour l'état humide de sable et $\sigma = 1 \text{ bar}$

Temps (s)	Déplacement (mm)	Lecture (mm)	Force en (KN)	Surface (mm ²)	Contrainte (kN/ m ²)
0	0	0	0	3600	0
15	0,16	0,052	0,092	3590,4	25,62
30	0,46	0,072	0,124	3572,4	34,71
45	0,73	0,088	0,148	3556,2	41,61
60	1,01	0,1	0,17	3539,4	48,03
75	1,3	0,112	0,194	3522	55,08
90	1,59	0,122	0,212	3504,6	60,49
105	1,88	0,128	0,228	3487,2	65,38
120	2,17	0,134	0,228	3469,8	65,70
135	2,47	0,135	0,23	3451,8	66,63
150	2,76	0,134	0,228	3434,4	66,38
165	3,06	0,134	0,228	3416,4	66,73
180	3,37	0,132	0,224	3397,8	65,92
195	3,67	0,13	0,22	3379,8	65,09

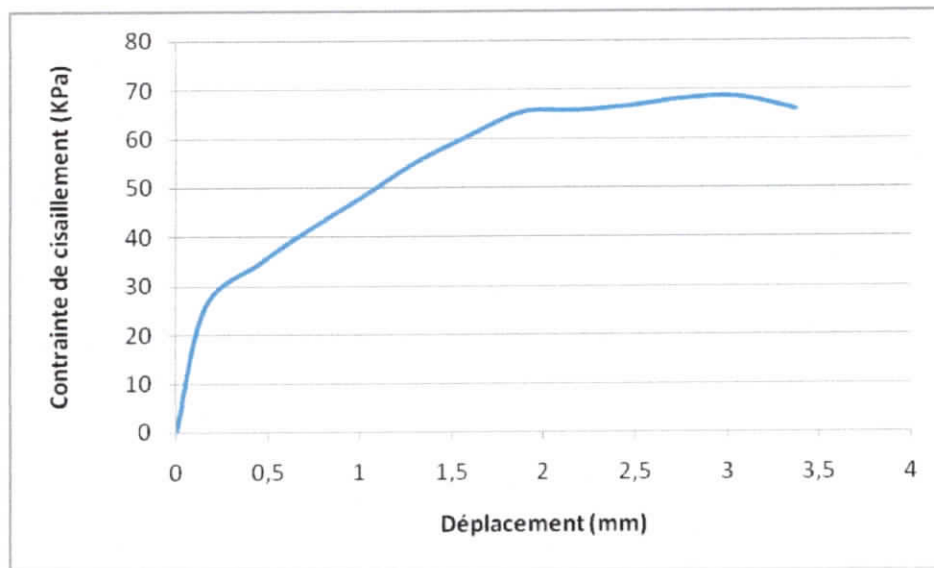


Figure (II.18) : Courbe contrainte déplacement pour $\sigma = 1 \text{ bar}$

D'après la courbe, on obtient $\tau_{\max} = 66,73 \text{ (KPa)}$

Chapitre II : Essais d'identification et de classification des sols

Tableau (II.11) : L'essai de cisaillement pour l'état humide de sable et $\sigma = 2\text{bar}$.

Temps (s)	Déplacement (mm)	Lecture (mm)	Force en (KN)	Surface (mm ²)	Contrainte (kN/ m ²)
0	0	0	0	3600	0
15	0,17	0,07	0,12	3589,8	33,42
30	0,44	0,09	0,15	3573,6	41,97
45	0,71	0,12	0,21	3557,4	59,03
60	0,99	0,13	0,22	3540,6	62,13
75	1,27	0,15	0,26	3523,8	73,78
90	1,54	0,17	0,29	3507,6	82,67
105	1,84	0,19	0,33	3489,6	94,56
120	2,11	0,2	0,34	3473,4	97,88
135	2,39	0,21	0,36	3456,6	104,14
150	2,68	0,22	0,38	3439,2	110,49
165	2,99	0,225	0,385	3420,6	112,55
180	3,28	0,227	0,387	3403,2	113,71
195	3,59	0,225	0,385	3384,6	113,75

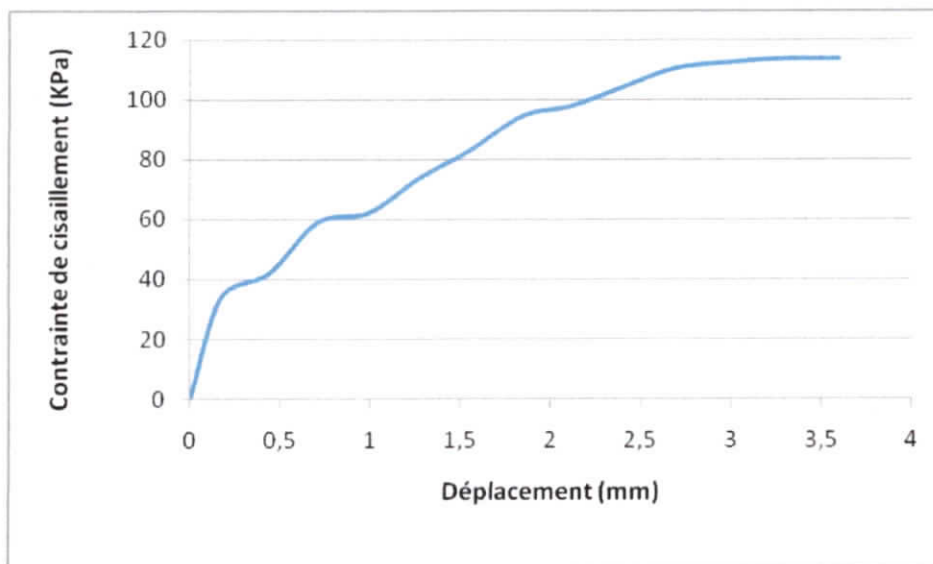


Figure (II.19) : Courbe contrainte déplacement pour $\sigma = 2\text{bar}$

D'après la courbe on obtient $\tau_{\max} = 113,75 \text{ (KPa)}$

Tableau (II.12) : L'essai de cisaillement pour l'état humide de sable et $\sigma = 3\text{bar}$.

Temps (s)	Déplacement (mm)	Lecture (mm)	Force en (KN)	Surface (mm ²)	Contrainte (kN/ m ²)
0	0	0	0	3600	0
15	0,12	0,06	0,1	3592,8	27,83
30	0,34	0,115	0,2	3579,6	55,87
45	0,59	0,17	0,29	3564,6	81,355
60	0,84	0,212	0,36	3549,6	101,41
75	1,09	0,248	0,426	3534,6	120,52
90	1,36	0,27	0,46	3518,4	130,74
105	1,63	0,3	0,51	3502,2	145,62
120	1,99	0,32	0,55	3480,6	158,01
135	2,16	0,34	0,58	3470,4	167,12
150	2,45	0,35	0,6	3453	173,76
165	2,73	0,364	0,624	3436,2	181,59
180	3,02	0,364	0,624	3418,8	182,52
195	3,32	0,35	0,6	3400,8	176,42
210	3,63	0,35	0,6	3382,2	177,39

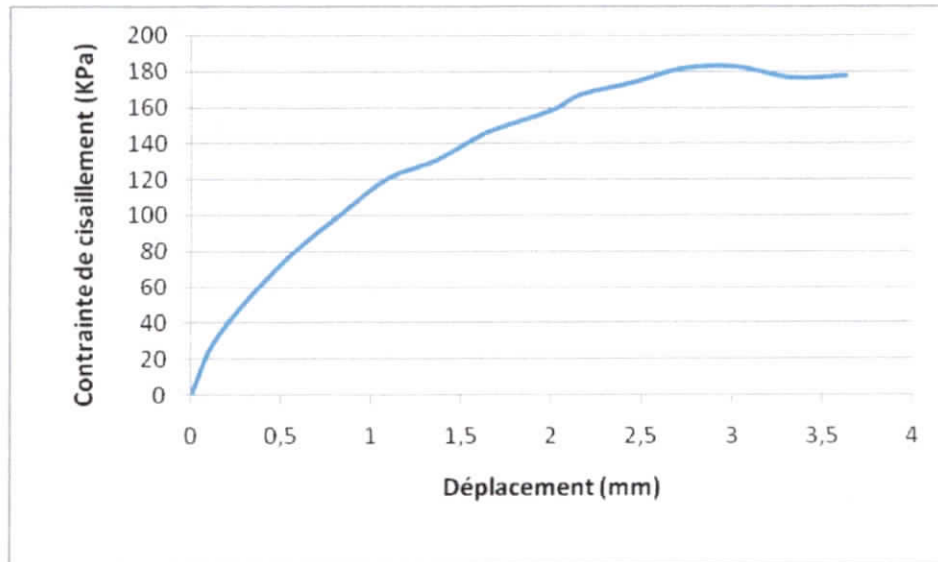


Figure (II.20) : Courbe contrainte déplacement pour $\sigma = 3\text{bar}$

D'après la courbe on obtient : $\tau_{\text{max}} = 182,52 \text{ (KPa)}$

La courbe de contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale $\tau = f(\sigma)$

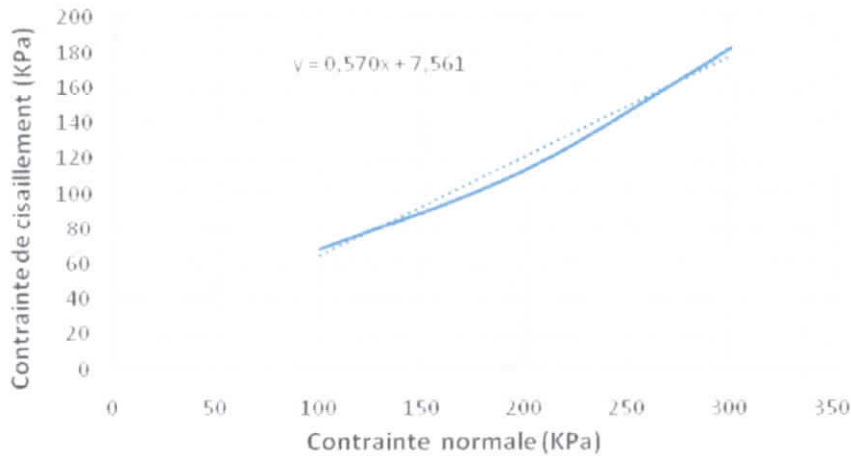


Figure (II.21) : Courbe intrinsèque.

D'après la courbe intrinsèque il y a une ligne droite qui correspond à l'équation : $\tau = A\sigma + B$, par l'identification avec l'équation de coulomb : $\tau = \sigma \operatorname{tg}\varphi + C$

On aura : $A = \operatorname{tg}\varphi = 0,570$,

$\varphi = \arctg(0,57) = 29,68^\circ$ et $B = C = 7,561$ KPa

La cohésion pour ce type de sol est égale à zéro mais dans ce cas : $C = 7,561$ KPa ce résultat montre l'influence de la teneur en eau sur les paramètres mécaniques des sols.

II.2.3.1 Essai CBR (NF P 94-078)

L'essai CBR est un essai de portance des remblais et des couches de forme compactées des ouvrages routiers. Il s'agit de déterminer expérimentalement des indices portant (IPI, CBR) qui permettent d'établir une classification des sols (GTR) ; d'évaluer la traficabilité des engins de terrassement (IPI) ; et déterminer l'épaisseur des chaussées. La charge apportée par le pneu sur la chaussée poinçonne le sol de fondation. Ce poinçonnement est d'autant plus petit que l'épaisseur de la chaussée est grande.

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

a. Manipulation :

- Confection des éprouvettes

Il convient tout d'abord de choisir les différents ensembles de conditions d'état du sol (teneur en eau, masse volumique sèche, état de saturation), pour lesquels on veut réaliser l'essai.

Pour chaque ensemble de condition d'état considéré, il convient de préparer, 5,5kg minimum de matériau dans notre cas qu'on cherche l'I CBR

On procède ensuite à la préparation du sol et au compactage dans les moules suivant les modalités décrites dans la norme NF P 94-093.

Le moule contenant l'éprouvette est ensuite désolidarisé de sa plaque de base, retourné pour que la face supérieure de l'éprouvette se retrouve en contact avec l'embase. Celle-ci est alors à nouveau solidarisée avec le moule. Procéder à l'extraction du disque d'espacement puis à l'exécution du poinçonnement.

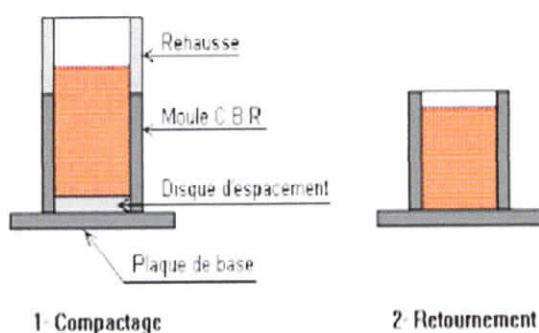


Figure (II.22) : Préparation de l'échantillon

- Exécution du poinçonnement

Les modalités d'exécution du poinçonnement diffèrent

Selon que l'on détermine l'IPI, l'ICBR immédiat ou l'I CBR immersion.

Dans notre cas notre objectif est de déterminer l'I CBR immédiat :

- Interposer deux surcharges dans le volume libéré par le disque d'espacement
- Placer l'ensemble embase, moule, éprouvette sur presse, en position centrée par rapport au piston du poinçonnement.
- Mettre en contact la surface supérieure de l'éprouvette avec le piston ;
- Initialiser les dispositifs de mesure des forces et des enfoncements ;

Chapitre II : Essais d'identification et de classification des sols

- Exécuter le poinçonnement et marquer les valeurs des forces aux enfoncements de 0.625, 1.25, 2, 2.5, 5, 7.5, 10mm.



Figure (II.23) : L'appareil CBR

b. Présentation des résultats

Tableau (II.13) : Résultats CBR du sable.

Déplacement en mm	Lecture en mm	Force en KN	Surface mm ²	Contrainte en Mpa
0	0	0	1931,2256	0
0,625	0,05	1,11	1931,2256	0,57476454
1,25	0,11	2,44	1931,2256	1,26344638
2	0,17	3,78	1931,2256	1,95730628
2,5	0,195	4,33	1931,2256	2,24209952
5	0,13	2,89	1931,2256	1,49645904
7,5	0,098	2,176	1931,2256	1,12674563
10	0,12	2,67	1931,2256	1,38254174

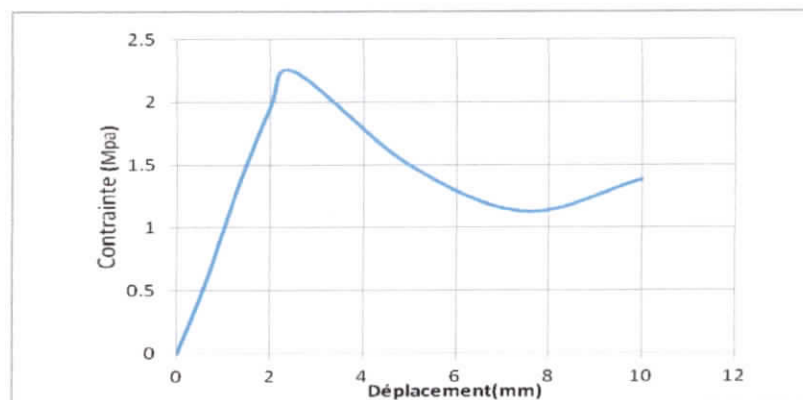


Figure (II.24) : Contrainte-déplacement.

On calcule l'indice portant CBR pour les enfoncements à 2.5mm et 5mm

- $I.CBR(2.5) = P1/13,35$

- $I.CBR(5) = P2/20$
- $I.C.B.R. = 100 * \text{Max} (P1/13,35 ; P2/20)$

On prend la plus grande valeur des deux, donc : $I.CBR = 32,03\%$.

II.3 Conclusion

Les essais d'identification permettent de déterminer les paramètres physiques qui nous aide à connaître la nature de sol et son état hydrique aussi les paramètres mécaniques pour savoir la portance et le calcul de la stabilité et le prédimensionnement des ouvrages géotechniques.

Tout d'abord, pour l'équivalent de sable et l'essai au bleu de méthylène sont deux essais de même but, mais l'essai au bleu de méthylène est mieux adapté pour mettre en évidence la présence de l'argile, qui est l'un des éléments de pollution les plus redoutés des sables et des granulats, c'est donc un progrès dans la mesure et le contrôle de la propreté des matériaux granulaires.

En suite, à partir de l'essai Proctor on peut déterminer la densité sèche maximale correspondante à la teneur en eau optimale parce que, lorsque la teneur en eau est raisonnable, l'eau joue un rôle de lubrifiant et la densité sèche augmente avec la teneur en eau jusqu'à un maximum (branche sèche). Par contre lorsque la teneur en eau est élevée (branche humide), l'eau absorbe une partie importante de l'énergie de compactage. Elle occupe la place des grains solides et aucun tassement n'est possible.

D'après la granulométrie et les valeurs de coefficient de Hazan, on peut estimer une classification de sable étudié selon LPC est un sable bien gradué.

D'après la granulométrie, valeur de VBS, et aussi la valeur de la teneur en eau on peut déterminer une classification selon GTR (norme NF-P11-300) de sable étudié, et on déduit que c'est un sable argileux sec.

CHAPITRE III

**Etude expérimentale de la
résistance mécanique des sols
renforcés par pneumatiques
usagés**

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

III.1 Introduction

L'étude de la résistance au cisaillement d'un sol constitue un problème complexe de la mécanique des sols. La résistance au cisaillement dépend du type de sol rencontré, suivant qu'il est cohérent ou non, que le matériau est grossier ou fin. Dans la résolution des problèmes de stabilité en mécanique des sols, il est nécessaire de connaître les paramètres de résistance au cisaillement du sol. Ainsi, l'angle de frottement interne et la cohésion interviennent dans les calculs de stabilité des barrages ou des digues par la tangente de l'angle de frottement (notée $\tan(\varphi)$) et par la cohésion effective (notée C) ou non drainée (notée C_u), dans les calculs de poussée par le coefficient de poussée active de la théorie de Rankine (K_a), ou encore dans la justification des fondations superficielles par la contrainte de rupture du sol (q_u).

Évaluer expérimentalement précisément les propriétés de résistance au cisaillement des sols constitue un enjeu important en mécanique des sols. En effet, de petites variations sur l'angle de frottement interne ou sur la cohésion peuvent induire des dimensionnements sensiblement différents des ouvrages géotechniques, et par exemple, avoir des impacts importants sur les volumes de sols à mettre en œuvre pour la réalisation d'un barrage en terre ou d'une digue (Bernard, et al., 2016).

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet de renforcement de sol par les granulats de pneumatique usagé sur les paramètres mécaniques, l'angle de frottement (φ) et la cohésion (C) par l'essai de cisaillement à la boîte, avec l'utilisation de deux diamètres (0-2mm, 0-4mm) des granulats de pneumatique usagé et avec différent pourcentage (10%, 20%, 30%, 40%, 50%) mélanger avec le sol, qu'on va déterminer sa granulométrie par la suite de ce travail. Donc, on veut confirmer si les granulats de pneu sont mieux pour la résistance aux cisaillements, et fixer son pourcentage optimum.

III.2 Granulométrie des granulats de pneumatique usagé

Pour déterminer la granulométrie des granulats de pneumatique usagé, on va utiliser une masse $M=1000g$, verser la masse au tamis supérieur et on met en suite le couvercle, on agite manuellement la colonne de tamis, jusqu'à ce que plus aucun élément ne passe à travers les mailles de chaque tamis. On pèse des refus cumulés, par différence on en déduit les tamisât cumulé et on prend les résultats. L'essai sera exécuté deux fois, pour deux diamètres différents.

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

a. Présentation des résultats

- Diamètre 0-2 mm

Tableau (III.1) Résultats d'une analyse granulométrique par tamisage des granulats de pneu usagé.

Poids de l'échantillon	Dimension Tamis (mm)	Poids des Refus partiels(g)	Poids des refus cumulés	%des refus cumulés	Complément à 100 des refus cumulés	Tamisât %
P=1000g	2	64	64	6,4	93,6	94
	1,6	220	284	28,4	71,6	72
	1,25	250	534	53,4	46,6	47
	1	201	735	73,5	26,5	27
	0,8	136	871	87,1	12,9	13
	0,63	40	911	91,1	8,9	9
	0,5	38	949	94,9	5,1	5
	0,4	20	969	96,9	3,1	3
	0,315	9	978	97,8	2,2	2
	0,25	5	986	98,6	1,4	1
	0,2	4	990	99,0	1	1
	0,16	3	993	99,3	0,7	1
	0,125	3	996	99,6	0,4	0
	0,1	2	998	99,8	0,2	0
0,08	0	998	99,8	0,2	0	

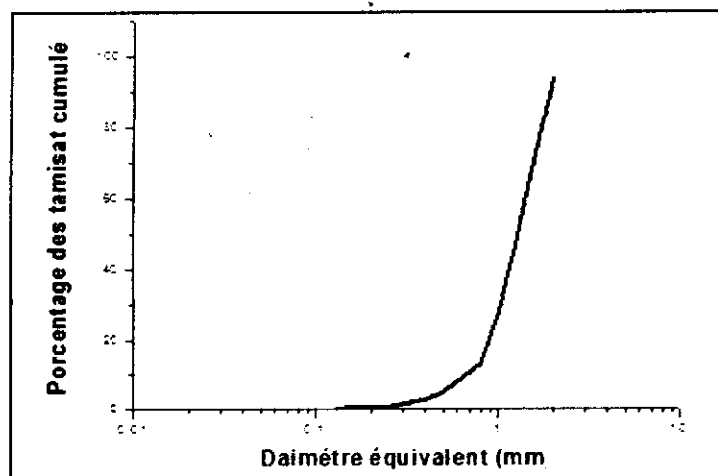


Figure (III.1) : Courbe granulométrique de pneu usagé.

Donc le diamètre le plus prépondérant des granulats de pneus usagés est entre 0 à 2 (mm).

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

- Diamètre 0-4mm

Tableau (III.2) Résultats d'une analyse granulométrique par tamisage des granulats de pneu usagé.

Poids de l'échantillon	Dimension Tamis (mm)	Poids des Refus partiels(g)	Poids des refus cumulés	%des refus cumulés	Complément à 100 des refus cumulés	Tamisât %
P=1000g	4	162	162	16,2	83,8	84
	3,15	297	459	45,9	54,1	54
	2,5	141	600	60,0	40	40
	2	109	709	70,9	29,1	29
	1,6	60	769	76,9	23,1	23
	1,25	85	854	85,4	14,6	15
	1	19	873	87,3	12,7	13
	0,8	51	924	92,4	7,6	8
	0,63	19	943	94,3	5,7	6
	0,5	14	957	95,7	4,3	4
	0,4	10	967	96,7	3,3	3
	0,315	14	981	98,1	1,9	2
	0,25	7	988	98,8	1,2	1
	0,2	3	991	99,1	0,9	1
	0,16	3	994	99,4	0,6	1
	0,125	2	996	99,6	0,4	0
0,1	1	997	99,7	0,3	0	
0,08	0	0	0	99,7	0,3	0

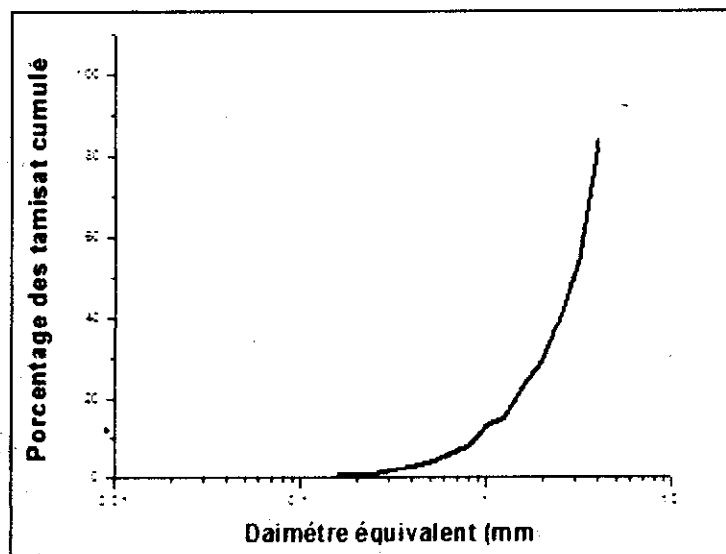


Figure (III.2) : Courbe granulométrique de pneu usagé.

Donc le diamètre le plus prépondérant des granulats de pneus usagés est entre 0 à 4 (mm).

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

III.3 Exécution de l'essai

III.3.1 Préparation de l'échantillon

On prend une quantité de sable séché et on le donne une teneur en eau égale à sa teneur en eau naturelle, on mélange avec des différents pourcentages des granulats de pneu 10%, 20%, 30%, 40% et 50% et on mesure la force de cisaillement et son déplacement. (Voir le chapitre 2 pour la suite de la manipulation)

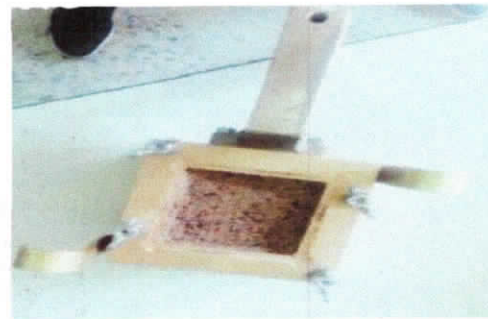


Figure (III.3) : Echantillon sable et granulats de pneu.

Figure (III.4) : boîtier de cisaillement.

III.3.2 Résultats et discussion

a- Sable non renforcé

Tableau (III.3) : Lecture de l'essai de cisaillement pour l'état humide et pour $\sigma=1$ bar.

t (s)	Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	Sc= l (l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (kPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,16	0,052	0,092	3590,4	25,624	0,003
30	0,46	0,072	0,124	3572,4	34,711	0,008
45	0,73	0,088	0,148	3556,2	41,617	0,012
60	1,01	0,1	0,17	3539,4	48,031	0,017
75	1,3	0,112	0,194	3522	55,082	0,022
90	1,59	0,122	0,212	3504,6	60,492	0,027
105	1,88	0,128	0,228	3487,2	65,382	0,031
120	2,17	0,134	0,228	3469,8	65,710	0,036
135	2,47	0,135	0,23	3451,8	66,632	0,041
150	2,76	0,136	0,234	3434,4	68,134	0,046
165	3,06	0,136	0,234	3416,4	68,493	0,051
180	3,37	0,132	0,224	3397,8	65,925	0,056
195	3,67	0,13	0,22	3379,8	65,093	0,061

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

D'après le tableau : $\tau_{\max} = 68,49$ (kPa).

Tableau (III.4) : Lecture de l'essai de cisaillement pour l'état humide et pour $\sigma=2$ bar.

t (s)	Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	Sc= l (l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (kPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,17	0,07	0,12	3589,8	33,428	0,003
30	0,44	0,09	0,15	3573,6	41,974	0,007
45	0,71	0,12	0,21	3557,4	59,032	0,012
60	0,99	0,13	0,22	3540,6	62,136	0,017
75	1,27	0,15	0,26	3523,8	73,784	0,021
90	1,54	0,17	0,29	3507,6	82,678	0,026
105	1,84	0,19	0,33	3489,6	94,567	0,031
120	2,11	0,2	0,34	3473,4	97,887	0,035
135	2,39	0,21	0,36	3456,6	104,149	0,040
150	2,68	0,22	0,38	3439,2	110,491	0,045
165	2,99	0,225	0,385	3420,6	112,553	0,050
180	3,28	0,227	0,387	3403,2	113,717	0,055
195	3,59	0,225	0,385	3384,6	113,751	0,060

D'après le tableau : $\tau_{\max} = 113,75$ (kPa).

Tableau (III.5) : Lecture de l'essai de cisaillement pour l'état humide et pour $\sigma=3$ bar.

t (s)	Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	Sc= l (l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (kPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,12	0,06	0,1	3592,8	27,833	0,002
30	0,34	0,115	0,2	3579,6	55,872	0,006
45	0,59	0,17	0,29	3564,6	81,356	0,010
60	0,84	0,212	0,36	3549,6	101,420	0,014
75	1,09	0,248	0,426	3534,6	120,523	0,018
90	1,36	0,27	0,46	3518,4	130,741	0,023
105	1,63	0,3	0,51	3502,2	145,623	0,027
120	1,99	0,32	0,55	3480,6	158,019	0,033
135	2,16	0,34	0,58	3470,4	167,128	0,036
150	2,45	0,35	0,6	3453	173,762	0,041
165	2,73	0,364	0,624	3436,2	181,596	0,046
180	3,02	0,364	0,624	3418,8	182,520	0,050
195	3,32	0,35	0,6	3400,8	176,429	0,055
210	3,63	0,35	0,6	3382,2	177,399	0,061

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

D'après le tableau : $\tau_{\max} = 182,52$ (KPa).

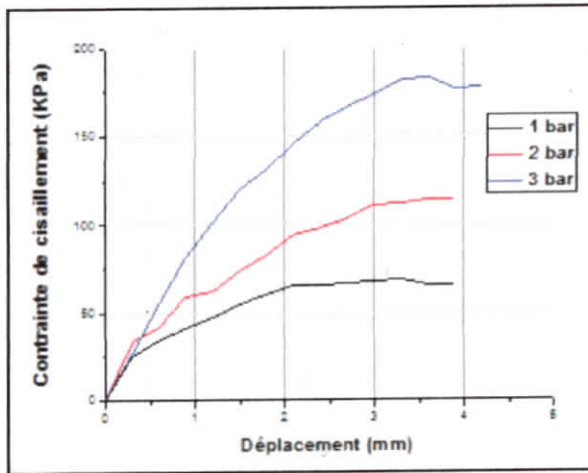


Figure (III.5) : Courbe contrainte – déplacement
(Sable non renforcé).

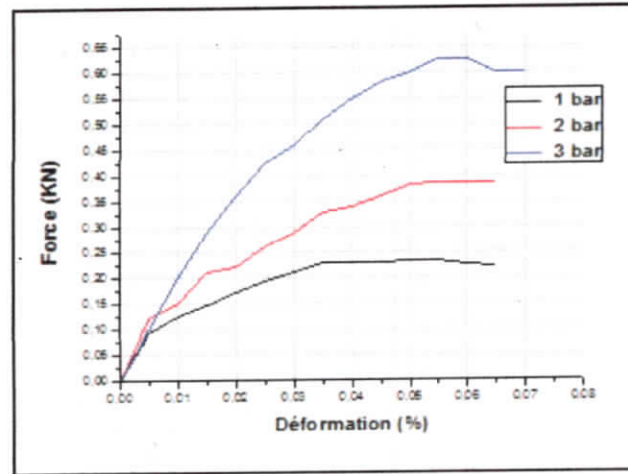


Figure (III.6) : Courbe force – déformation pour
(Sable non renforcé).

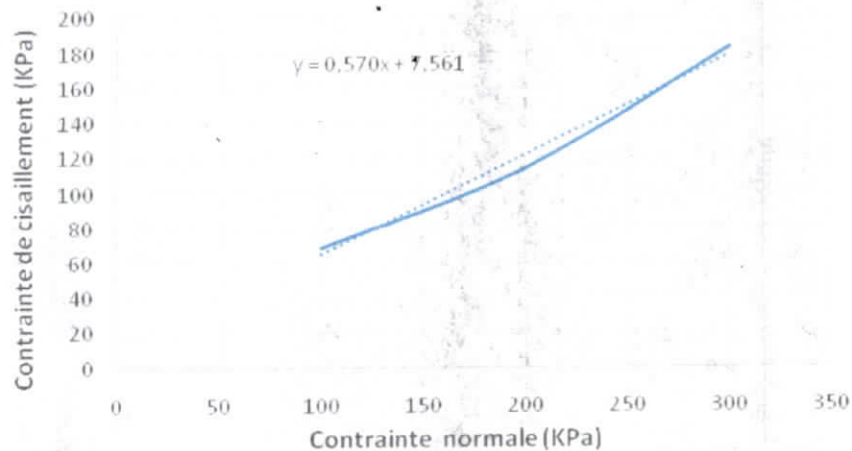


Figure (III.7) : Courbe intrinsèque pour le sable non renforcé.

- Résultats pour les granulats de pneu (0-2) mm.

D'après la courbe intrinsèque il y a une ligne droite qui correspond à l'équation : $\tau = A\sigma + B$, par l'identification avec l'équation de coulomb : $\tau = \sigma \operatorname{tg}\varphi + C$

On aura : $A = \operatorname{tg} \varphi = 0,578$,

$\varphi = \operatorname{arc} \operatorname{tg}(0,570) = 29,68^\circ$

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

B = C = 7,561 KPa

a. Sable renforcé par 10% des granulats de pneu

Tableau (III.6) : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=1$ bar avec 10% des granulats de pneu 0-2(mm).

t (s)	Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	Sc= l(l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (kPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0,000	3600	0,000	0,000
15	0,2	0,02	0,034	3588	9,476	0,003
30	0,5	0,025	0,043	3570	11,905	0,008
45	0,79	0,028	0,048	3552,6	13,399	0,013
60	1,09	0,032	0,054	3534,6	15,391	0,018
75	1,38	0,035	0,060	3517,2	16,917	0,023
90	1,68	0,038	0,065	3499,2	18,461	0,028
105	1,97	0,042	0,071	3481,8	20,507	0,033
120	2,26	0,048	0,082	3464,4	23,554	0,038
135	2,56	0,052	0,088	3446,4	25,650	0,043
150	2,85	0,055	0,094	3429	27,267	0,048
165	3,15	0,058	0,099	3411	28,906	0,053
180	3,45	0,062	0,105	3393	31,064	0,058
195	3,73	0,066	0,112	3376,2	33,233	0,062
210	4,03	0,07	0,119	3358,2	35,436	0,067
225	4,34	0,074	0,126	3339,6	37,669	0,072
240	4,63	0,078	0,133	3322,2	39,913	0,077
255	4,95	0,08	0,136	3303	41,175	0,083
270	5,21	0,082	0,139	3287,4	42,404	0,087
285	5,52	0,085	0,145	3268,8	44,206	0,092
300	5,81	0,088	0,150	3251,4	46,011	0,097
315	6,09	0,085	0,145	3234,6	44,673	0,102

D'après le tableau : $\tau_{\max} = 46,01(\text{kPa})$.

Tableau (III.7): Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=2$ bar avec 10% des granulats de pneu 0-2(mm).

t (s)	Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	Sc= l(l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0,000	3600	0,000	0,000
15	0,25	0,044	0,075	3585	20,865	0,004
30	0,54	0,06	0,102	3567,6	28,591	0,009
45	0,77	0,07	0,119	3553,8	33,485	0,013

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

60	1,06	0,08	0,136	3536,4	38,457	0,018
75	1,32	0,092	0,156	3520,8	44,422	0,022
90	1,61	0,1	0,170	3503,4	48,524	0,027
105	1,9	0,108	0,184	3486	52,668	0,032
120	2,21	0,112	0,190	3467,4	54,911	0,037
135	2,5	0,115	0,196	3450	56,667	0,042
150	2,8	0,118	0,201	3432	58,450	0,047
165	3,08	0,122	0,207	3415,2	60,729	0,051
180	3,41	0,124	0,211	3395,4	62,084	0,057
195	3,7	0,127	0,216	3378	63,914	0,062
210	4	0,13	0,221	3360	65,774	0,067
225	4,28	0,135	0,230	3343,2	68,647	0,071
240	4,56	0,137	0,233	3326,4	70,016	0,076
255	4,85	0,135	0,230	3309	69,356	0,081

D'après le tableau : $\tau_{\max} = 70,01(\text{kPa})$.

**Tableau (III.8) : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=3$ bar avec
10% des granulats de pneu 0-2(mm).**

t (s)	Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	Sc= l (l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (kPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0,000	0,000
15	0,27	0,045	0,06	3583,8	16,742	0,005
30	0,54	0,052	0,092	3567,6	25,788	0,009
45	0,84	0,065	0,11	3549,6	30,989	0,014
60	1,13	0,078	0,136	3532,2	38,503	0,019
75	1,43	0,082	0,142	3514,2	40,407	0,024
90	1,72	0,09	0,15	3496,8	42,896	0,029
105	2	0,095	0,16	3480	45,977	0,033
120	2,3	0,1	0,17	3462	49,105	0,038
135	2,6	0,108	0,186	3444	54,007	0,043
150	2,9	0,11	0,19	3426	55,458	0,048
165	3,19	0,118	0,206	3408,6	60,435	0,053
180	3,48	0,125	0,215	3391,2	63,399	0,058
195	3,78	0,13	0,22	3373,2	65,220	0,063
210	4,08	0,135	0,23	3355,2	68,550	0,068
225	4,39	0,14	0,24	3336,6	71,930	0,073
240	4,68	0,15	0,26	3319,2	78,332	0,078
255	4,97	0,16	0,27	3301,8	81,774	0,083
270	5,18	0,165	0,28	3289,2	85,127	0,086
285	5,47	0,172	0,294	3271,8	89,859	0,091

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

300	5,72	0,178	0,306	3256,8	93,957	0,095
315	5,97	0,185	0,32	3241,8	98,710	0,099
300	6,14	1,82	0,33	3231,6	102,116	0,102

D'après le tableau : $\tau_{\max} = 86,34$ (Kpa).

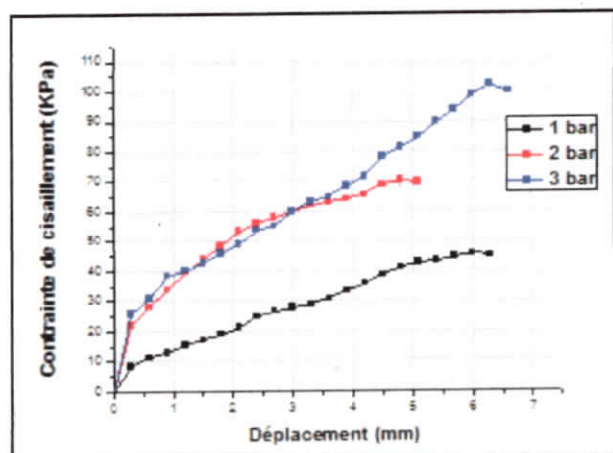


Figure (III.8) : Courbe contrainte – déplacement
(10% des granulats de pneu)

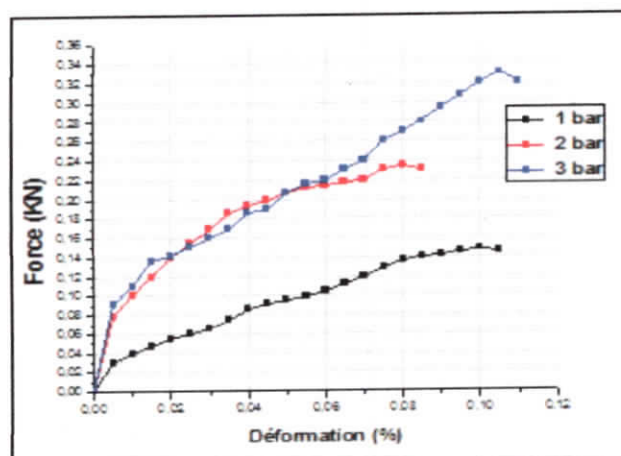


Figure (III.9) : Courbe force – déformation
(10% des granulats de pneu).

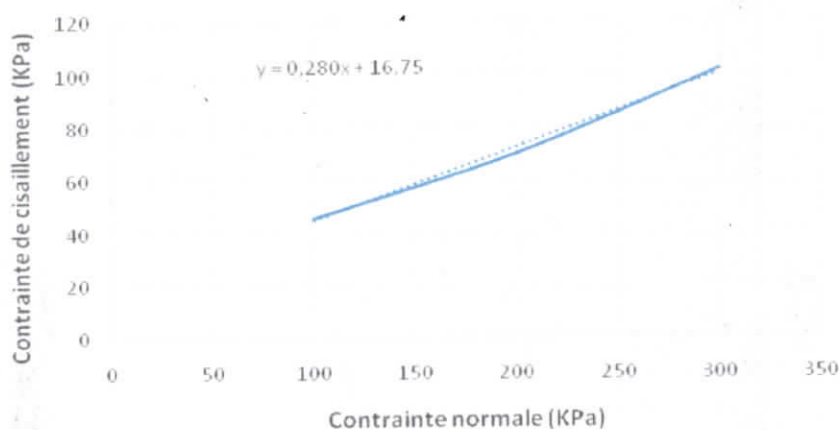


Figure (III.10) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé
(10% des granulats de pneu).

D'après la courbe intrinsèque il y a une ligne droite qui correspond à l'équation : $\tau = A\sigma + B$, par l'identification avec l'équation de coulomb : $\tau = \sigma \operatorname{tg}\varphi + C$

On aura : $A = \operatorname{tg} \varphi = 0,28$

$\varphi = \operatorname{arc} \operatorname{tg}(0,28) = 15,64^\circ$

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

B = C = 16,75 KPa

b. Sable renforcé par 20% de puce de pneu

Tableau (III.9) : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=1$ bar avec 20% des granulats de pneu 0-2(mm).

t (s)	Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	Sc= l(l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (kPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,21	0,025	0,04	3587,4	11,150	0,004
30	0,5	0,037	0,064	3570	17,927	0,008
45	0,8	0,045	0,08	3552	22,523	0,013
60	1,1	0,05	0,09	3534	25,467	0,018
75	1,4	0,055	0,095	3516	27,019	0,023
90	1,69	0,057	0,097	3498,6	27,725	0,028
105	1,99	0,059	0,099	3480,6	28,443	0,033
120	2,3	0,06	0,1	3462	28,885	0,038
135	2,55	0,06	0,1	3447	29,011	0,043
150	2,92	0,062	0,104	3424,8	30,367	0,049
165	3,24	0,062	0,104	3405,6	30,538	0,054
180	3,52	0,065	0,11	3388,8	32,460	0,059
195	3,82	0,067	0,114	3370,8	33,820	0,064
210	4,14	0,067	0,114	3351,6	34,014	0,069
225	4,41	0,069	0,118	3335,4	35,378	0,074
240	4,71	0,069	0,118	3317,4	35,570	0,079
255	5,03	0,067	0,114	3298,2	34,564	0,084

D'après le tableau : $\tau_{max} = 35,570$ (kPa).

Tableau (III.10) : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=2$ bar avec 20% des granulats de pneu 0-2(mm).

t (s)	Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	Sc= l(l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,2	0,02	0,03	3588	8,361	0,003
30	0,5	0,025	0,04	3570	11,204	0,008
45	0,79	0,028	0,046	3552,6	12,948	0,013
60	1,09	0,032	0,054	3534,6	15,278	0,018
75	1,38	0,035	0,06	3517,2	17,059	0,023
90	1,68	0,038	0,066	3499,2	18,861	0,028
105	1,97	0,042	0,074	3481,8	21,253	0,033

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

120	2,26	0,048	0,086	3464,4	24,824	0,038
135	2,56	0,052	0,092	3446,4	26,695	0,043
150	2,85	0,055	0,095	3429	27,705	0,048
165	3,15	0,058	0,098	3411	28,731	0,053
180	3,45	0,062	0,104	3393	30,651	0,058
195	3,73	0,066	0,112	3376,2	33,173	0,062
210	4,03	0,07	0,12	3358,2	35,733	0,067
225	4,34	0,074	0,128	3339,6	38,328	0,072
240	4,63	0,078	0,136	3322,2	40,937	0,077
255	4,95	0,08	0,14	3303	42,386	0,083
270	5,21	0,082	0,142	3287,4	43,195	0,087
285	5,52	0,085	0,145	3268,8	44,359	0,092
300	5,81	0,088	0,148	3251,4	45,519	0,097
315	6,12	0,088	0,148	3232,8	45,781	0,102
330	6,4	0,085	0,145	3216	45,087	0,107

D'après le tableau : $\tau_{\max} = 45,781$ (Kpa).

**Tableau (III.11) : Lectures de l'essai de cisaillement pour $\sigma=3$ bar avec
20% des granulats de pneu 0-2(mm).**

t (s)	Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	Sc= l(l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,19	0,03	0,05	3588,6	13,933	0,003
30	0,48	0,045	0,08	3571,2	22,401	0,008
45	0,77	0,05	0,09	3553,8	25,325	0,013
60	1,06	0,59	0,099	3536,4	27,995	0,018
75	1,35	0,065	0,11	3519	31,259	0,023
90	1,63	0,07	0,12	3502,2	34,264	0,027
105	1,93	0,075	0,13	3484,2	37,311	0,032
120	2,22	0,08	0,14	3466,8	40,383	0,037
135	2,55	0,085	0,145	3447	42,066	0,043
150	2,83	0,09	0,15	3430,2	43,729	0,047
165	3,12	0,095	0,16	3412,8	46,882	0,052
180	3,4	0,1	0,17	3396	50,059	0,057
195	3,69	0,105	0,18	3378,6	53,277	0,062
210	3,98	0,11	0,19	3361,2	56,527	0,066
225	4,29	0,112	0,194	3342,6	58,039	0,072
240	4,59	0,112	0,194	3324,6	58,353	0,077
255	4,95	0,112	0,194	3303	58,734	0,083
270	5,18	0,115	0,2	3289,2	60,805	0,086
285	5,49	0,11	0,19	3270,6	58,093	0,092

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

D'après le tableau : $\tau_{max} = 60,80$ (Kpa).

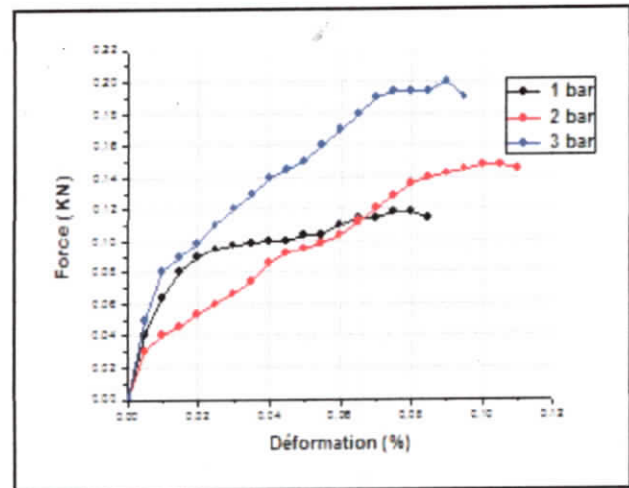
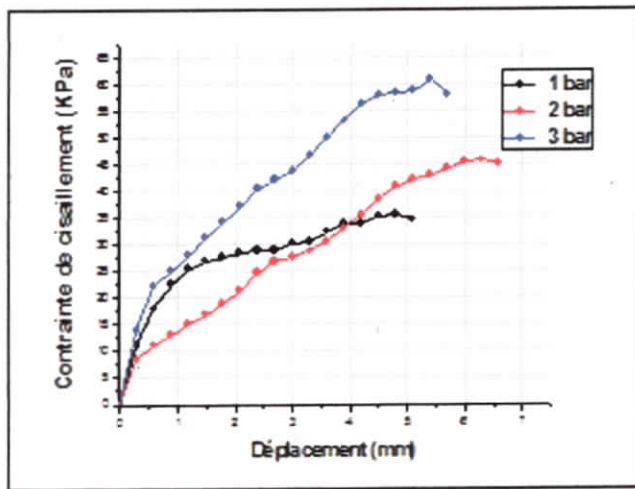


Figure (III.11) : Courbe contrainte – déplacement
(20% des granulats de pneu).

Figure (III.12) : courbe force – déformation pour
(20% des granulats de pneu).

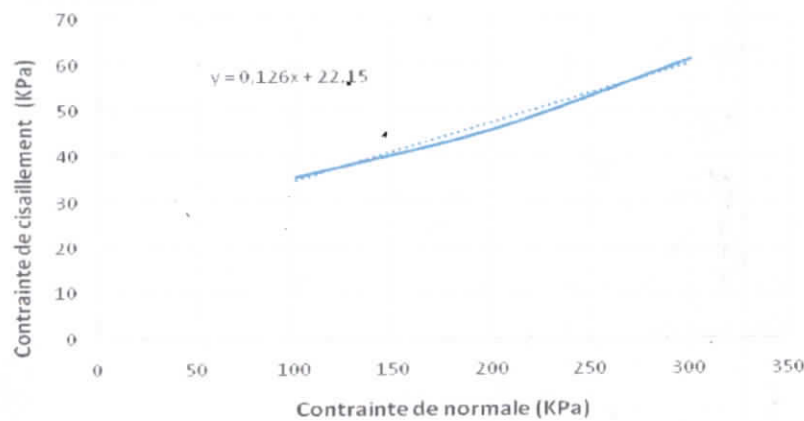


Figure (III.13) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé
(20% des granulats de pneu).

D'après la courbe intrinsèque il y a une ligne droite qui correspond à l'équation : $\tau = A\sigma + B$, par l'identification avec l'équation de coulomb : $\tau = \sigma \operatorname{tg}\phi + C$

On aura : $A = \operatorname{tg}\phi = 0,126$

$\phi = \operatorname{arc}\operatorname{tg}(0,126) = 7,18^\circ$

$B = C = 22,15$ KPa.

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

Remarque : les tableaux de reste des courbes sont dans l'annexe 1

c. Sable renforcé par 30 % des granulats de pneu

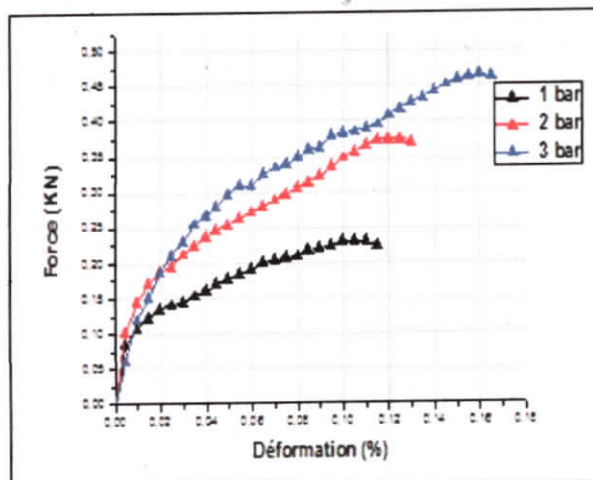
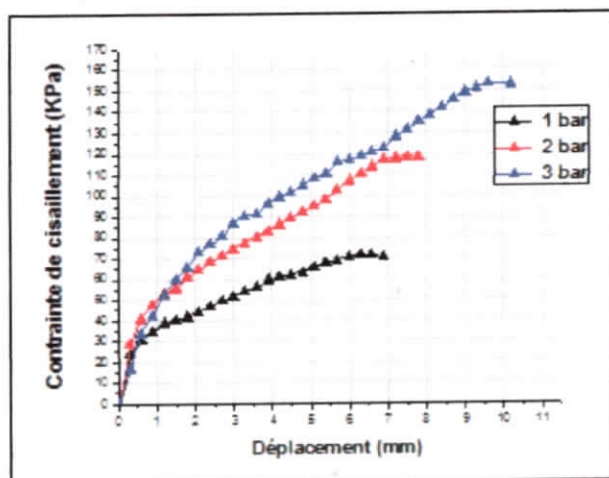


Figure (III.14) : Courbe contrainte – déplacement

(30% des granulats de pneu).

Figure (III.15) : courbe force – déformation pour

(30% des granulats de pneu).

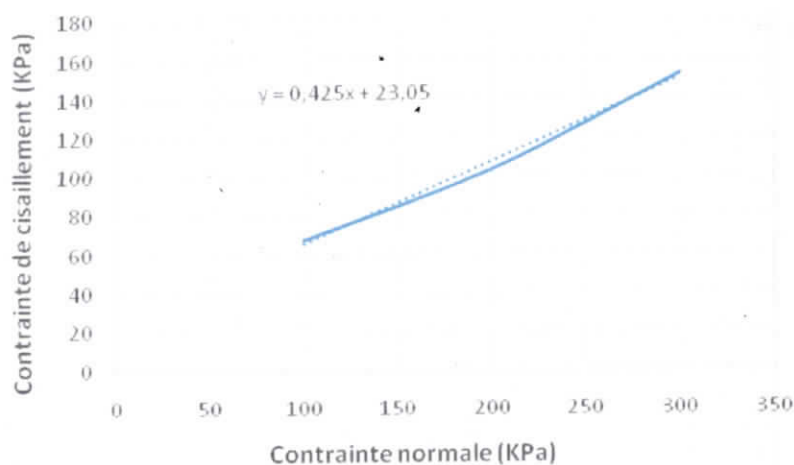


Figure (III.16) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé

(30% des granulats de pneu).

D'après la courbe intrinsèque il y a une ligne droite qui correspond à l'équation : $\tau = A\sigma + B$, par l'identification avec l'équation de coulomb : $\tau = \sigma \operatorname{tg}\varphi + C$

On aura : $A = \operatorname{tg}\varphi = 0,425$

$\varphi = \operatorname{arc}\operatorname{tg}(0,425) = 23,05^\circ$

$B = C = 23,05 \text{ KPa}$.

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

d. Sable renforcé par 40 % des granulats de pneu

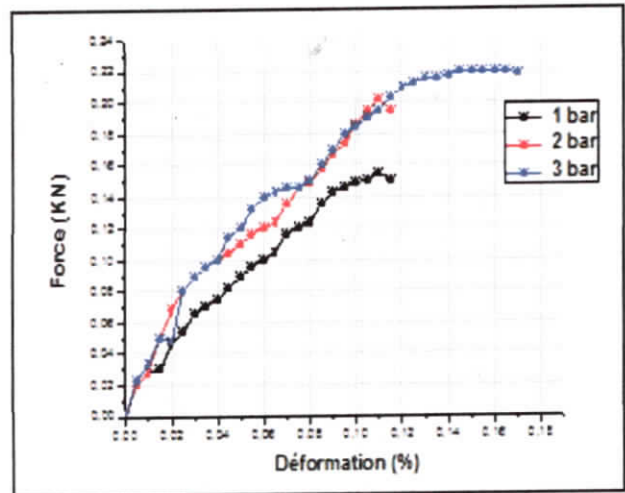
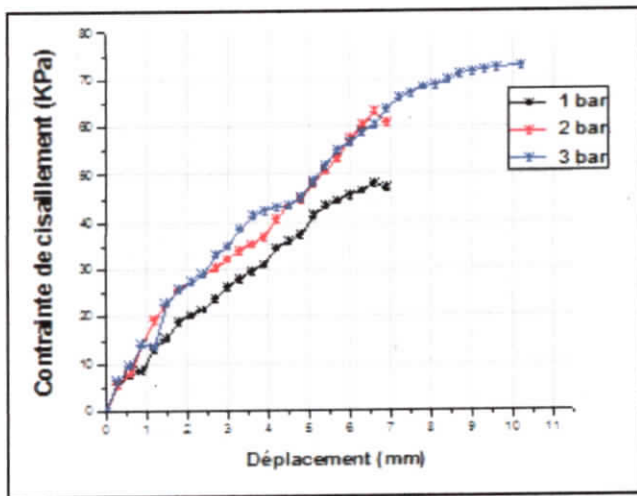


Figure (III.17) : Courbe contrainte – déplacement
(40% des granulats de pneu).

Figure (III.18) : courbe force – déformation pour
(40% des granulats de pneu).

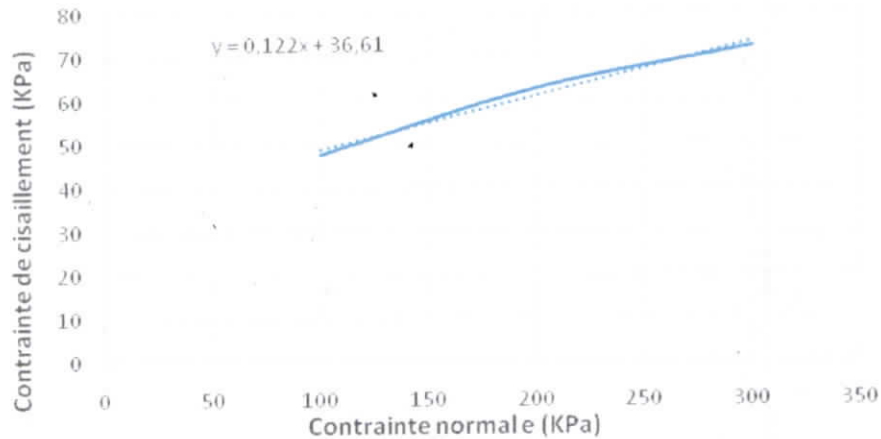


Figure (III.19) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé
(40% des granulats de pneu).

D'après la courbe intrinsèque il y a une ligne droite qui correspond à l'équation : $\tau = A\sigma + B$, par l'identification avec l'équation de coulomb : $\tau = \sigma \operatorname{tg}\varphi + C$

On aura : $A = \operatorname{tg} \varphi = 0,122$

$\varphi = \operatorname{arc} \operatorname{tg}(0,122) = 6,95^\circ$

$B = C = 36,61 \text{ KPa}$.

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

e. Sable renforcé par 50 % des granulats de pneu

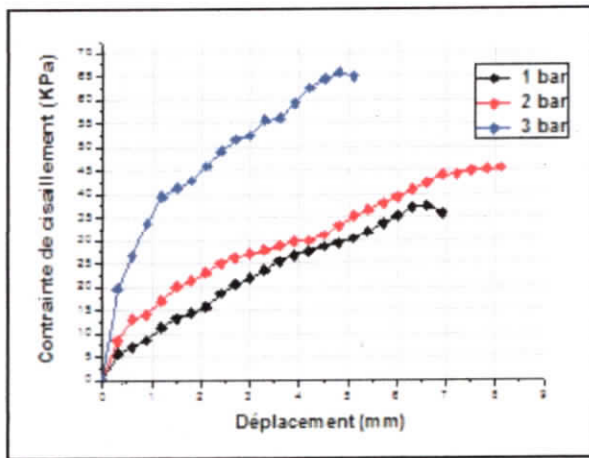


Figure (III.20) : Courbe contrainte – déplacement
(50% des granulats de pneu).

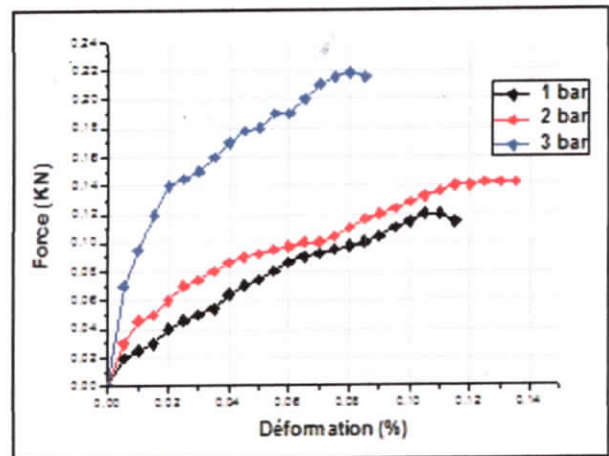


Figure (III.21) : courbe force – déformation
(50% des granulats de pneu).

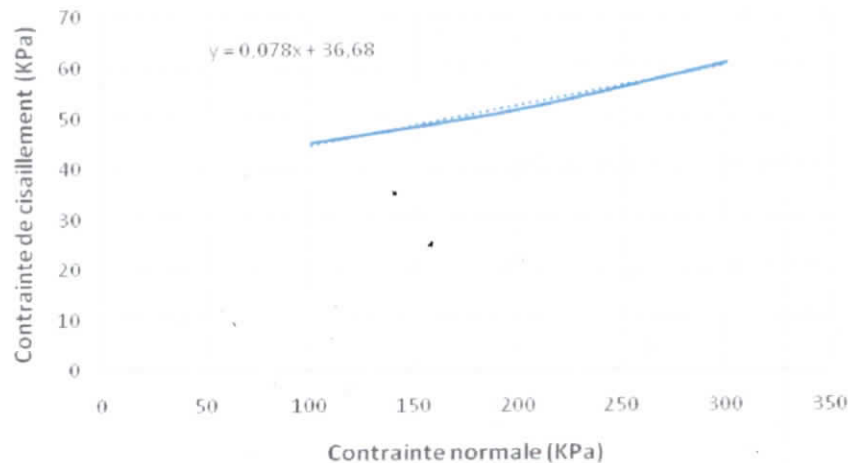


Figure (III.22) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé
(50% des granulats de pneu).

D'après la courbe intrinsèque il y a une ligne droite qui correspond à l'équation : $\tau = A\sigma + B$, par l'identification avec l'équation de coulomb : $\tau = \sigma \operatorname{tg}\varphi + C$

On aura : $A = \operatorname{tg}\varphi = 0,078$

$\varphi = \operatorname{arc}\operatorname{tg}(0,078) = 4,46^\circ$

$B = C = 36,68 \text{ KPa}$.

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

Les courbes contrainte –déplacement et force-déformation pneu 0-2 mm :

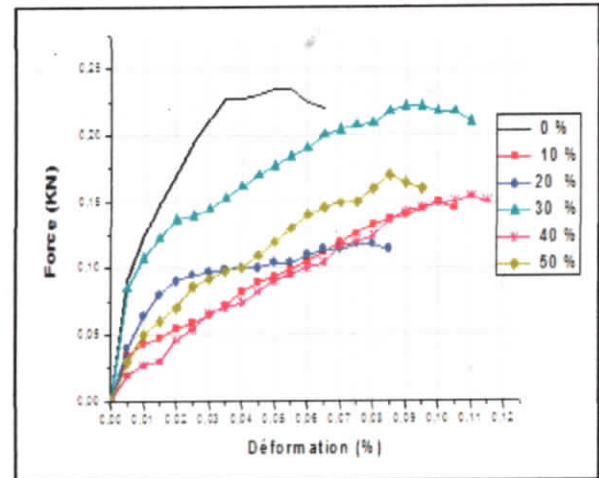
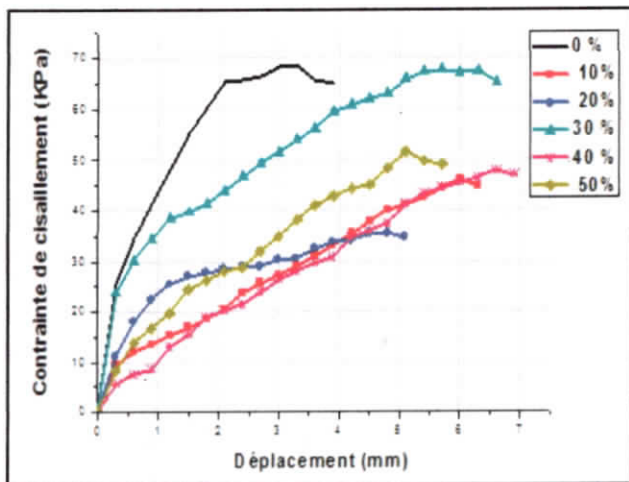


Figure (III.23) : Courbes contrainte-déplacement 1 bar

Figure (III.24) : Courbe force-déformation 1 bar

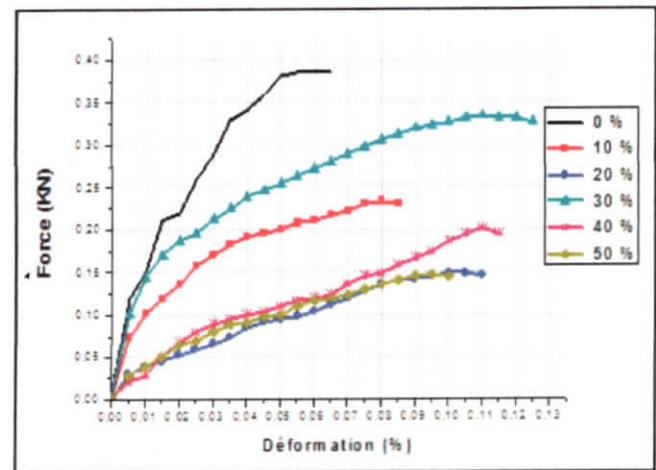
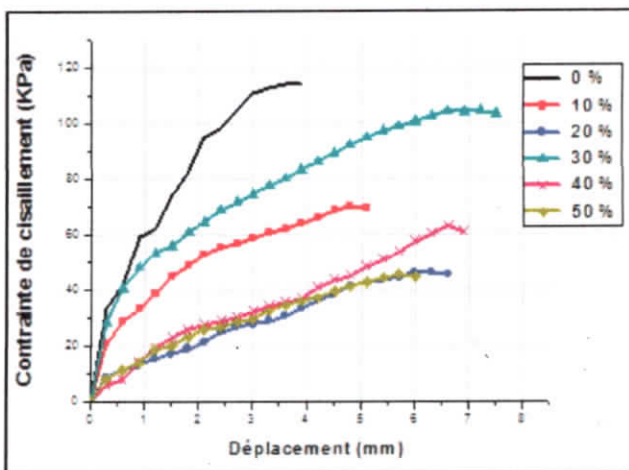


Figure (III.25) : Courbes contrainte-déplacement 2 bar

Figure (III.26) : Courbe force-déformation 2 bar

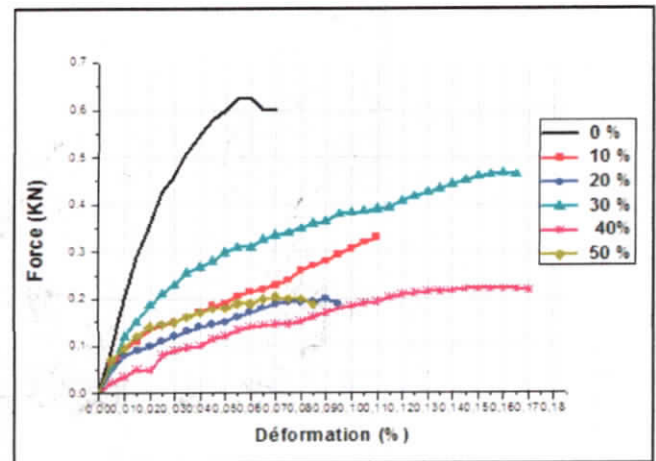
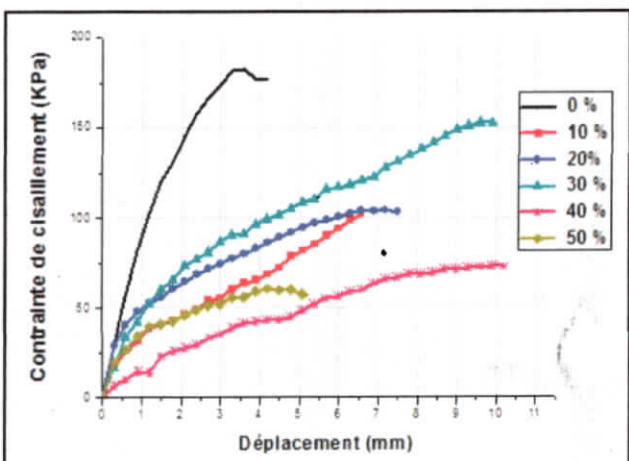


Figure (III.27) : Courbes contrainte-déplacement 3 bar

Figure (III.28) : Courbe force-déformation 3 bar

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

Les résultats pour granulats de pneu 0-4mm

a. Sable renforcé par 10% de granulats de pneu

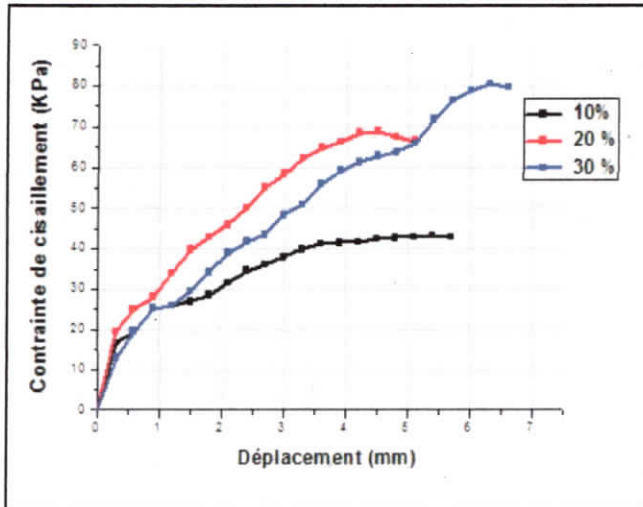


Figure (III.29) : Courbe contrainte – déplacement
(10% des granulats de pneu).

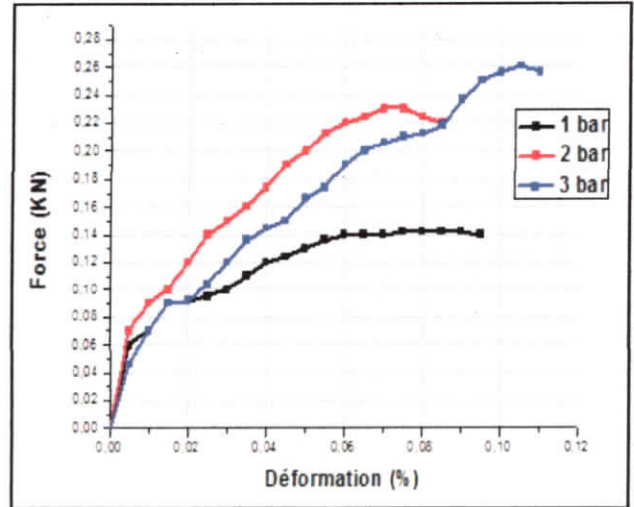


Figure (III.30) : courbe force – déformation pour
(10% des granulats de pneu).

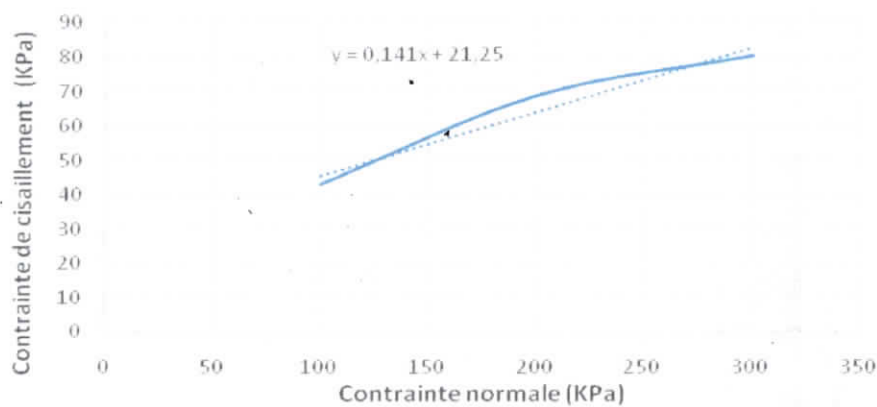


Figure (III. 31) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé
(10% des granulats de pneu).

D'après la courbe intrinsèque il y a une ligne droite qui correspond à l'équation : $\tau = A\sigma + B$, par l'identification avec l'équation de coulomb : $\tau = \sigma \operatorname{tg}\varphi + C$

On aura : $A = \operatorname{tg} \varphi = 0,141$

$\varphi = \operatorname{arc} \operatorname{tg}(0,141) = 8,08$

$B = C = 21,25 \text{ KPa}$.

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

b. Sable renforcé par 20% de granulats de pneu

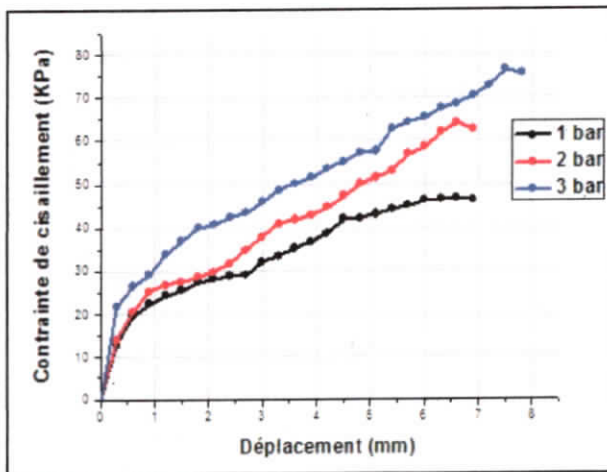


Figure (III.32) : Courbe contrainte – déplacement
(20% des granulats de pneu).

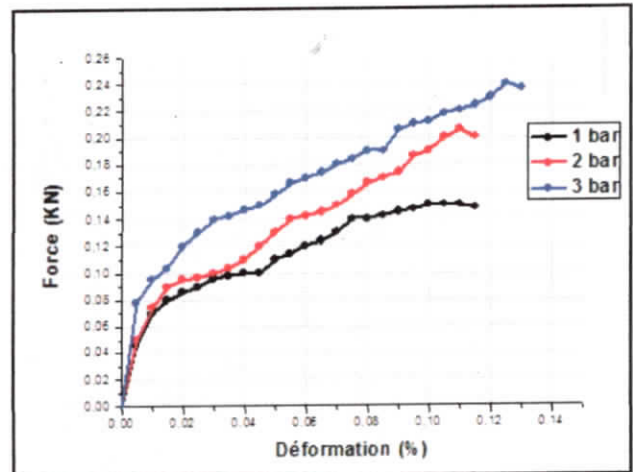


Figure (III.33) : courbe force – déformation
(20% des granulats de pneu).

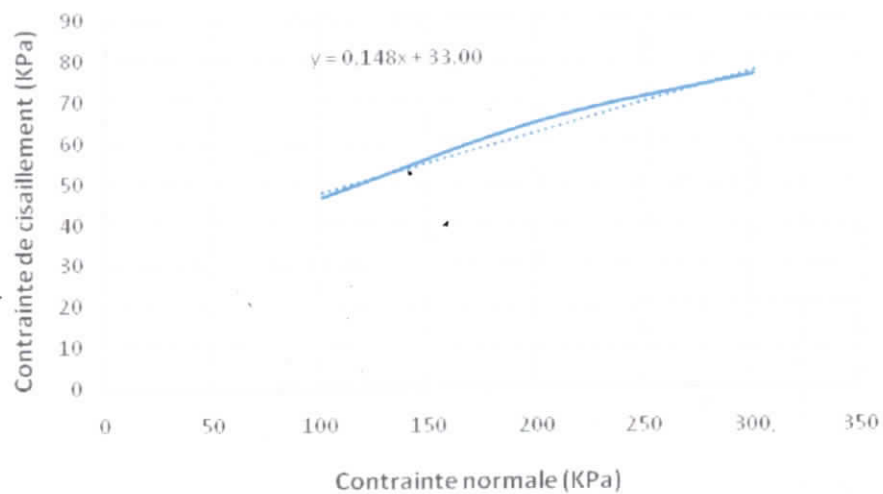


Figure (III. 34) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé
(20% des granulats de pneu).

D'après la courbe intrinsèque il y a une ligne droite qui correspond à l'équation : $\tau = A\sigma + B$, par l'identification avec l'équation de coulomb : $\tau = \sigma \operatorname{tg}\varphi + C$

On aura : $A = \operatorname{tg} \varphi = 0,148$

$\varphi = \operatorname{arc} \operatorname{tg}(0,148) = 8,3$

$B = C = 33 \text{ KPa}$.

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

c. Sable renforcé par 30% de granulats de pneu

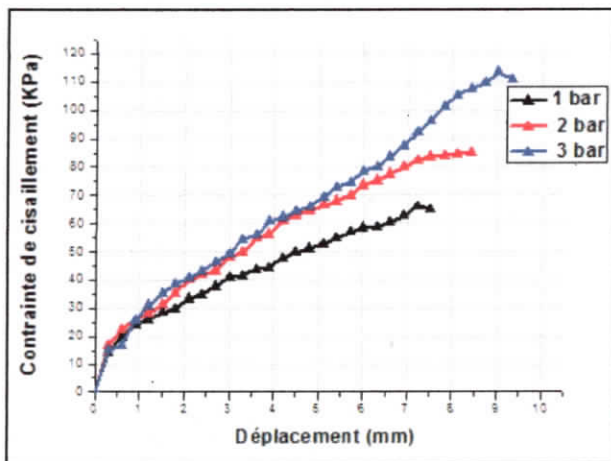


Figure (III.35) : Courbe contrainte – déplacement (30% des granulats de pneu).

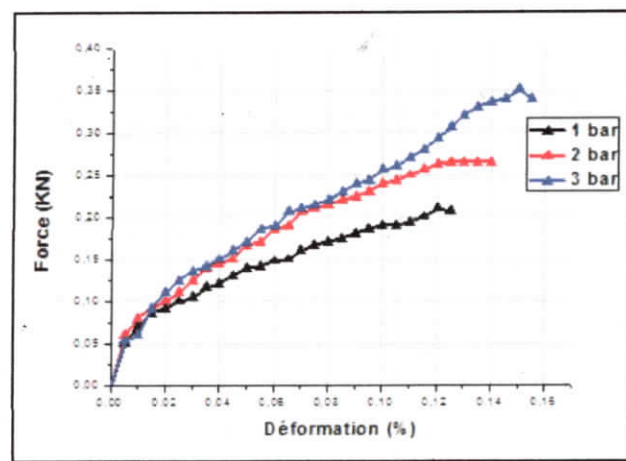


Figure (III.36) : courbe force – déformation pour (30% des granulats de pneu).

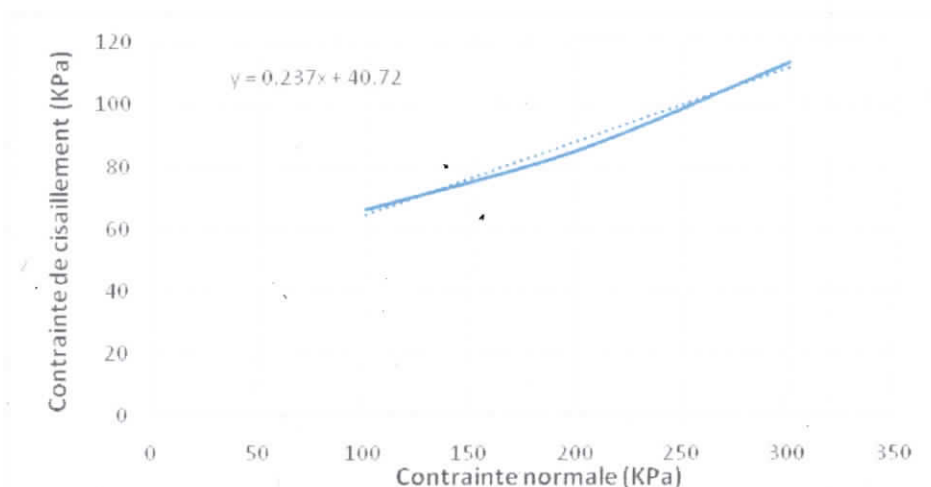


Figure (III. 37) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé (30% des granulats de pneu).

D'après la courbe intrinsèque il y a une ligne droite qui correspond à l'équation : $\tau = A\sigma + B$, par l'identification avec l'équation de coulomb : $\tau = \sigma \operatorname{tg}\varphi + C$

On aura : $A = \operatorname{tg} \varphi = 0,273$

$\varphi = \operatorname{arc} \operatorname{tg}(0,237) = 13,33$

$B = C = 40,72 \text{ KPa.}$

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

d. Sable renforcé par 40% de granulats de pneu

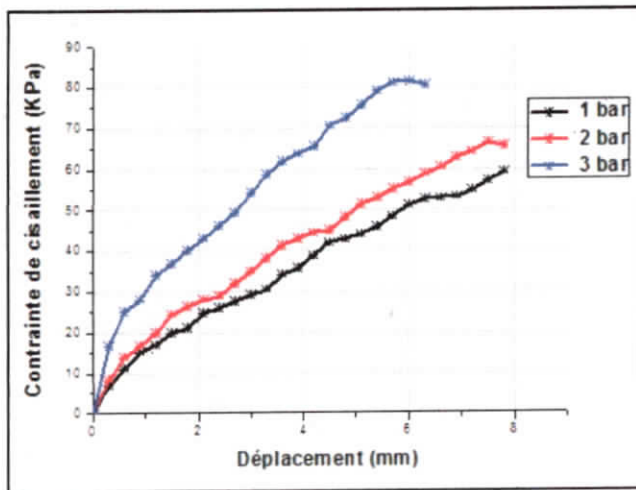


Figure (III.38) : Courbe contrainte – déplacement
(40% des granulats de pneu).

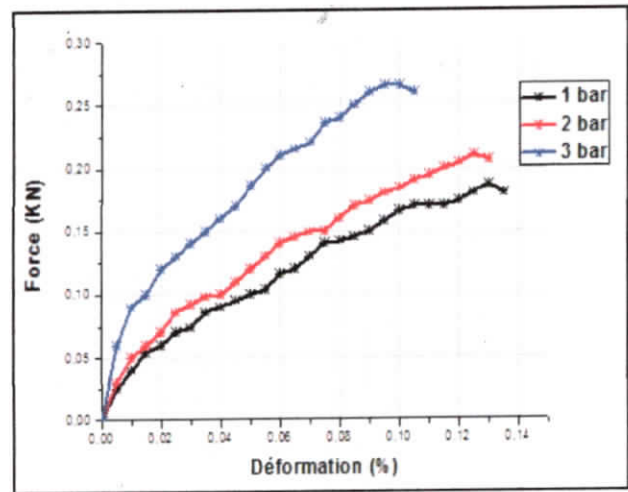


Figure (III.39) : courbe force – déformation pour
(40% des granulats de pneu).

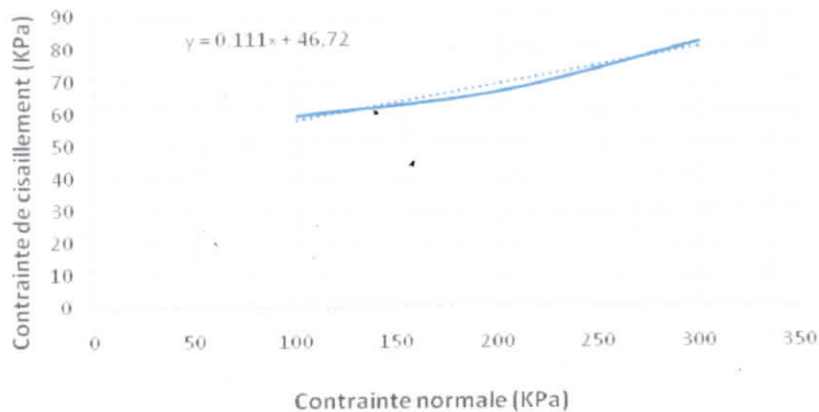


Figure (III. 40) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé
(40% des granulats de pneu).

D'après la courbe intrinsèque il y a une ligne droite qui correspond à l'équation : $\tau = A\sigma + B$, par l'identification avec l'équation de coulomb : $\tau = \sigma \operatorname{tg}\varphi + C$

On aura : $A = \operatorname{tg} \varphi = 0,111$

$\varphi = \operatorname{arc} \operatorname{tg}(0,111) = 6,33$

$B = C = 46,72 \text{ KPa}$.

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

e. Sable renforcé par 50% de granulats de pneu

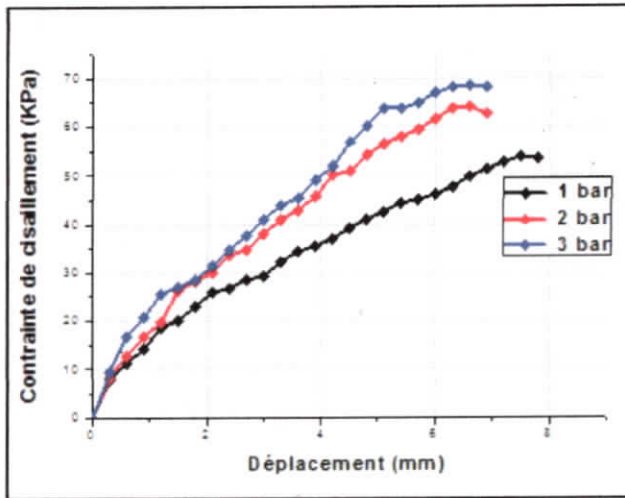


Figure (III.41) : Courbe contrainte – déplacement
(50% des granulats de pneu).

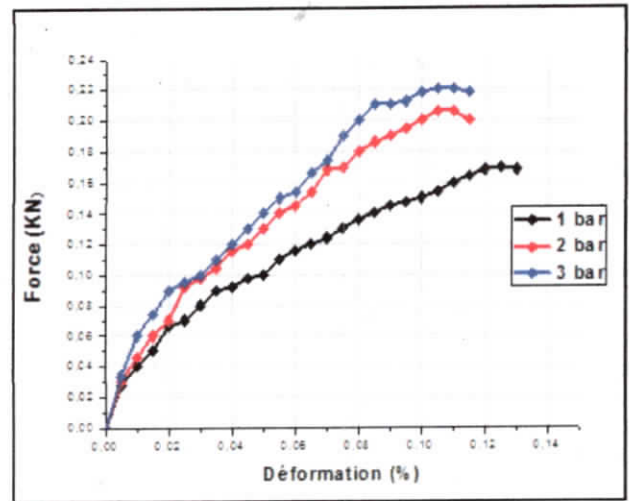


Figure (III.42) : courbe force – déformation
(50% des granulats de pneu).

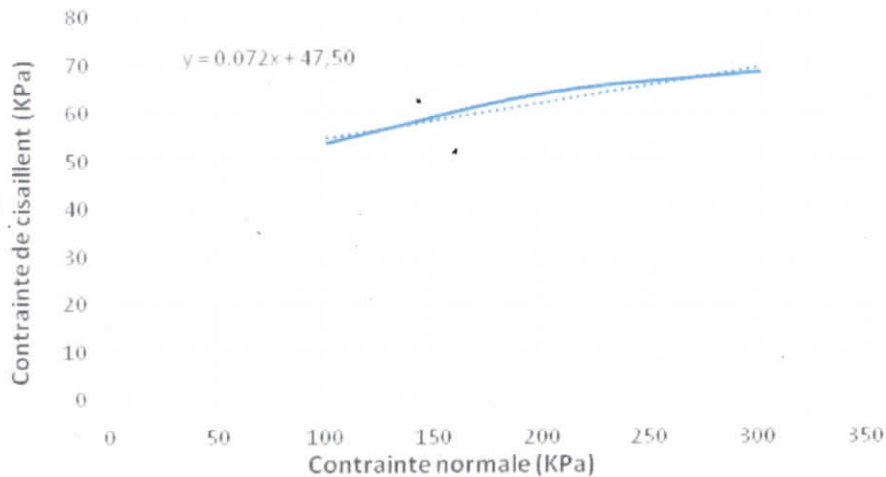


Figure (III. 43) : courbe intrinsèque pour le sable renforcé
(50% des granulats de pneu).

D'après la courbe intrinsèque il y a une ligne droite qui correspond à l'équation : $\tau = A\sigma + B$, par l'identification avec l'équation de coulomb : $\tau = \sigma \operatorname{tg}\varphi + C$

On aura : $A = \operatorname{tg} \varphi = 0,072$

$\varphi = \operatorname{arc} \operatorname{tg}(0,072) = 4,11$

$B = C = 47,5 \text{ KPa}$.

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

Les courbes contrainte –déplacement et force-déformation 0-4mm :

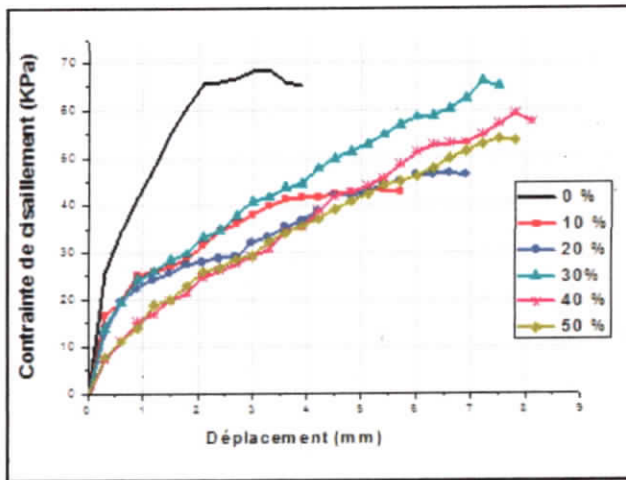


Figure (III.44) : Courbes contrainte-déplacement 1 bar

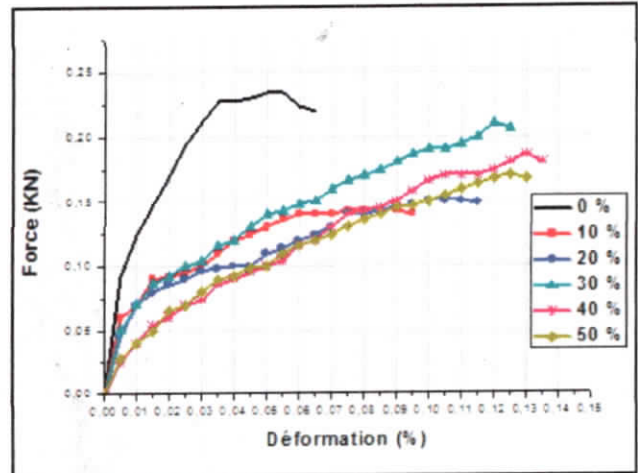


Figure (III.45) : Courbe force-déformation 1 bar

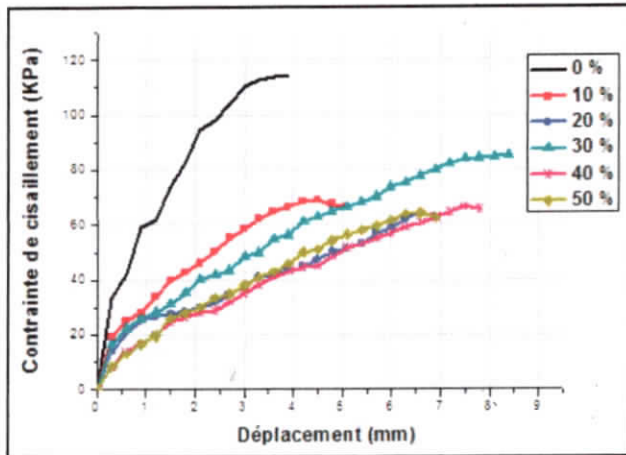


Figure (III.46) : Courbes contrainte-déplacement 2 bar

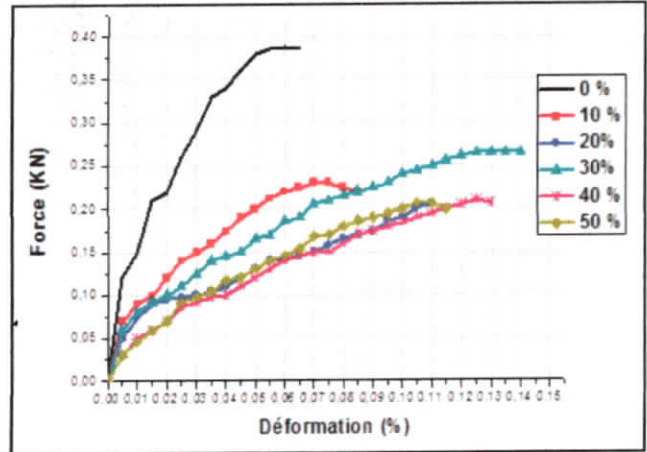


Figure (III.47) : Courbe force-déformation 2 bar

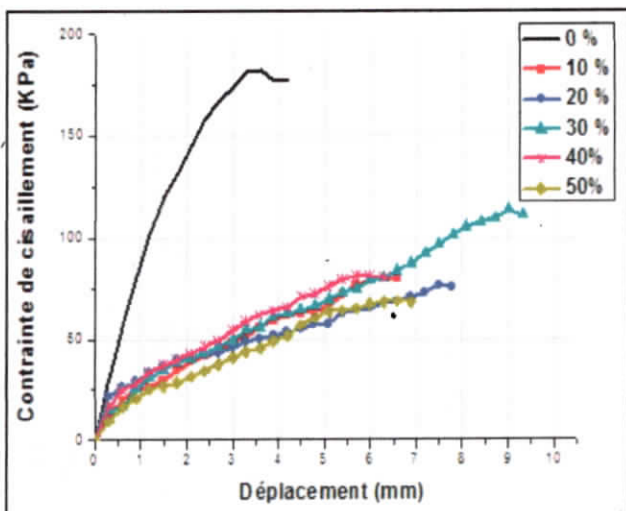


Figure (III.48) : Courbes contrainte-déplacement 3 bar

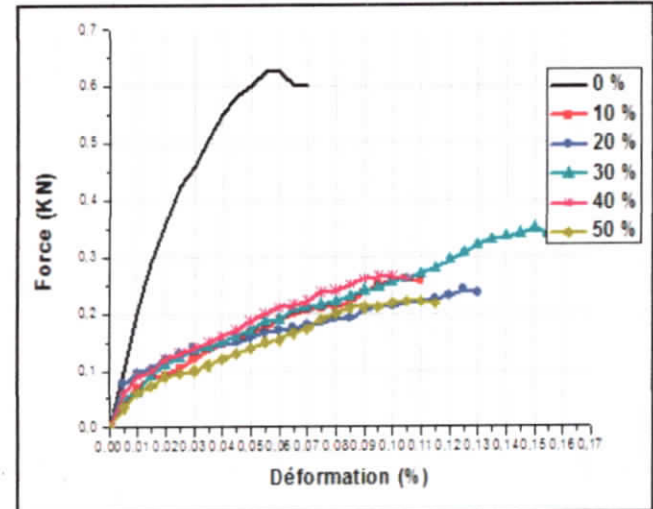


Figure (III.49) : Courbe force-déformation 3 bar

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

Les résultats de la cohésion et l'angle de frottement pour les deux types des granulats de pneu :

Tableau (III.12) : Les résultats de la cohésion et l'angle de frottement pour granulats de pneu

0-2(mm)

Le pourcentage de pneu %	C (kPa)	Φ (°)	τ (Kpa)
0	7,56	29,68	121,54
10	16,75	15,64	72,74
20	22,15	7,18	47,34
30	23,05	23,05	108,15
40	36,61	6,95	60,98
50	36,68	4,46	52,27

Tableau (III.13) : Les résultats de la cohésion et l'angle de frottement pour granulats de pneu

0-4(mm)

Le pourcentage de pneu %	C (kPa)	Φ (°)	τ (Kpa)
0	7,56	29,68	121,54
10	21,25	8,08	35,59
20	33	8,3	62,17
30	46,72	13,33	94,1
40	46,72	6,33	68,9
50	47,5	4,11	61,87

III.3.2 Interprétation des résultats

- 1) D'après les courbes obtenues, on remarque que la forme de la courbe (force-déformation) du sable sans renforcement représente un pic bien marqué contrairement au sable renforcé qui a une allure asymptotique, cette différence s'explique par la ductilité du matériau. En effet, le sable renforcé par pneumatique usagé avec différents pourcentages des granulats est plus ductile par rapport au sable non renforcé, et d'autre part, il est moins résistant.
- 2) On constate d'après les courbes (contrainte-déplacement) une rapidité d'avoir une contrainte tangentielle maximale (τ_{max}) pour le sable non renforcé alors que le sable renforcé est plutôt lent pour avoir sa contrainte tangentielle maximale, et ça s'explique par l'augmentation de la cohésion dans le sol renforcé. Cependant, une très grande différence observée pour les valeurs de l'angle de frottement en fonction de pourcentage des granulats de pneus usagés.
- 3) Pour les différents diamètres des granulats de pneu utilisé dans le renforcement du sable, le pourcentage optimum est de 30 % par rapport au sable renforcé, sachant que la contrainte de

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

cisaillement pour le sable non renforcé est mieux que la valeur de la contrainte de cisaillement pour le sable renforcé.

- 4) Les résultats obtenus à partir des granulats de pneu usagé de diamètre (0-2) mm sont les meilleures en termes de résistance au cisaillement du sol par rapport aux résultats obtenus par le renforcement du sable avec des granulats de pneu usagé de diamètre (0-4) mm. Ces résultats obtenus ont démontré la présence élevée des particules fine de (0-2) mm dans le sol qui leurs résistances au cisaillement proviennent du frottement et de l'enchevêtrement des particules ainsi que de la cohésion entre les particules.
- 5) Avec l'ajout et l'augmentation du contenu des granulats des pneus usagés, on remarque qu'il y a une augmentation de la cohésion avec une diminution de l'angle de frottement interne de sol surtout dans les granulats des pneus usagés de diamètre de (0-4) mm. Les résultats concernant les paramètres de résistance au cisaillement du sol obtenue par cet essai, pour le sable renforcé montre que, le sol est constitué par des particules volumineuses, et leurs résistances au cisaillement est assurée par le frottement et l'enchevêtrement des particules.
- 6) La diminution dans les valeurs de l'angle de frottement interne du sol par l'augmentation de contenu des granulats résulte de la rugosité superficielle des grains, qui entrent en contact les uns avec les autres par la présence des granulats des pneus usagés, l'enchevêtrement est surtout causé par les arêtes plus ou moins angulaires de certaines mélange des particules du sol et de pneu usagé qui en s'emboitent dans les interstices entre les autres particules, créent une résistance moins au mouvement. Lorsque la force de confinement est nulle, les particules n'offrent aucune résistance au déplacement, c'est le cas de pourcentage des particules de 50% et avec les deux diamètres utilisés (0-2) mm et (0-4) mm dans le renforcement du sable.

III.4 Conclusion

La stabilité des ouvrages géotechniques dépend majoritairement sur les deux paramètres mécaniques : la cohésion et l'angle de frottement interne de sol, ces derniers qu'on a essayés de les améliorer, et nous avons conclue par les résultats précédents que :

- L'essai à la boîte de cisaillement est très important car il permet de déterminer les caractéristiques mécaniques des sols. Cet essai est très convenable pour les sols pulvérulents.

Chapitre III : Etude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

- Pour déterminer les valeurs de l'angle de frottement interne de sol (φ) et la cohésion (c) avec une bonne précision on augmente le nombre des essais, et pour des raisons de sécurité on prend la valeur minimale obtenue.
- Le pourcentage optimum pour les différents diamètres des granulats des pneus usagés est 30% donne une amélioration remarquable pour les deux paramètres mécanique intrinsèque de sol (C , et φ) et par conséquence lorsque on utilise les granulats des pneus usagés comme un matériau de renforcement, on peut avoir une augmentation de facteur de sécurité dans l'étude de stabilité des ouvrages de géotechnique.
- Utilisation des pneumatiques usagés comme des éléments de renforcement dans l'étude du comportement mécanique des sols renforcés.

Chapitre IV

**Etude expérimentale de la
capacité portante des sols
renforcés par pneumatique
usagé**

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé

IV.1 Introduction

En technique routière, le choix de la structure des chaussées se fait à partir de deux critères principaux : la circulation et les caractéristiques du sol de fondation telles que sa résistance aux poinçonnements, sa résistance à la compression et sa déformation. L'étude de la capacité portante des fondations superficielle reposant sur des sols renforcés par pneumatique usagé n'est pas beaucoup étudiée, pour cela, l'objectif principal de ce travail est d'étudier ce phénomène et de déterminer également les paramètres qui sont susceptibles d'avoir le plus d'influence sur l'effet du renforcement sur l'augmentation de la capacité portante. Cet effet est généralement exprimé en termes de paramètre sans dimensions appelé rapport de la capacité portante (*cf.* BCR Bearing Capacity Ratio ; rapport de la valeur de la capacité portante du sol renforcé à celle du sol non renforcé). Donc, dans la première partie de ce chapitre, notre travail consiste à étudier le comportement mécanique d'un sable renforcé par des granulats du pneu usagé par deux diamètres différents (0-2) mm et (0-4) mm en fonction de l'énergie de compactage (11,25 et 55 coups), il sera en question de voir dans cette partie de ce chapitre, l'influence de la présence de ce type de renforcement sur les caractéristiques de portance du sol. La deuxième partie de ce chapitre traite des résultats expérimentaux obtenus de la capacité portante des fondations superficielle reposant sur un sol renforcé par pneumatique usagé. Les paramètres qui seront considéré de cette étude pour déterminer la capacité portante des fondations sont : le nombre des nappes de renforcement, la distance entre la base de la fondation et la première nappe et la forme de la fondation.

IV.2 Programme expérimental

Dans l'approche expérimentale, on a utilisé un sable provenant de la région de la ville de Sidi-Abdelaziz, wilaya de Jijel. Initialement, on a procédé à l'identification et la caractérisation physique et mécanique de ce type de sol par l'élaboration d'une série d'essais exposé dans le chapitre 2, à savoir, des analyses chimiques, essais de granulométrie, essais Proctor modifié et essais CBR, puis on a procédé à étudier le sol renforcé selon l'essai CBR immédiat. Notre étude expérimentale dans cette partie est basée sur les essais CBR renforcé par des granulats de pneu usagé, dans le but d'avoir une augmentation dans les valeurs de CBR immédiat.

IV.3 Etude de la portance du sol

L'étude de portance du sol est basée sur l'essai de poinçonnement CBR immédiat, pour ce faire, on applique une charge voisine de la charge de service et on poinçonne le sol dans des conditions déterminées (vitesse constante et déterminée) tout en mesurant les efforts (F) et les déplacements (Δh) en résultant : On obtient la courbe d'essai. Une comparaison de ces résultats avec ceux obtenus sur un sol référence (tout venant de concassage) est ensuite effectuée.

IV.3.1 Présentation des résultats

On trouve dans les figures suivantes les différents résultats des essais effectués au sein de laboratoire de mécanique des sols. Le gain de portance de sol représente la différence des indices de portance obtenus entre le sol seul et celui renforcé avec les granulats de pneu usagé pour le CBR immédiat. Tout d'abord, on représente ci-dessous quelques résultats typiques pour le sol non renforcé respectivement en fonction de l'énergie de compactage de 11, 25 et 55 coups avec deux diamètres différents (0-2) mm et (0-4) mm.

IV.3.1.1 Sable entièrement renforcé

- Granulats de pneu 0-4 (mm)

1. Energie de compactage de 55 coups

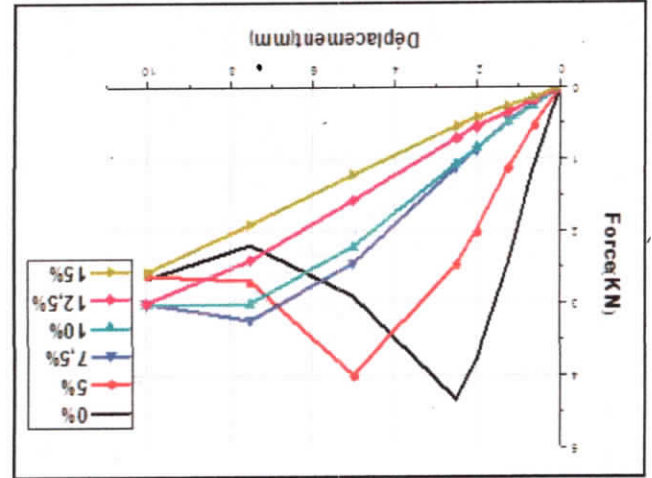


Figure (IV.1) : Courbe force-déplacement entièrement renforcé par pneu 0-4mm (55 coups).

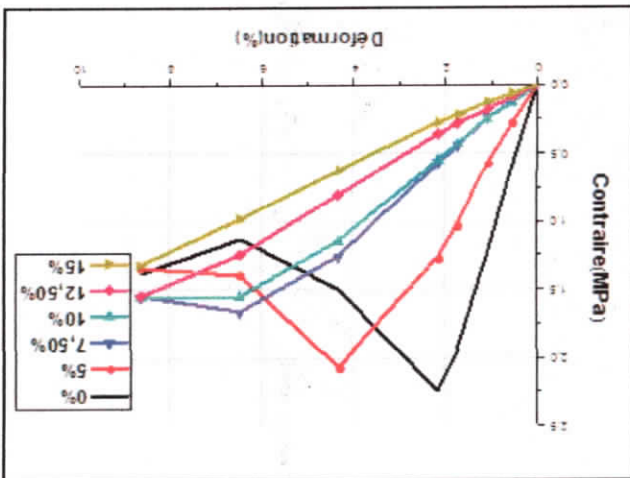


Figure (IV.2) : Courbe contrainte-déformation entièrement renforcé par pneu 0-4mm(55 coups).

Tableau (IV.1) : Résultats de CBR sable entièrement renforcé par pneu 0-4mm (55 coups)

Pourcentage	0%	5%	7,5%	10%	12,5%	15%
CBR (2,5)	0,32	0,18	0,08	0,08	0,05	0,04
CBR (5)	0,14	0,20	0,12	0,11	0,08	0,06
CBR %	32,43	20,00	12,20	11,05	7,80	5,99

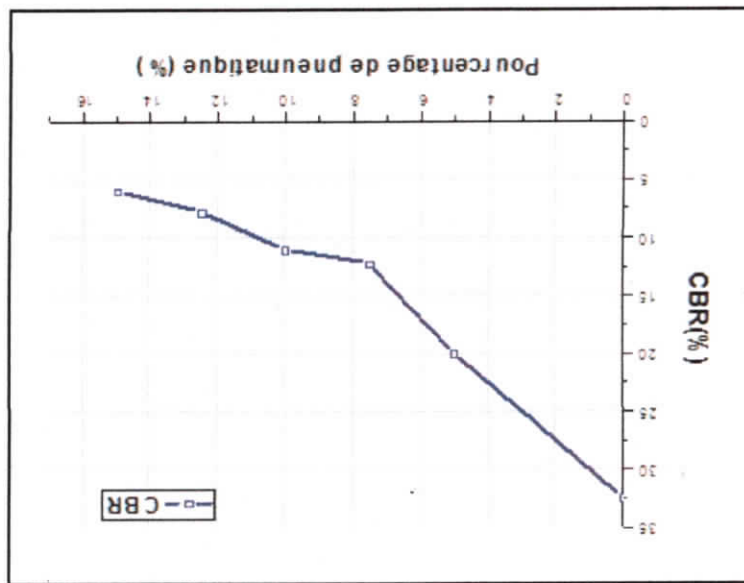
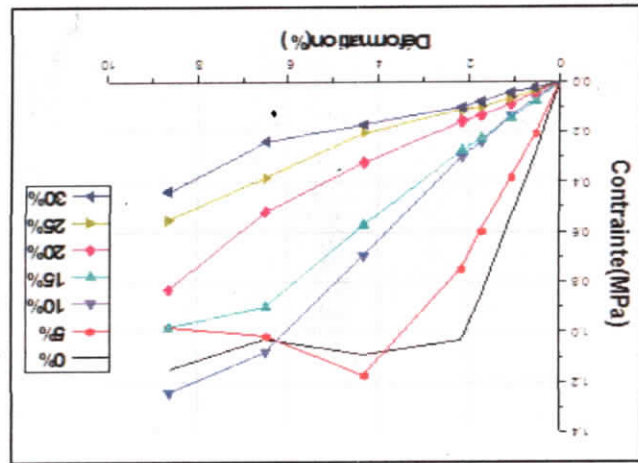
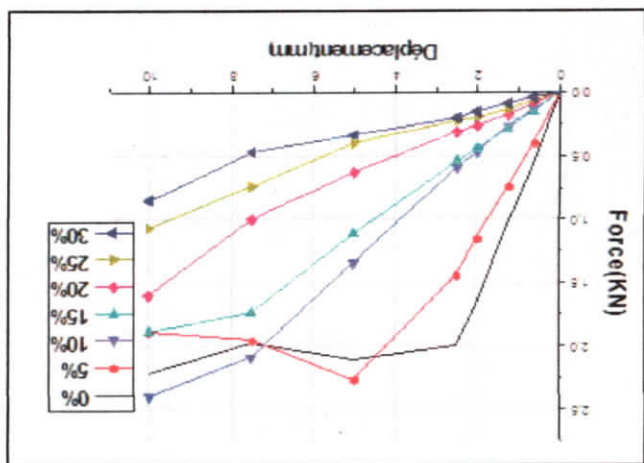


Figure (IV.3) : Variation de CBR en fonction de pourcentage de pneu 0-4mm (55 Coups).

2. Energie de compactage de 25coups



entièrement renforcé par pneu 0-4mm (25 coups)



entièrement renforcé par pneu 0-4mm (25 coups)

Tableau (IV.2) : les résultats de CBR sable entièrement renforcé par pneu 0-4mm (25 coups).

Pourcentage	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
CBR (2,5)	0,15	0,11	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01
CBR (5)	0,11	0,11	0,07	0,06	0,03	0,02	0,02
CBR %	14,98	11,32	6,72	5,55	3,12	1,98	1,65

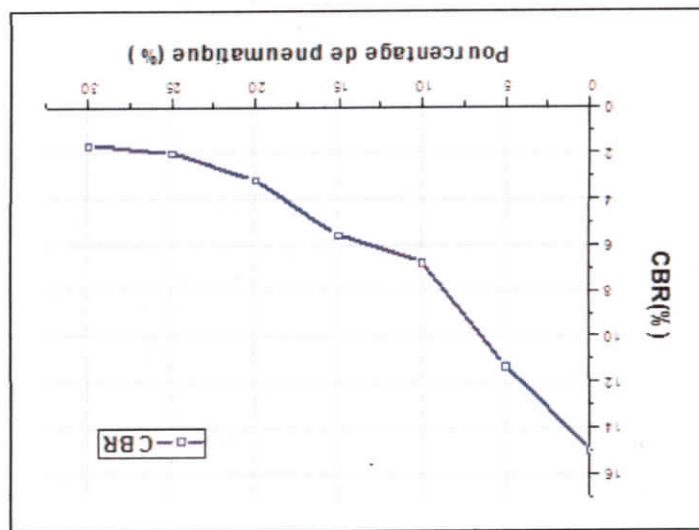


Figure (IV.6) : variation de CBR en fonction de pourcentage de pneu 0-4mm (25 Coups)

1. Energie de compactage de 11 coups

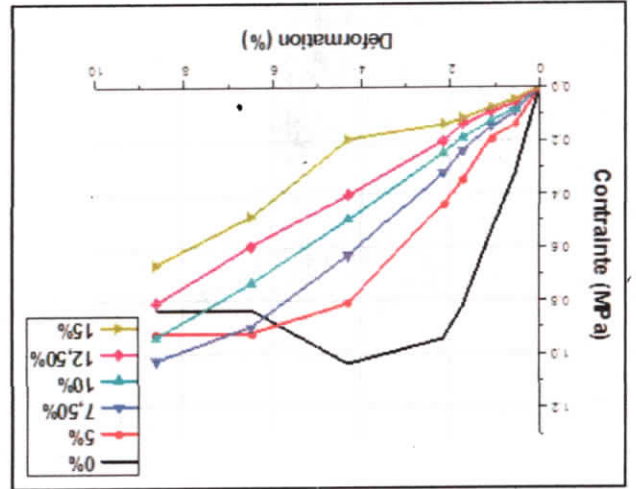


Figure (IV.7) : courbe contrainte-déformation entièrement renforcé par pneu 0-4mm (11 coups).

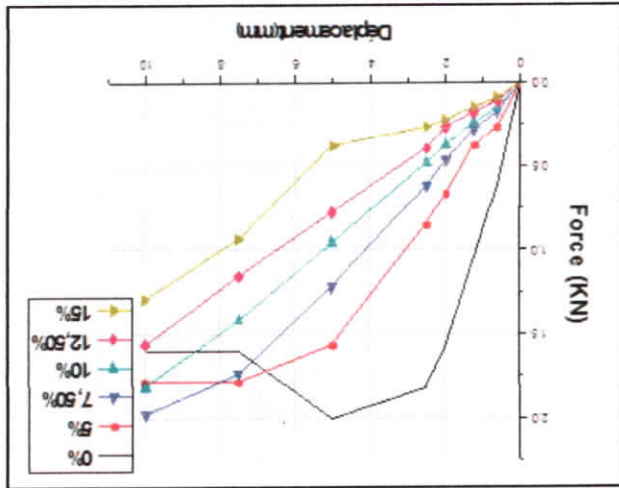


Figure (IV.8) : courbe force-déplacement entièrement renforcé par pneu 0-4mm (11 coups).

Tableau (IV.3) : les résultats de CBR sable entièrement renforcé par pneu 0-4mm (11 coups).

Pourcentage	0%	5%	7,5%	10%	12,5%	15%
CBR (2,5)	0,14	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02
CBR (5)	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04	0,02
CBR %	13,66	7,80	6,10	4,78	3,90	1,98

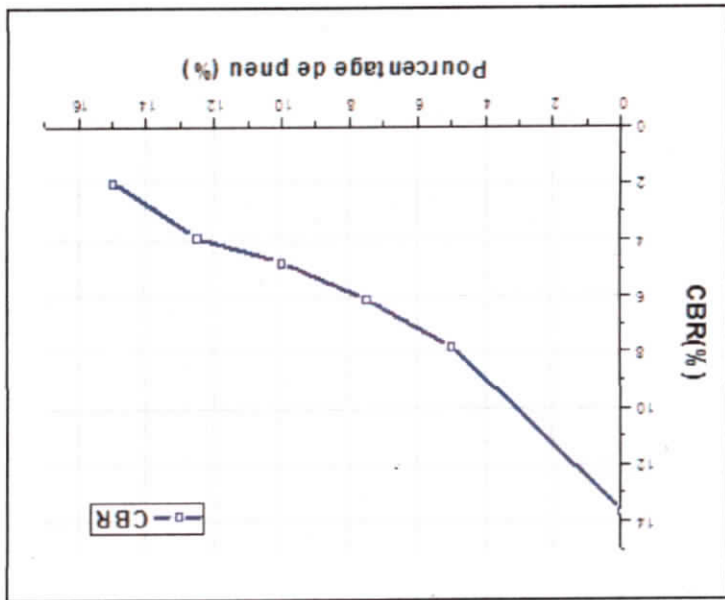


Figure (IV.9) : variation de CBR en fonction de pourcentage de pneu 0-4mm (11 coups)

- Granulats de pneu 0-2 (mm)

1. Energie de compactage de 55 coups

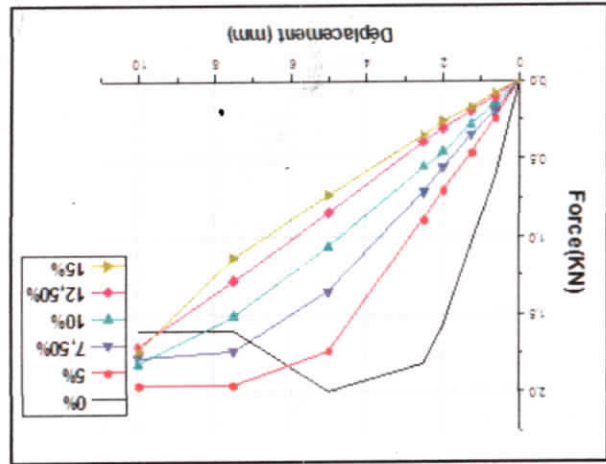


Figure (IV.10) : courbe force-déplacement entièrement renforcé par pneu 0-2mm (55 coups)

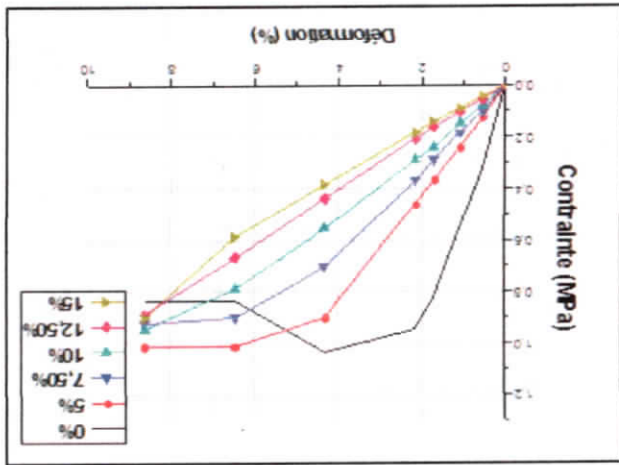


Figure (IV.11) : courbe contrainte-déformation entièrement renforcé par pneu 0-2mm (55 coups)

Tableau (IV.4) : les résultats de CBR sable entièrement renforcé par pneu 0-2mm (55 coups)

Pourcentage	0%	5%	7,5%	10%	12,5%	15%
CBR (2,5)	0,32	0,14	0,10	0,07	0,05	0,04
CBR (5)	0,14	0,19	0,14	0,09	0,08	0,07
CBR %	32,43	19,45	14,45	9,45	7,80	6,65

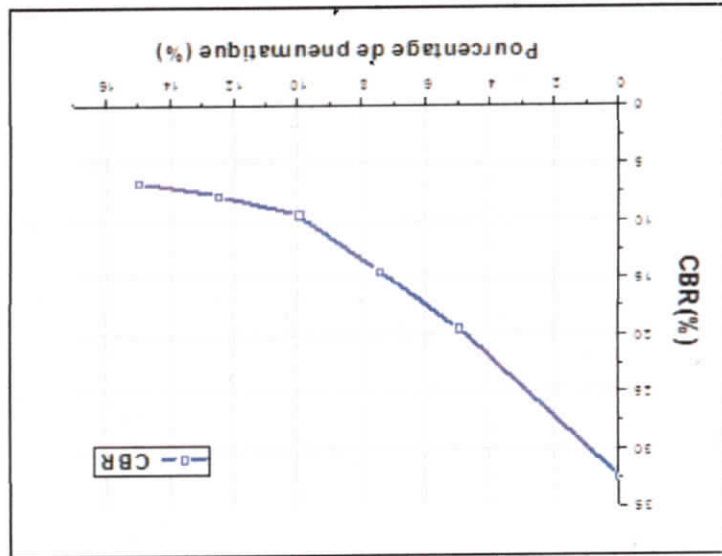


Figure (IV.12) : variation de CBR en fonction de pourcentage de pneu 0-2mm (55coups)

2. Energie de compactage de 25 coups

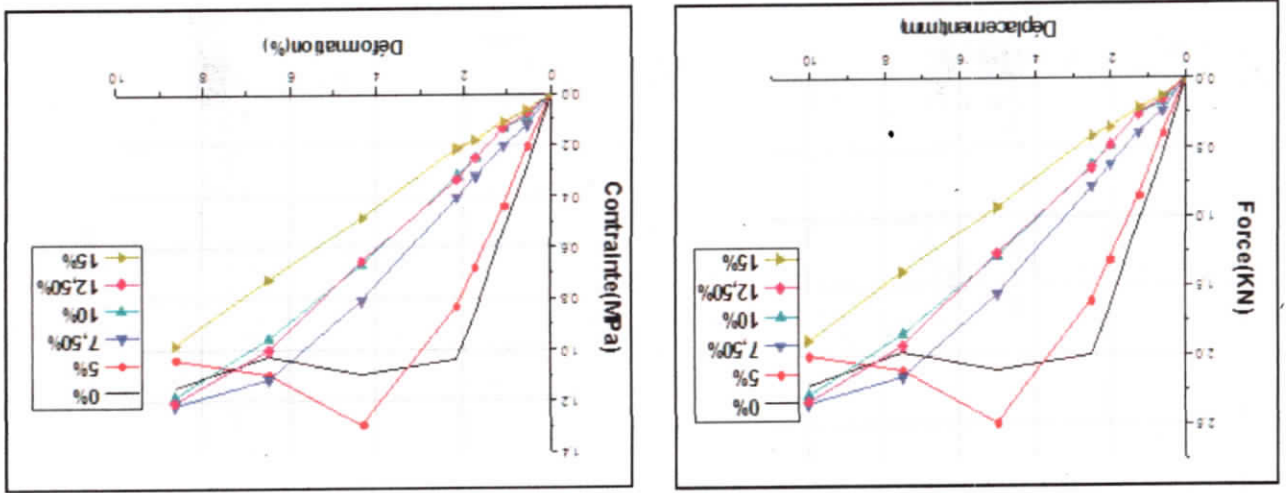


Figure (IV.13) : courbe force-déplacement

Figure (IV.14) : courbe contrainte-déformation

entièrement renforcé par pneu 0-2mm (25 coups).

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé

Tableau (IV.5) : les résultats de CBR sable entièrement renforcé par pneu 0-2mm (25 coups).

Pourcentage	0%	5%	7,5%	10%	12,5%	15%
CBR (2,5)	0,15	0,12	0,06	0,05	0,05	0,03
CBR (5)	0,11	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05
CBR %	14,98	12,47	7,80	6,43	6,32	4,67

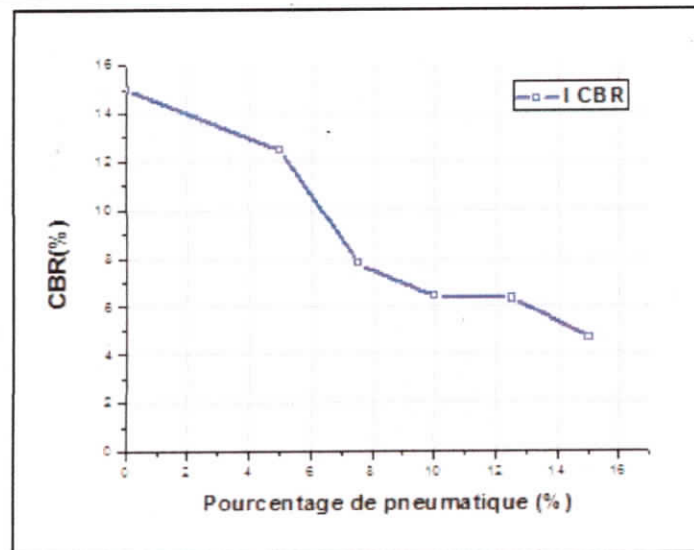


Figure (IV.15) : variation de CBR en fonction de pourcentage de pneu 0-2mm (25coups)

3. Energie de compactage de 11 coups

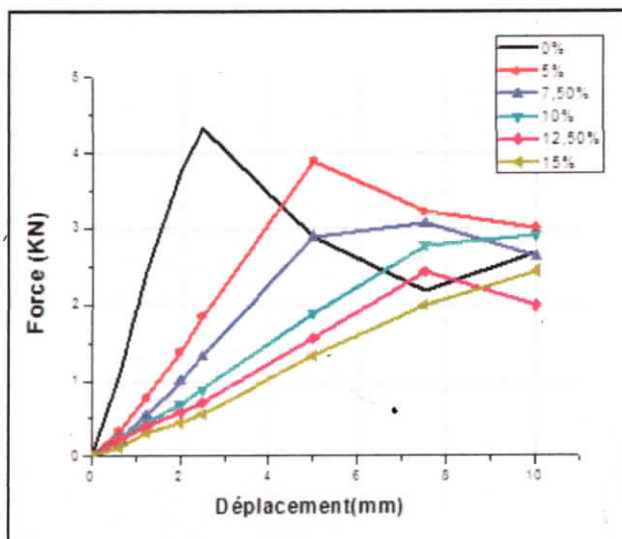


Figure (IV.16) : courbe force-déplacement entièrement renforcé par pneu 0-2mm(11coups)

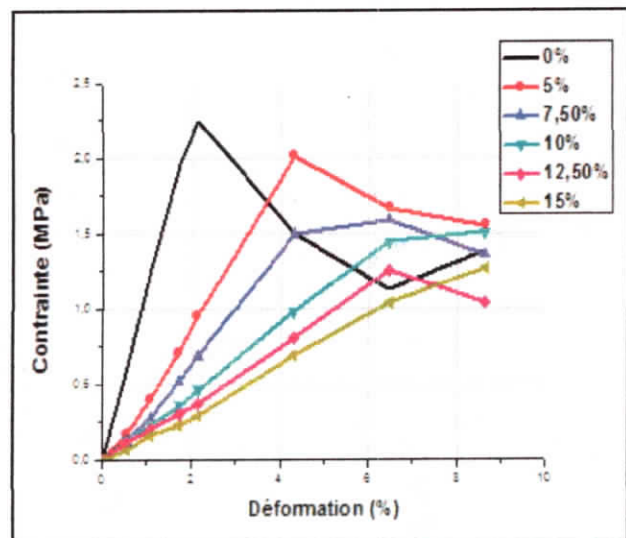


Figure (IV.17) : courbe contrainte-déformation entièrement renforcé par pneu 0-2mm (11 coups)

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé

Tableau (IV.6) : les résultats de CBR sable entièrement renforcé par pneu 0-2mm (11 coups)

Pourcentage	0%	5%	7,5%	10%	12,5%	15%
CBR (2,5)	0,14	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03
CBR (5)	0,10	0,09	0,07	0,05	0,04	0,04
CBR %	13,66	8,68	6,77	5,33	4,23	3,68

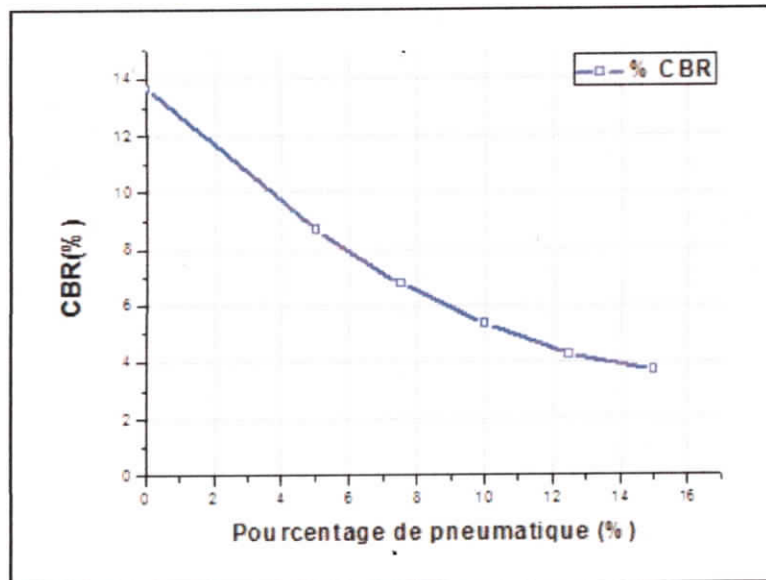


Figure (IV.18) : variation de CBR en fonction de pourcentage de pneu 0-2mm (11coups)

IV.3.1.2 Analyse des résultats

Les courbes (chargement-tassement), (contrainte- déformation) expliquent l'effet de pourcentage des granulats de pneus usagés sur la déformation du sol. Les points les plus marquants de cette partie se résument comme suit :

1. En générale, le sol non renforcé donne des résultats de CBR mieux par apport au sol renforcé par pneu usagé quelque soit le pourcentage et le diamètre des granulats. Ce résultat montre que l'introduction des granulats de pneus usagés joue le rôle d'un élément rigide, qu'ils n'ont aucun rôle de renforcement.
2. Par contre, on remarque une sensible augmentation dans les valeurs de CBR en fonction de faible pourcentage de pneu usagé à 5%, cette valeur est le meilleur pourcentage de renforcement quelque soit le diamètre des granulats et l'énergie de compactage du sol, donc l'optimum de pourcentage de pneu usagé est de 5%, et plus on augmente son contenu plus le CBR diminue

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé

et ça s'explique par le fait que notre matériau a un comportement élastique qui a un effet négatif sur le compactage en absorbant son énergie, ce qui va influencer sur la densité du mélange (sol-pneu).

3. Le pourcentage minimal de 5% de pneus usagés a pour effet d'augmenter les caractéristiques mécaniques du matériau, en particulier sa résistance (augmentation de l'angle de frottement et de la cohésion) lorsque le volume des vides du sol se réduit, le sol est également moins déformable et donc son module d'Young augmente. Donc, le pneu usagé augmente les modules de déformation et la portance du sol.
4. Quelque soit le pourcentage et le diamètre des granulats de pneu usagé ajouté dans le sol, il faut appliquer une énergie de compactage importante (55 coups) pour avoir une faible valeur de tassement du sol.

IV.3.1.3 Sable partiellement renforcé

Puisque le renforcement entier par le pneu usagé n'était pas efficace, ce qui nécessite de changer la technique de renforcement. A cet effet, nous avons étudié la variation de la position et le nombre de la nappe de renforcement sur le CBR immédiat. Notons que dans cette partie d'étude, le pourcentage des granulats de pneu usagé utilisé pour choisir le meilleur positionnement et le nombre de la nappe de renforcement est de 5%.



Figure (IV.19) : Sol renforcé avec des granulats de pneu usagé.

IV.3.1.3.1 Choix de nombre et le positionnement de la nappe de renforcement

L'étude de portance est basée sur l'essai de poinçonnement CBR immédiat, dans notre cas d'étude, on a choisi de positionner les nappes de renforcement à 0 cm, 4cm, et 8cm. À partir de la base de la fondation et pour une énergie de compactage de 11, 25 et 55 coups.

On présente ci-dessous quelques résultats typiques pour le sol non renforcé et pour le sol renforcé par pneu usagé respectivement en fonction de l'énergie de compactage et aussi en fonction la position de la nappe de renforcement.

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé

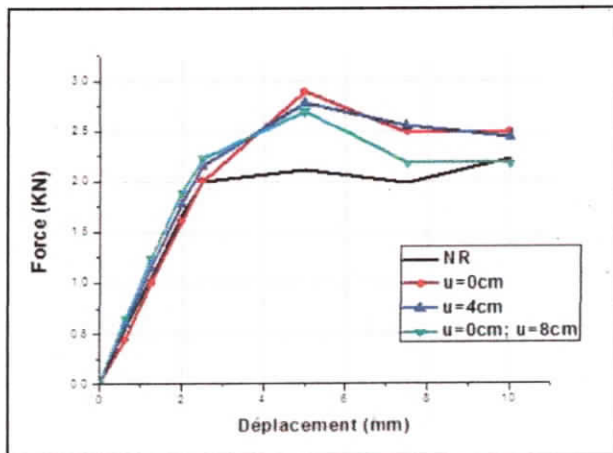


Figure (IV.20) : courbe force-déplacement renforcement par 2 couches avec (25) coups.

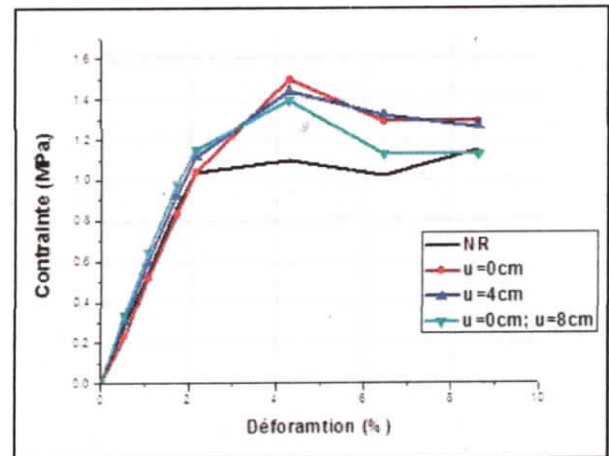


Figure (IV.21) : courbe contrainte-déformation de renforcement par 2 couches (25coups).

Tableau (IV.7) : Résultats de CBR du sable partiellement renforcé par pneu 0-4 (25coups) comparé avec l'I CBR du sable non renforcé et du sable renforcé entièrement.

	NR	U= 0cm	U= 4cm	U=0 ; U=8	Renforcé entièrement
CBR (2,5)	0,15	0,16	0,15	0,17	0,11
CBR (5)	0,11	0,14	0,14	0,13	0,11
CBR %	14,98	16,13	14,98	16,63	11,32

Les résultats précédents nous permettent de formuler les constatations suivantes :

- La meilleure position de renforcement par pneu usagé par deux nappes est de (U=8cm).
- Lorsque le sable est entièrement renforcé aléatoirement, le pneu usagé ne joue aucun rôle de renforcement, Il est considéré comme un élément rigide.
- Plus en diminuant le nombre de nappe de renforcement dans le sol, plus le CBR immédiat augmente, la présence du pneu usagé sous forme d'une seule nappe donne des meilleurs résultats.

a. Renforcement par une couche

Puisque on a trouvé que la diminution de nombre de nappe augmente les résultats de CBR immédiat, donc nous avons recourt à utiliser les mêmes essais de renforcement, mais cette fois ici, le renforcement par pneu usagé à été effectué par une seule nappe avec le même pourcentage de pneu usagé ajouté dans le sol, tout en changeant la distance de la couche renforcée par rapport à la surface de sol.

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé

- **Energie de compactage de 25 coups**

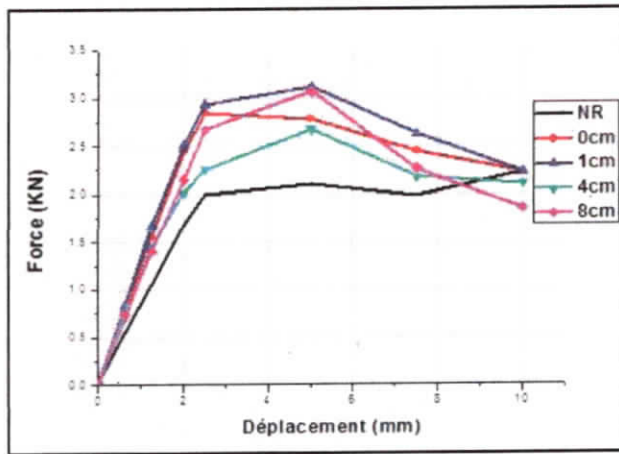


Figure (IV.22) : Courbe force-déplacement avec différentes positions de la couche renforcée.

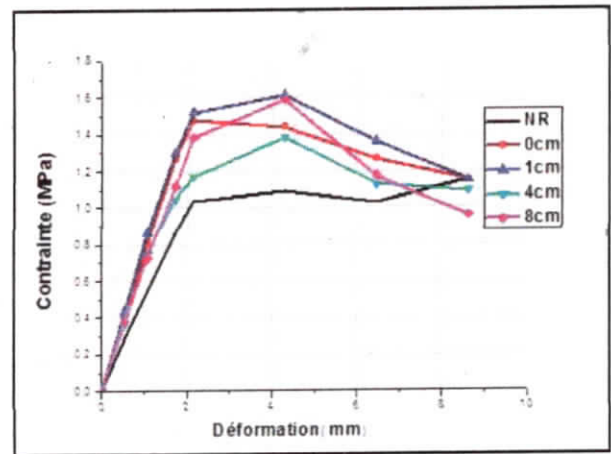


Figure (IV.23) : Courbe contrainte-déformation avec différentes positions de la couche renforcée.

Tableau (IV.8) : Résultats de CBR du sable renforcé par différent position couche de pneu diamètre 0-4 (25coups).

Position	U=0	U=1cm	U=4cm	U= 8cm
CBR (2,5)	0,19	0,22	0,17	0,20
CBR (5)	0,13	0,16	0,13	0,15
CBR %	19,18	21,98	16,96	20,00

En comparant les résultats obtenus entre le renforcement par une nappe de pneu usagé par apport aux résultats de renforcement par deux nappes de même type de matériau de renforcement, on constate qu'il y a une amélioration dans le renforcement du sol seulement avec une seule nappe. Donc, la prise en compte du nombre de nappe de renforcement par pneumatique usagé dans l'étude de comportement du sol s'avère nécessaire, afin d'étudier les déplacements et les déformations des ouvrages de géotechnique.

- **Energie de compactage de 55coups**

Puisque les résultats de renforcements donnés par une seule nappe sont bons, on essaye avec d'autre énergie de compactage. Les figures (IV.23 et IV.24) suivantes montres les différentes positions de la nappe de renforcement à 0 cm, 1, 4 et 8 cm en fonction de l'énergie de compactage de 55 coups.

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé

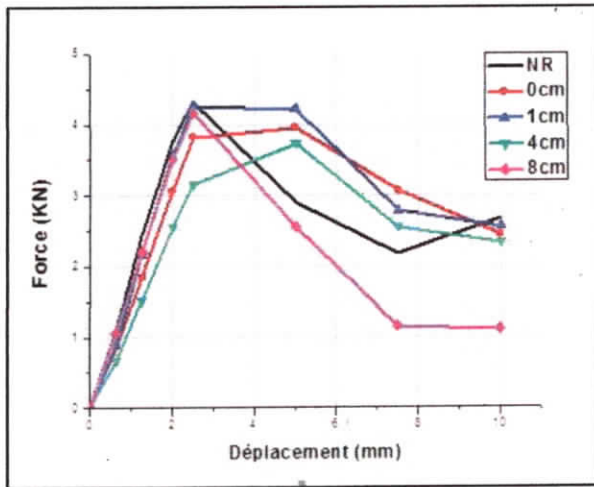


Figure (IV.24) : courbe force-déplacement avec différents positions de renforcement (55coups).

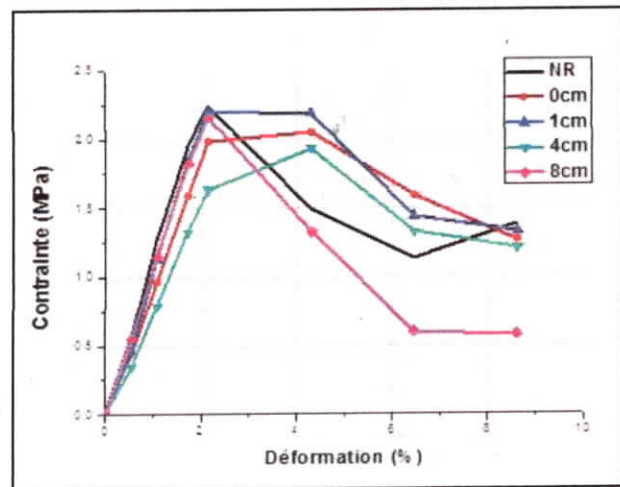


Figure (IV.25) : courbe contrainte-déformation avec différentes positions de renforcement(55coups).

Tableau (IV.9) : les résultats de CBR du sable renforcé par différent position couche de pneu diamètre 0-4 (55coups).

Position	U=0cm	U=1cm	U=4cm	U= 8cm
CBR (2,5)	0,29	0,32	0,24	0,24
CBR (5)	0,20	0,21	0,19	0,19
CBR %	28,64	31,94	23,63	23,63

Energie de compactage de 11coups

Les figures (IV.26 et IV.27) suivantes montres les différentes positions de la nappe de renforcement à 0 cm, 1, 4 et 8 cm en fonction de l'énergie de compactage de 11 coups.

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé

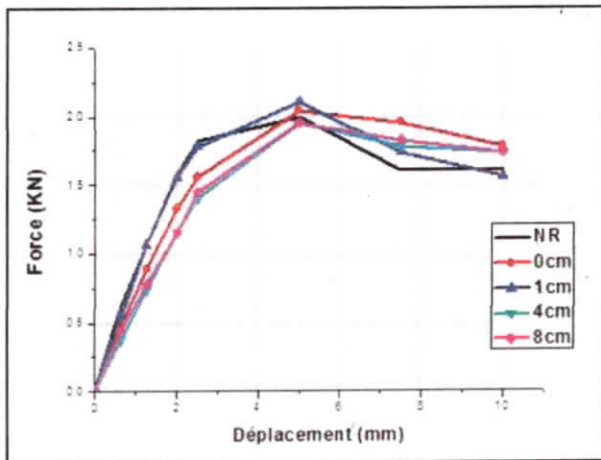


Figure (IV.26) : courbe force-déplacement avec différentes positions de renforcement (11 coups).

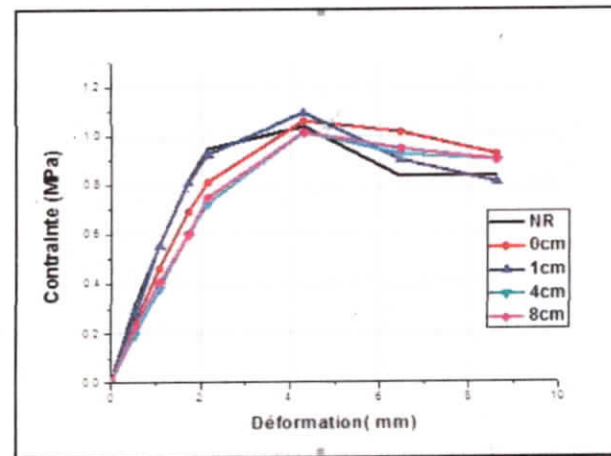


Figure (IV.27) : courbe contrainte-déformation avec Différentes positions de renforcement (11 coups).

Tableau (IV.10) : les résultats de CBR du sable renforcé par différent position couche de pneu diamètre 0-4 (11 coups).

Position	U=0cm	U=1cm	U=4cm	U= 8cm
CBR (2,5)	0,12	0,13	0,10	0,11
CBR (5)	0,10	0,11	0,10	0,10
CBR %	11,69,	13,33	10,48	10,82

- **Renforcement par une couche par granulats de pneu de diamètre 0-2 (mm)**

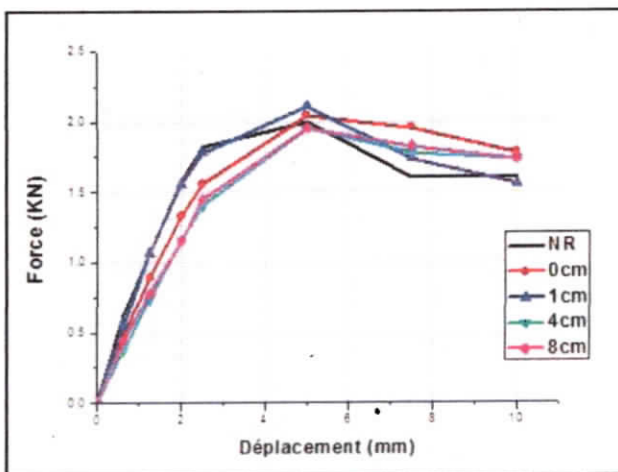


Figure (IV.28) : courbe force-déplacement avec différentes positions de renforcement (25 coups).

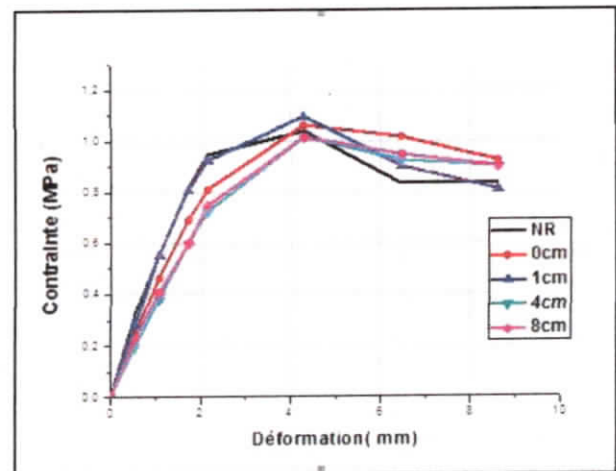


Figure (IV.29) : courbe contrainte-déformation avec Différentes positions de renforcement (25 coups).

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé

Tableau (IV.11) : les résultats de CBR du sable renforcé par différent position couche de pneu diamètre 0-2mm (11coups).

Position	U=0cm	U=1cm	U=4cm	U= 8cm
CBR (2,5)	0,17	0,20	0,17	0,20
CBR (5)	0,13	0,13	0,12	0,13
CBR %	17,45	20,33	16,79	19,66

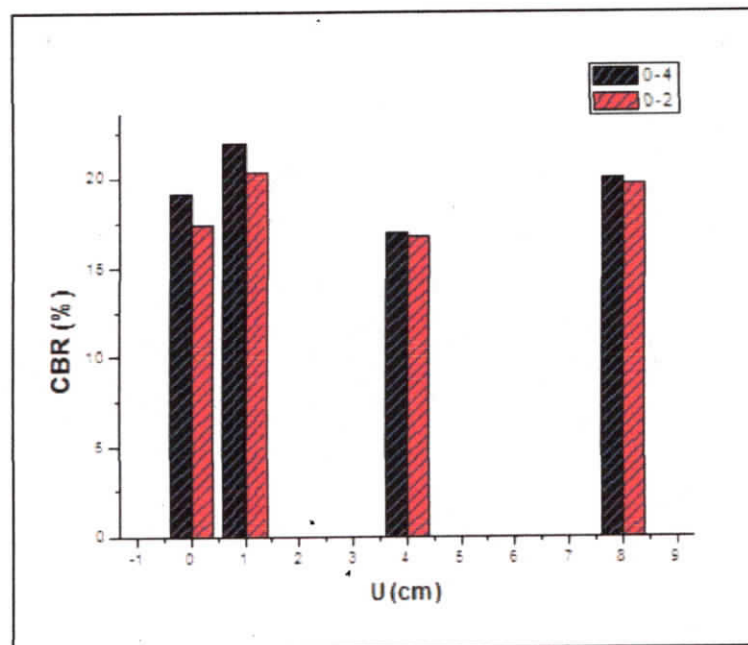


Figure (IV.30) : Comparaison de CBR entre deux diamètres de pneu Avec différentes distance (25coups).

D'après les figures précédentes en voit bien que la meilleure position de renforcement par pneu usagé par une seule nappe est de (U=1cm) quelque soit l'énergie de compactage appliquée sur le sol.

IV.3.1.4. Vérification de la validité de pourcentage optimum dans le renforcement partiel du sol

Nous avons trouvé dans la section précédente que le pourcentage optimum est de 5%, et après avoir trouvé le meilleur positionnement de la nappe et nombre de renforcement par pneu usagé, on a voulu faire vérifier si le pourcentage optimum est celui de l'optimum de 5% pour la méthode de renforcement par nappe.

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé

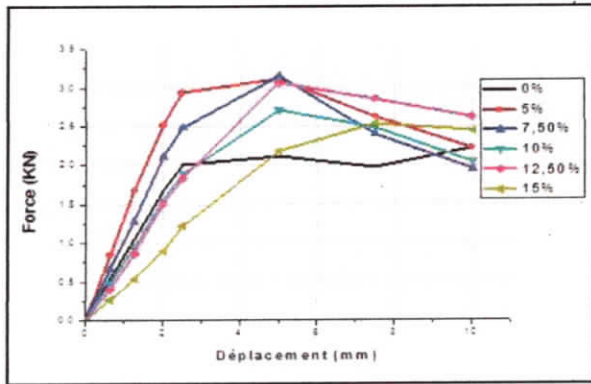


Figure (IV.31) : courbe force-déplacement avec différents pourcentages de pneu (25coups).

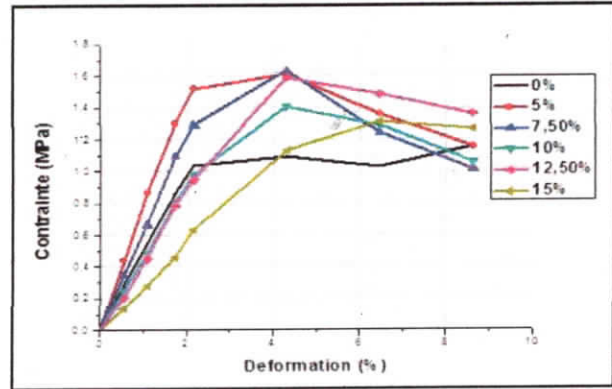


Figure (IV.32) : courbe contrainte-déformation avec différentes pourcentages de pneu (25coups).

Tableau (IV.12) : les résultats de CBR du sable renforcé par pneu 0-4 pour $u=1\text{ cm}$ (25 coups).

Pourcentage	0%	5%	7,5%	10%	12,5%	15%
CBR (2,5)	0,15	0,22	0,19	0,14	0,14	0,09
CBR (5)	0,11	0,16	0,16	0,14	0,13	0,11
CBR %	14,98	21,98	18,62	14,16	13,68	10,88

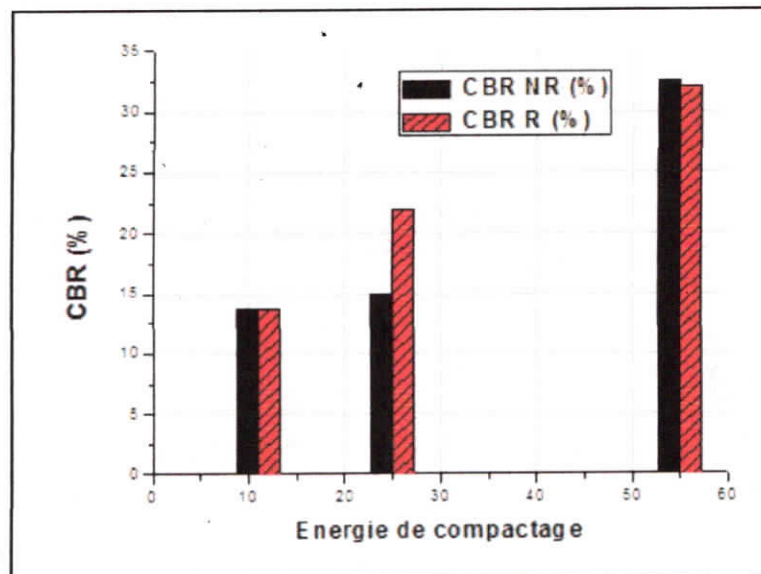


Tableau (IV.33) : Comparaison des résultats de CBR entre le sol renforcé et non renforcé Pour différent énergie de compactage.

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé

IV.3.1.5 Discussion et interprétation des résultats

Les tableaux et les diagrammes de CBR pour le cas d'un sable renforcé et non renforcé précédents nous permettent de formuler les constats suivants :

- Avec une énergie de compactage de 55 coups par couche, le CBR entre le sol renforcé et le sol non renforcé presque identique. Ce résultat explique clairement, que le sol avec un bon compactage doit y avoir de bonnes caractéristiques mécaniques et hydriques, ce qui ne nécessite pas de renforcement.
- Il y a une sensible augmentation remarquable des valeurs de CBR pour une énergie de compactage de 25 coups par rapport aux cas de l'énergie de compactage de 11 coups et 55 coups, donc le renforcement par pneumatique usagé doit se faire dans des sols moyennement denses à faible énergie de compactage.
- Les granulats de pneu usagé de diamètre de (0-4) mm donnent des valeurs de CBR plus grand par rapport aux les granulats de pneu usagé de diamètre de (0-2) mm, Donc le choix de diamètre de renforcement par pneumatique usagé dans l'étude de stabilité des sol est important.

IV.4 Calcul de la capacité portante d'un sable renforcés par pneumatique usagé

La détermination du rapport de la capacité portante est très important pour connaître l'effet de renforcement sur la portance de sol, c'est pour cela, nous avons effectué une série d'essais sur un sable renforcé par pneu usagé avec deux diamètre différents (0-2 mm et 0-4 mm) et avec des énergies de compactage de 25 et 11 coups.

IV.4.1 Résultats obtenus

L'étude de portance est basée sur l'essai de poinçonnement CBR immédiat pour trois formes de fondation du sol (circulaire, rectangulaire et filante), dans notre cas d'étude, on a choisi de positionner les nappes de renforcement à 1cm. À partir de la base de la fondation et pour une énergie de compactage de 11 et 25 coups.

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé

a. Energie de compactage de 25 coups

- Cas d'une semelle filante

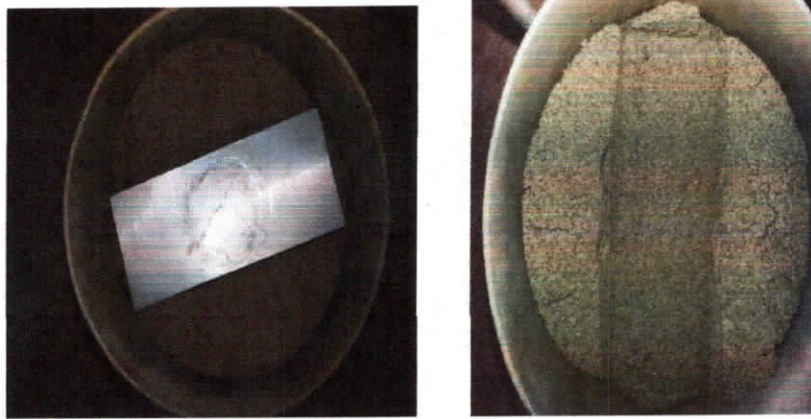


Figure (IV.34): Déformation de l'échantillon (cas de la semelle filante).

Tableau (IV.13) : les résultats de la charge appliqué sur le sol renforcé et non renforcé

(Cas de la semelle filante).

$\Delta h(\text{mm})$	$q(\text{kPa})$ Sans Renforcement	$q_r(\text{kPa})$ avec renforcement (0-2) mm	$q_r(\text{kPa})$ avec renforcement (0-4) mm
0	0	0	0
0,625	431,77	193,35	410,10
1,25	1056,65	677,34	1056,65
2	2004,93	1625,62	2167,49
2,5	2980,30	2790,64	2465,52
5	2221,67	2330,05	2032,02
7,5	1598,52	1788,18	1842,36
10	1468,47	1788,18	2032,02

$$\text{BCR} = q_r/q \quad (\text{IV.1}).$$

- Pour le pneu usagé de (0-2) mm; $\text{BCR} = 0,94$

- Pour le pneu usagé de (0-4) mm; $\text{BCR} = 0,82$

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé

- Cas d'une semelle carrée



Figure (IV.35) : Déformation de l'échantillon (cas de la semelle carrée).

Tableau (IV.14) : Résultats de la charge appliqué sur le sol renforcé et non renforcé
(Cas de la semelle carrée).

$\Delta h(\text{mm})$	$q(\text{kPa})$ Sans Renforcement	$q_r(\text{kPa})$ avec renforcement (0-2) mm	$q_r(\text{kPa})$ avec renforcement (0-4) mm
0	0,00	0,00	0
0,625	399,52	213,08	319,61
1,25	932,20	585,96	958,84
2	1411,62	1076,03	1118,64
2,5	1464,89	1384,99	1145,28
5	985,47	1171,91	905,57
7,5	639,23	735,11	905,57
10	596,61	585,96	841,65

- Pour le pneu usagé de (0-2) mm; BCR = 0,94

- Pour le pneu usagé de (0-4) mm ; BCR = 0,71

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé

- Cas d'une semelle circulaire



Figure (IV.36) : Déformation de l'échantillon (cas de la semelle circulaire).

Tableau (IV.15) : Résultats de la charge appliqué sur le sol renforcé et non renforcé

(Cas de la semelle carrée).

$\Delta h(\text{mm})$	$q(\text{kPa})$ Sans Renforcement	$q_r(\text{kPa})$ avec renforcement (0-2) mm	$q_r(\text{kPa})$ avec renforcement (0-4) mm
0	0	0	0
0,625	370,58	259,41	185,29
1,25	833,82	491,02	416,91
2	1204,40	741,17	759,70
2,5	1074,70	852,35	926,46
5	463,23	583,67	481,76
7,5	277,94	389,11	277,94
10	259,41	324,26	444,70

- Pour le pneu usagé de (0-2) mm ; BCR = 0,7

- Pour le pneu usagé de (0-4) mm ; BCR = 0,76

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé

b. Energie de compactage de 11 coups

- Cas d'une semelle filante

Tableau (IV.16) : Résultats de la charge appliqué sur le sol renforcé et non renforcé

(Cas de la semelle filante).

$\Delta h(\text{mm})$	q(kPa) sans renforcement	$q_r(\text{kPa})$ avec renforcement (0-2) mm	$q_r(\text{kPa})$ avec renforcement (0-4) mm
0	0	0	0
0,625	352,22	298,03	166,26
1,25	948,28	812,81	541,87
2	1679,80	1598,52	1219,21
2,5	2059,11	1815,27	1679,80
5	2086,21	1923,65	2001,49
7,5	1584,98	1517,24	1788,18
10	1666,26	1408,87	1950,74

- Pour le pneu usagé de (0-2) mm ; BCR = 0,92.

- Pour le pneu usagé de (0-4) mm ; BCR = 0,94

- Cas d'une semelle carrée

Tableau (IV.17) : Résultats de la charge appliqué sur le sol renforcé et non renforcé

(Cas de la semelle carrée).

$\Delta h(\text{mm})$	q(kPa) sans renforcement	$q_r(\text{kPa})$ avec renforcement (0-2) mm	$q_r(\text{kPa})$ avec renforcement (0-4) mm
0	0	0	0
0,625	362,23	287,65	213,08
1,25	788,38	745,76	506,05
2	1054,72	905,57	799,03
2,5	1012,11	969,49	905,57
5	612,59	639,23	719,13
7,5	522,03	426,15	490,07
10	468,77	436,80	522,03

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé

- Pour le pneu usagé de (0-2) mm ; BCR = 0,91

- Pour le pneu usagé de (0-4) mm ; BCR = 0,85

- Cas d'une semelle circulaire

Tableau (IV.18) : Résultats de la charge appliqué sur le sol renforcé et non renforcé

(Cas de la semelle circulaire).

$\Delta h(\text{mm})$	q(kPa) sans renforcement	$q_r(\text{kPa})$ avec renforcement (0-2) mm	$q_r(\text{kPa})$ avec renforcement (0-4) mm
0	0	0	0
0,625	277,94	277,94	194,56
1,25	463,23	444,70	389,11
2	648,52	592,94	565,14
2,5	741,17	704,11	602,20
5	352,06	305,73	389,11
7,5	166,76	176,03	370,58
10	92,65	74,12	379,85

- Pour le pneu usagé de (0-2) mm ; BCR = 0,94

- Pour le pneu usagé de (0-4) mm ; BCR = 0,81

IV.4. 2 Discussion et interprétation des résultats

L'ensemble de ces calculs permet de mettre en avant les résultats suivants :

- 1) D'après les résultats expérimentaux de la charge appliquée sur le sol renforcé et non renforcé obtenus dans les tableaux (IV.12, à 17) de la capacité portante, pour les trois formes de fondations, montre qu'il y a une différence très significative entre les valeurs de la capacité portante de fondation sans renforcement avec les résultats obtenus avec renforcement. Les valeurs de BCR restent toujours (<1). Ceci explique que l'introduction des nappes de pneus usagés ne joue pas un rôle de renforcement pour augmenter la capacité portante des sols.
- 2) Les résultats expérimentaux de la capacité portante pour les trois types de fondations renforcé par pneu usagé en fonction de l'énergie de compactage du sol (11 et 25 coups) et pour les deux diamètres de pneu usagé (0-2) mm et (0-4) mm sont souvent très loin des résultats du sol non renforcé, et reste difficile à commenter. Ceci explique par le problème de l'effet de l'échelle c'est-à-dire le positionnement des nappes de pneu usagé (u) lié directement avec les dimen-

Chapitre IV : Etude expérimentale de la capacité portante des sols renforcés par pneumatique usagé

sions réelles de la semelle et aussi que la contrainte de chargement verticale causée par le compactage du sol.


IV.5 conclusion

Quant le sol est très compacté, cela présente de bonne amélioration dans les caractéristiques mécaniques, donc il aura une amélioration de sa portance, et la fondation du sol aura aussi des dimensions réduites.

La détermination de CBR est important pour le dimensionnement de la chaussée des routes, nous avons effectué une série des essais CBR avec renforcement en variant le nombre de couches, son positionnement, le pourcentage de la matière de renforcement et l'énergie de compactage, tout ça afin de savoir l'efficacité et l'optimum de renforcement. On a conclu dans la première partie de ce chapitre les points suivants :

- L'optimum de pourcentage de pneu usagé est de 5%, et plus on augmente son contenu plus le CBR diminue.
- Le renforcement par les granulats de pneu usagé donne une augmentation de CBR par conséquent la diminution d'épaisseur de chaussée.
- Le renforcement par pneu usagé pour une énergie de compactage de 25 donne une résistance du sol très élevé.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, on a conclu que le modèle expérimental que nous avons utilisé dans cette étude n'est pas encore capable de donner de bons résultats. Nous continuerons les développements permettre à évaluer les dimensions géométriques du modèle expérimental (la plaque de charge) qui doit être prise en considération dans la détermination de la capacité portante des fondations superficielle renforcé par pneumatique usagé.



Conclusion générale

Conclusion générale

L'utilisation des pneus usagés dans le renforcement de sol est une méthode de disposition sûre. Pas seulement ça, elle est bonne sur le côté environnemental et économique.

Après notre étude expérimentale sur ce fait, on a conclu sur plusieurs points essentiels qui sont :

- Le pourcentage optimum pour les différents diamètres des granulats des pneus usagés est de 30% donne une amélioration remarquable pour les deux paramètres mécanique intrinsèque de sol (C , et ϕ) et par conséquent, lorsque on utilise les granulats des pneus usagés comme un matériau de renforcement, on peut avoir une augmentation de facteur de sécurité dans l'étude de stabilité des ouvrages de géotechnique.
- L'optimum de pourcentage de pneu usagé est de 5%, et plus on augmente son contenu plus l'ICBR diminue.
- Plus en diminuant le nombre de nappe de renforcement dans le sol, plus l'ICBR immédiat augmente, la présence du pneu usagé sous forme d'une seule nappe donne des meilleurs résultats.
- Le renforcement par les granulats de pneu usagé donne une augmentation de l'ICBR par conséquent la diminution d'épaisseur de chaussée.
- Le renforcement par pneu usagé pour une énergie de compactage de 25 donne une résistance du sol très élevé.
- Le modèle expérimental que nous avons utilisé dans le calcul de la capacité portante des fondations superficielles n'est pas encore capable de donner de bons résultats.
- Nous continuerons les développements permettre à évaluer les dimensions géométriques du modèle expérimental (la plaque de charge) qui doit être prise en considération dans la détermination de la capacité portante des fondations superficielle renforcé par pneumatique usagé.

A la fin de ce modeste travail et après ces résultats qui sont vraiment intéressantes, nous recommandant d'utiliser cette technique de renforcement par pneumatique usagé dans le domaine de géotechnique.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Baziz Fouad.**, 2012. Comportement d'une fondation superficielle située sur la crête d'un talus de sable renforcé par géogrilles. Université Hadj lakhdar –Batna
- Benbouza Assma.**, 2011. L'effet d'interference deux fondations filantes etroitement espacées reposant sur un sable renforcé par géogrilles . Université El Hadj Lakhdar Batna
- Mathieu Dhaybi.**, 2015. Renforcement de fondations superficielles par soil mixing : analyses par modélisation physique et numérique. L'institut national des sciences appliquées de Lyon
- HOCINI Hocine.**, 1992.: Etude probabiliste des ouvrages en sols renforcés : application à la terre armée et au clouage .l'université des Sciences et Techniques de Lille.
- T.MESSAS et Al.**,1998 Etude et réalisation de cisaillement vertical de la boîte à plan LzM,IUT A Département Génie Civil, Lyon.
- Didier FAU.**,2010. Le clouage des sols application au soutènement de fouille étude expérimentale et dimensionnement.l'écoule nationale des ponts et chaussées.
- Habib Trouzine,et Al**, 2010., Problématique des pneumatiques usagés en Algérie. Université Djilali Liabes, BP 89, Sidi Bel Abbès.
- kiyyour sami.**, 2014. Le clouage dans les ouvrages de soutènement. Conception et dimensionnement. Université Constantine1.
- Mathieu Dhaybi.**,2015. Renforcement de fondations superficielles par soil mixing : analyses par modélisation physique et numérique. L'institut national des sciences appliquées de Lyon.
- S.N. Moghaddas et Al.**,2012. Bearing capacity of a square model footing on sand reinforced with shredded tire – An experimental investigation. Construction and Building Materials 35 (2012) 547–556

Swarna Surya Teja.,2015. Stabilization of Subgrade soil of Highway Pavement using Waste Tyre Pieces. International Journal of Innovative Research in Science,Engineering and Technology.

Vinot V et Al., 2013. Shredded tyre send as fill material for embakment application . Journal of Environmental Research And Development Vol. 7 No. 4A, April-June 2013.

Mahmood Anvari et Al.,2014. Fine-grained sand reinforced with granulated tire chips. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication ISSN: 2321-8169 Volume: 2 Issue: 9 2879 – 2882.

Sanjeev Naval et Al.,2013. Utilisation of waste tire fiberes in granular soil . Proceedings of Indian Geotechnical Conference December 22-24,2013, Roorkee.

V. Vinot et Al.,2009. Investigationonbehaviour of reinforced with shredded waste tyres . IGC 2009, Guntur, INDIA.

Yeo Won Yoon et Al.,2004. Bearing capacity and settlement of tire-reinforced sands. Geotextiles and Geomembranes 22 (2004) 439–453.

Aoudai Karima., 2014. Recyclage des élastomères usagés.Unavarsité mouloud mernnerir de tizi ouzou.

Annexe 1

Annexe 1

Annexe 1

Résultats d'une étude expérimentale de la résistance mécanique des sols renforcés par pneumatiques usagés

Pneu 0-2(mm)

a. Sable renforcé par 30 % des granulats de pneu

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc= l(l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0,000	3600	0,000	0,000
15	0,22	0,05	0,085	3586,8	23,698	0,004
30	0,55	0,063	0,107	3567	30,025	0,009
45	0,85	0,072	0,122	3549	34,489	0,014
60	1,16	0,08	0,136	3530,4	38,523	0,019
75	1,45	0,082	0,139	3513	39,681	0,024
90	1,75	0,085	0,145	3495	41,345	0,029
105	2,03	0,09	0,153	3478,2	43,988	0,034
120	2,32	0,095	0,162	3460,8	46,666	0,039
135	2,62	0,1	0,170	3442,8	49,378	0,044
150	2,92	0,104	0,177	3424,8	51,623	0,049
165	3,21	0,108	0,184	3407,4	53,883	0,054
180	3,51	0,112	0,190	3389,4	56,175	0,059
195	3,81	0,118	0,201	3371,4	59,501	0,064
210	4,09	0,12	0,204	3354,6	60,812	0,068
225	4,35	0,122	0,207	3339	62,114	0,073
240	4,68	0,123	0,209	3319,2	62,997	0,078
255	4,98	0,128	0,218	3301,2	65,915	0,083
270	5,28	0,13	0,221	3283,2	67,312	0,088
285	5,58	0,13	0,221	3265,2	67,683	0,093
300	5,89	0,128	0,218	3246,6	67,024	0,098
315	6,17	0,128	0,218	3229,8	67,373	0,103

Tableau 1.1 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=1$ bar avec 30% de puces de pneu 0-2(mm).

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc= l(l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,23	0,06	0,102	3586,2	28,443	0,003
30	0,5	0,085	0,144	3570	40,476	0,008
45	0,79	0,1	0,17	3552,6	47,852	0,013
60	1,08	0,11	0,187	3535,2	52,896	0,018
75	1,37	0,115	0,195	3517,8	55,574	0,022
90	1,65	0,125	0,212	3501	60,696	0,0275

Annexe 1

105	1,95	0,132	0,224	3483	64,427	0,0325
120	2,22	0,14	0,238	3466,8	68,651	0,037
135	2,52	0,145	0,246	3448,8	71,474	0,042
150	2,81	0,15	0,255	3431,4	74,313	0,0468
165	3,11	0,155	0,263	3413,4	77,195	0,051
180	3,39	0,16	0,272	3396,6	80,08	0,056
195	3,69	0,165	0,28	3378,6	83,022	0,0615
210	3,97	0,17	0,289	3361,8	85,965	0,066
225	4,33	0,175	0,297	3340,2	89,066	0,072
240	4,56	0,18	0,306	3326,4	91,991	0,076
255	4,87	0,184	0,312	3307,8	94,564	0,081
270	5,14	0,188	0,319	3291,6	97,095	0,085
285	5,45	0,19	0,323	3273	98,686	0,090
300	5,74	0,192	0,326	3255,6	100,258	0,095
315	6,05	0,195	0,331	3237	102,409	0,1
330	6,35	0,197	0,334	3219	104,038	0,105
345	6,63	0,195	0,33	3202,2	103,522	0,11
360	6,92	0,195	0,33	3184,8	104,088	0,115
375	7,23	0,192	0,324	3166,2	103,088	0,121

Tableau 1.2 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=2$ bar avec 30% de puces de pneu 0-2(mm).

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc= l (l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0,000	0,000
15	0,15	0,035	0,06	3591	16,708	0,003
30	0,4	0,07	0,12	3576	33,557	0,007
45	0,69	0,09	0,15	3558,6	42,151	0,012
60	0,95	0,108	0,186	3543	52,498	0,016
75	1,24	0,122	0,212	3525,6	60,132	0,021
90	1,52	0,135	0,23	3508,8	65,549	0,025
105	1,8	0,148	0,256	3492	73,310	0,030
120	2,09	0,158	0,268	3474,6	77,131	0,035
135	2,38	0,165	0,28	3457,2	80,990	0,040
150	2,67	0,174	0,298	3439,8	86,633	0,045
165	2,96	0,18	0,31	3422,4	90,580	0,049
180	3,26	0,18	0,31	3404,4	91,059	0,054
195	3,56	0,188	0,326	3386,4	96,267	0,059
210	3,8	0,195	0,335	3372	99,348	0,063
225	4,15	0,2	0,34	3351	101,462	0,069
240	4,43	0,205	0,35	3334,2	104,973	0,074
255	4,73	0,21	0,36	3316,2	108,558	0,079
270	5,02	0,212	0,364	3298,8	110,343	0,084

Annexe 1

285	5,32	0,22	0,38	3280,8	115,825	0,089
300	5,61	0,222	0,382	3263,4	117,056	0,094
315	5,92	0,225	0,385	3244,8	118,651	0,099
330	6,23	0,23	0,39	3226,2	120,885	0,104
345	6,51	0,235	0,394	3209,4	122,764	0,109
360	6,8	0,24	0,408	3192	127,820	0,113
375	7,1	0,245	0,4165	3174	131,222	0,118
390	7,39	0,25	0,425	3156,6	134,639	0,123
405	7,69	0,255	0,4335	3138,6	138,119	0,128
420	7,99	0,26	0,442	3120,6	141,639	0,133
435	8,3	0,265	0,4505	3102	145,229	0,138
450	8,59	0,27	0,459	3084,6	148,804	0,143
465	8,89	0,272	0,4624	3066,6	150,786	0,148
480	9,2	0,274	0,4658	3048	152,822	0,153
495	9,48	0,272	0,4624	3031,2	152,547	0,158

Tableau 1.3 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma = 3$ bar avec 30% de puces de pneu 0-2(mm).

b. Sable renforcé par 40 % des granulats de pneu

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc = $l(l-\Delta l)$ (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,28	0,01	0,02	3583,2	5,582	0,005
30	0,56	0,017	0,027	3566,4	7,571	0,009
45	0,86	0,2	0,03	3548,4	8,455	0,014
60	1,15	0,028	0,046	3531	13,027	0,019
75	1,45	0,032	0,054	3513	15,371	0,024
90	1,74	0,038	0,066	3495,6	18,881	0,029
105	2,03	0,04	0,07	3478,2	20,125	0,034
120	2,33	0,042	0,074	3460,2	21,386	0,039
135	2,62	0,046	0,082	3442,8	23,818	0,044
150	2,92	0,05	0,09	3424,8	26,279	0,049
165	3,21	0,055	0,095	3407,4	27,880	0,054
180	3,51	0,06	0,1	3389,4	29,504	0,059
195	3,81	0,062	0,104	3371,4	30,848	0,064
210	4,11	0,068	0,116	3353,4	34,592	0,069
225	4,41	0,07	0,12	3335,4	35,978	0,074
240	4,71	0,072	0,124	3317,4	37,379	0,079
255	5	0,078	0,136	3300	41,212	0,083
270	5,3	0,082	0,142	3282	43,266	0,088
285	5,6	0,085	0,145	3264	44,424	0,093
300	5,88	0,088	0,148	3247,2	45,578	0,098
315	6,18	0,09	0,15	3229,2	46,451	0,103

Annexe 1

330	6,46	0,092	0,154	3212,4	47,939	0,108
345	6,78	0,09	0,15	3193,2	46,975	0,113

Tableau 1.4 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=1$ bar avec 40% de puces de pneu 0-2(mm).

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc= l(l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,23	0,01	0,02	3586,2	5,577	0,004
30	0,51	0,018	0,028	3569,4	7,844	0,009
45	0,81	0,03	0,05	3551,4	14,079	0,014
60	1,1	0,039	0,068	3534	19,242	0,018
75	1,4	0,045	0,08	3516	22,753	0,023
90	1,68	0,05	0,09	3499,2	25,720	0,028
105	1,97	0,055	0,095	3481,8	27,285	0,033
120	2,26	0,06	0,1	3464,4	28,865	0,038
135	2,57	0,062	0,104	3445,8	30,182	0,043
150	2,86	0,65	0,11	3428,4	32,085	0,048
165	3,16	0,068	0,116	3410,4	34,014	0,053
180	3,46	0,07	0,12	3392,4	35,373	0,058
195	3,86	0,072	0,124	3368,4	36,813	0,064
210	4,16	0,078	0,136	3350,4	40,592	0,069
225	4,46	0,085	0,145	3332,4	43,512	0,074
240	4,75	0,088	0,148	3315	44,646	0,079
255	5,05	0,094	0,158	3297	47,922	0,084
270	5,36	0,098	0,166	3278,4	50,634	0,089
285	5,65	0,102	0,174	3261	53,358	0,094
300	5,94	0,108	0,186	3243,6	57,344	0,099
315	6,25	0,112	0,194	3225	60,155	0,104
330	6,6	0,116	0,202	3204	63,046	0,110
345	6,85	0,112	0,194	3189	60,834	0,114

Tableau 1.5 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=2$ bar avec 40% de puces de pneu 0-2(mm).

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc= l(l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,26	0,013	0,023	3584,4	6,417	0,004
30	0,45	0,022	0,034	3573	9,516	0,008
45	0,75	0,03	0,05	3555	14,065	0,013
60	1,04	0,039	0,048	3537,6	13,569	0,017
75	1,33	0,045	0,08	3520,2	22,726	0,022

Annexe 1

90	1,63	0,05	0,09	3502,2	25,698	0,027
105	1,91	0,055	0,095	3485,4	27,257	0,032
120	2,21	0,06	0,1	3467,4	28,840	0,037
135	2,5	0,067	0,114	3450	33,043	0,042
150	2,81	0,07	0,12	3431,4	34,971	0,047
165	3,09	0,076	0,132	3414,6	38,658	0,052
180	3,39	0,08	0,14	3396,6	41,218	0,057
195	3,67	0,083	0,143	3379,8	42,310	0,061
210	3,97	0,085	0,145	3361,8	43,132	0,066
225	4,26	0,087	0,145	3344,4	43,356	0,071
240	4,55	0,09	0,15	3327	45,086	0,076
255	4,86	0,095	0,16	3308,4	48,362	0,081
270	5,14	0,1	0,17	3291,6	51,647	0,086
285	5,47	0,105	0,18	3271,8	55,016	0,091
300	5,75	0,107	0,184	3255	56,528	0,096
315	6,03	0,11	0,19	3238,2	58,675	0,101
330	6,31	0,112	0,194	3221,4	60,222	0,105
345	6,62	0,117	0,204	3202,8	63,694	0,110
360	6,91	0,12	0,21	3185,4	65,926	0,115
375	7,21	0,122	0,212	3167,4	66,932	0,120
390	7,5	0,125	0,215	3150	68,254	0,125
405	7,8	0,125	0,215	3132	68,646	0,130
420	8,09	0,127	0,217	3114,6	69,672	0,135
435	8,39	0,13	0,22	3096,6	71,046	0,140
450	8,69	0,13	0,22	3078,6	71,461	0,145
465	8,99	0,13	0,22	3060,6	71,881	0,150
480	9,28	0,13	0,22	3043,2	72,292	0,155
495	9,58	0,13	0,22	3025,2	72,722	0,160
510	9,88	0,128	0,218	3007,2	72,493	0,165

Tableau 1.6 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=3$ bar avec 40% de puces de pneu 0-2(mm).

c. Sable renforcé par 50 % des granulats de pneu

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc= l (l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0,000	0,000
15	0,27	0,018	0,028	3583,8	7,813	0,005
30	0,57	0,025	0,04	3565,8	11,218	0,010
45	0,87	0,03	0,05	3547,8	14,093	0,015
60	1,16	0,038	0,066	3530,4	18,695	0,019
75	1,44	0,04	0,07	3513,6	19,923	0,024
90	1,75	0,045	0,08	3495	22,890	0,029
105	2,02	0,05	0,09	3478,8	25,871	0,034
120	2,32	0,052	0,092	3460,8	26,583	0,039

Annexe 1

135	2,61	0,058	0,098	3443,4	28,460	0,044
150	2,9	0,06	0,1	3426	29,189	0,048
165	3,2	0,065	0,11	3408	32,277	0,053
180	3,5	0,068	0,116	3390	34,218	0,058
195	3,8	0,07	0,12	3372	35,587	0,063
210	4,08	0,072	0,124	3355,2	36,958	0,068
225	4,37	0,075	0,13	3337,8	38,948	0,073
240	4,67	0,078	0,136	3319,8	40,966	0,078
255	4,96	0,08	0,14	3302,4	42,393	0,083
270	5,26	0,085	0,145	3284,4	44,148	0,088
285	5,56	0,087	0,147	3266,4	45,004	0,093
300	5,84	0,085	0,145	3249,6	44,621	0,097

Tableau 1.7 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=1$ bar avec 50% de puces de pneu0-2(mm).

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S_c = l(l-\Delta l)$ (mm ²)	$\tau = T/S_c$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,23	0,02	0,03	3586,2	8,36	0,003
30	0,53	0,03	0,05	3568,2	14,012	0,008
45	0,81	0,035	0,06	3551,4	16,857	0,0135
60	1,1	0,04	0,07	3534	19,807	0,0118
75	1,4	0,048	0,086	3516	24,459	0,023
90	1,68	0,052	0,092	3499,2	26,291	0,028
105	1,99	0,058	0,098	3480,6	28,156	0,033
120	2,29	0,06	0,1	3462,6	28,880	0,038
135	2,59	0,065	0,11	3444,6	31,934	0,043
150	2,87	0,07	0,12	3427,8	35,007	0,047
165	3,17	0,075	0,13	3409,8	38,125	0,052
180	3,4	0,08	0,14	3396	41,22	0,0566
195	3,76	0,085	0,145	3374,4	42,970	0,062
210	4,03	0,089	0,149	3358,2	44,3690	0,0671
225	4,34	0,09	0,15	3339,6	44,915	0,072
240	4,64	0,095	0,16	3321,6	48,169	0,077
255	4,94	0,1	0,17	3303,6	51,459	0,082
270	5,28	0,097	0,164	3283,2	49,951	0,088
285	5,58	0,95	0,16	3265,2	49,001	0,093

Tableau 1.8 Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=2$ bar avec 50% de puces de pneu0-2(mm).

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S_c = l(l-\Delta l)$ (mm ²)	$\tau = T/S_c$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0,000	0,000
15	0,21	0,04	0,07	3587,4	19,513	0,004
30	0,49	0,055	0,095	3570,6	26,606	0,008
45	0,77	0,07	0,12	3553,8	33,767	0,013

Annexe 1

60	1,06	0,08	0,14	3536,4	39,588	0,018
75	1,37	0,085	0,145	3517,8	41,219	0,023
90	1,65	0,09	0,15	3501	42,845	0,028
105	1,95	0,095	0,16	3483	45,937	0,033
120	2,23	0,1	0,17	3466,2	49,045	0,037
135	2,52	0,104	0,178	3448,8	51,612	0,042
150	2,82	0,105	0,18	3430,8	52,466	0,047
165	3,13	0,11	0,19	3412,2	55,683	0,052
180	3,42	0,11	0,19	3394,8	55,968	0,057
195	3,72	0,115	0,2	3376,8	59,228	0,062
210	4	0,117	0,204	3360	60,714	0,067
225	4,3	0,115	0,2	3342	59,844	0,072
240	4,6	0,115	0,2	3324	60,168	0,077
255	4,9	0,11	0,19	3306	57,471	0,082

Tableau 1.9 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=3$ bar avec 50% de puces de pneu 0-2(mm).

Pneu 0-4(mm)

a. Sable renforcé par 10 % des granulats de pneu

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc= l (l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,2	0,035	0,06	3588	16,722	0,003
30	0,48	0,04	0,07	3571,2	19,601	0,008
45	0,78	0,05	0,09	3553,2	25,329	0,013
60	1,06	0,052	0,092	3536,4	26,015	0,018
75	1,37	0,055	0,095	3517,8	27,006	0,023
90	1,66	0,06	0,1	3500,4	28,568	0,028
105	1,94	0,065	0,11	3483,6	31,577	0,032
120	2,25	0,07	0,12	3465	34,632	0,038
135	2,55	0,072	0,124	3447	35,973	0,043
150	2,85	0,075	0,13	3429	37,912	0,048
165	3,14	0,078	0,136	3411,6	39,864	0,052
180	3,43	0,08	0,14	3394,2	41,247	0,057
195	3,74	0,08	0,14	3375,6	41,474	0,062
210	4,03	0,08	0,14	3358,2	41,689	0,067
225	4,33	0,082	0,142	3340,2	42,512	0,072
240	4,61	0,082	0,142	3323,4	42,727	0,077
255	4,93	0,082	0,142	3304,2	42,976	0,082
270	5,23	0,082	0,142	3286,2	43,211	0,087
285	5,53	0,08	0,14	3268,2	42,837	0,092

Tableau 1.10 Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=1$ bar avec

Annexe 1

10% de puces de pneu 0-4(mm).

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc= l(l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,25	0,04	0,07	3585	19,526	0,004
30	0,52	0,05	0,09	3568,8	25,219	0,009
45	0,81	0,06	0,1	3551,4	28,158	0,014
60	1,1	0,07	0,12	3534	33,956	0,018
75	1,39	0,08	0,14	3516,6	39,811	0,023
90	1,67	0,09	0,15	3499,8	42,860	0,028
105	1,97	0,095	0,16	3481,8	45,953	0,033
120	2,26	0,102	0,174	3464,4	50,225	0,038
135	2,55	0,11	0,19	3447	55,120	0,043
150	2,85	0,115	0,2	3429	58,326	0,048
165	3,14	0,122	0,212	3411,6	62,141	0,052
180	3,43	0,13	0,22	3394,2	64,816	0,057
195	3,73	0,132	0,224	3376,2	66,347	0,062
210	4,03	0,135	0,23	3358,2	68,489	0,067
225	4,34	0,135	0,23	3339,6	68,871	0,072
240	4,63	0,132	0,224	3322,2	67,425	0,077
255	4,83	0,13	0,22	3310,2	66,461	0,081

Tableau 1.11 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=2$ bar avec 10% de puces de pneu 0-4(mm).

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc= l(l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,23	0,028	0,046	3586,2	12,827	0,004
30	0,47	0,04	0,07	3571,8	19,598	0,008
45	0,76	0,05	0,09	3554,4	25,321	0,013
60	1,05	0,052	0,092	3537	26,011	0,018
75	1,35	0,062	0,104	3519	29,554	0,023
90	1,62	0,07	0,12	3502,8	34,258	0,027
105	1,92	0,078	0,136	3484,8	39,027	0,032
120	2,21	0,085	0,145	3467,4	41,818	0,037
135	2,51	0,09	0,15	3449,4	43,486	0,042
150	2,8	0,098	0,166	3432	48,368	0,047
165	3,09	0,102	0,174	3414,6	50,958	0,052
180	3,38	0,11	0,19	3397,2	55,928	0,056
195	3,67	0,115	0,2	3379,8	59,175	0,061
210	3,97	0,118	0,206	3361,8	61,277	0,066
225	4,24	0,12	0,21	3345,6	62,769	0,071
240	4,53	0,122	0,212	3328,2	63,698	0,076
255	4,85	0,128	0,218	3309	65,881	0,081
270	5,15	0,138	0,236	3291	71,711	0,086

Annexe 1

285	5,45	0,145	0,25	3273	76,383	0,091
300	5,77	0,148	0,256	3253,8	78,677	0,096
315	6,04	0,15	0,26	3237,6	80,306	0,101
330	6,31	0,148	0,256	3221,4	79,469	0,105

Tableau 1.12 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=3$ bar avec 10% de puces de pneu 0-4(mm).

b. Sable renforcé par 20 % des granulats de pneu

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S_c = l(l-\Delta l)$ (mm ²)	$\tau = T/S_c$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,19	0,028	0,046	3588,6	12,818	0,003
30	0,48	0,04	0,07	3571,2	19,601	0,008
45	0,76	0,045	0,08	3554,4	22,507	0,013
60	1,08	0,048	0,086	3535,2	24,327	0,018
75	1,37	0,05	0,09	3517,8	25,584	0,023
90	1,66	0,056	0,096	3500,4	27,425	0,028
105	1,98	0,058	0,098	3481,2	28,151	0,033
120	2,26	0,06	0,1	3464,4	28,865	0,038
135	2,56	0,06	0,1	3446,4	29,016	0,043
150	2,96	0,065	0,11	3422,4	32,141	0,049
165	3,16	0,067	0,114	3410,4	33,427	0,053
180	3,46	0,07	0,12	3392,4	35,373	0,058
195	3,75	0,072	0,124	3375	36,741	0,063
210	4,05	0,075	0,13	3357	38,725	0,068
225	4,35	0,08	0,14	3339	41,929	0,073
240	4,64	0,08	0,14	3321,6	42,148	0,077
255	4,93	0,082	0,142	3304,2	42,976	0,082
270	5,22	0,085	0,145	3286,8	44,116	0,087
285	5,52	0,087	0,147	3268,8	44,971	0,092
300	5,83	0,09	0,15	3250,2	46,151	0,097
315	6,13	0,09	0,15	3232,2	46,408	0,102
330	6,42	0,09	0,15	3214,8	46,659	0,107
345	6,72	0,088	0,148	3196,8	46,296	0,112

Tableau 1.13 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=1$ bar avec 20% de puces de pneu 0-4(mm).

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S_c = l(l-\Delta l)$ (mm ²)	$\tau = T/S_c$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,2	0,03	0,05	3588	13,935	0,003
30	0,48	0,042	0,074	3571,2	20,721	0,008
45	0,76	0,05	0,09	3554,4	25,321	0,013

Annexe 1

60	1,05	0,055	0,095	3537	26,859	0,018
75	1,33	0,057	0,097	3520,2	27,555	0,022
90	1,63	0,06	0,1	3502,2	28,553	0,027
105	1,92	0,062	0,104	3484,8	29,844	0,032
120	2,2	0,065	0,11	3468	31,719	0,037
135	2,5	0,07	0,12	3450	34,783	0,042
150	2,79	0,075	0,13	3432,6	37,872	0,047
165	3,09	0,08	0,14	3414,6	41,000	0,052
180	3,39	0,082	0,142	3396,6	41,807	0,057
195	3,68	0,085	0,145	3379,2	42,910	0,061
210	3,98	0,09	0,15	3361,2	44,627	0,066
225	4,29	0,094	0,158	3342,6	47,269	0,072
240	4,57	0,098	0,166	3325,8	49,913	0,076
255	4,88	0,1	0,17	3307,2	51,403	0,081
270	5,16	0,102	0,174	3290,4	52,881	0,086
285	5,46	0,108	0,186	3272,4	56,839	0,091
300	5,75	0,118	0,186	3255	57,143	0,096
315	6,05	0,118	0,186	3237	57,461	0,101
330	6,35	0,118	0,186	3219	57,782	0,106
345	6,65	0,12	0,21	3201	65,604	0,111

Tableau 1.14 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=2$ bar avec 20% de puces de pneu 0-4(mm).

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc= l (l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,18	0,044	0,078	3589,2	21,732	0,003
30	0,47	0,055	0,095	3571,8	26,597	0,008
45	0,76	0,062	0,104	3554,4	29,260	0,013
60	1,04	0,07	0,12	3537,6	33,921	0,017
75	1,34	0,075	0,13	3519,6	36,936	0,022
90	1,64	0,08	0,14	3501,6	39,982	0,027
105	1,94	0,082	0,142	3483,6	40,762	0,032
120	2,23	0,087	0,147	3466,2	42,410	0,037
135	2,51	0,09	0,15	3449,4	43,486	0,042
150	2,8	0,094	0,158	3432	46,037	0,047
165	3,1	0,098	0,166	3414	48,623	0,052
180	3,4	0,1	0,17	3396	50,059	0,057
195	3,69	0,102	0,174	3378,6	51,501	0,062
210	3,99	0,105	0,18	3360,6	53,562	0,067
225	4,29	0,107	0,184	3342,6	55,047	0,072
240	4,58	0,11	0,19	3325,2	57,139	0,076
255	4,88	0,11	0,19	3307,2	57,450	0,081
270	5,18	0,108	0,206	3289,2	62,629	0,086
285	5,48	0,12	0,21	3271,2	64,197	0,091

Annexe 1

300	5,79	0,122	0,212	3252,6	65,179	0,097
315	6,08	0,128	0,218	3235,2	67,384	0,101
330	6,38	0,13	0,22	3217,2	68,382	0,106
345	6,98	0,132	0,224	3181,2	70,414	0,116
360	7,28	0,135	0,23	3163,2	72,711	0,121
375	7,58	0,14	0,24	3145,2	76,307	0,126
390	7,88	0,138	0,236	3127,2	75,467	0,131

Tableau 1.15 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=3$ bar avec 20% de puces de pneu 0-4(mm).

c. Sable renforcé par 30 % des granulats de pneu

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc= l (l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,21	0,03	0,05	3587,4	13,938	0,004
30	0,51	0,04	0,07	3569,4	19,611	0,009
45	0,81	0,048	0,086	3551,4	24,216	0,014
60	1,11	0,052	0,092	3533,4	26,037	0,019
75	1,38	0,06	0,1	3517,2	28,432	0,023
90	1,67	0,062	0,104	3499,8	29,716	0,028
105	1,97	0,068	0,116	3481,8	33,316	0,033
120	2,27	0,07	0,12	3463,8	34,644	0,038
135	2,57	0,075	0,13	3445,8	37,727	0,043
150	2,86	0,08	0,14	3428,4	40,835	0,048
165	3,16	0,082	0,142	3410,4	41,637	0,053
180	3,46	0,088	0,148	3392,4	43,627	0,058
195	3,74	0,09	0,15	3375,6	44,437	0,062
210	4,04	0,095	0,16	3357,6	47,653	0,067
225	4,34	0,098	0,166	3339,6	49,707	0,072
240	4,64	0,1	0,17	3321,6	51,180	0,077
255	4,93	0,102	0,174	3304,2	52,660	0,082
270	5,23	0,105	0,18	3286,2	54,775	0,087
285	5,52	0,108	0,186	3268,8	56,902	0,092
300	5,81	0,11	0,19	3251,4	58,436	0,097
315	6,11	0,11	0,19	3233,4	58,762	0,102
330	6,4	0,112	0,194	3216	60,323	0,107
345	6,7	0,115	0,2	3198	62,539	0,112
360	6,99	0,12	0,21	3180,6	66,025	0,117
375	7,28	0,118	0,206	3163,2	65,124	0,121

Tableau 1.16 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=1$ bar avec 30% de puces de pneu 0-4(mm).

Annexe 1

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc= l(l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,19	0,035	0,06	3588,6	16,720	0,003
30	0,45	0,045	0,08	3573	22,390	0,008
45	0,74	0,052	0,092	3555,6	25,875	0,012
60	1,03	0,06	0,1	3538,2	28,263	0,017
75	1,32	0,065	0,11	3520,8	31,243	0,022
90	1,6	0,072	0,124	3504	35,388	0,027
105	1,89	0,08	0,14	3486,6	40,154	0,032
120	2,18	0,085	0,145	3469,2	41,796	0,036
135	2,48	0,09	0,15	3451,2	43,463	0,041
150	2,77	0,098	0,166	3433,8	48,343	0,046
165	3,07	0,1	0,17	3415,8	49,769	0,051
180	3,35	0,108	0,186	3399	54,722	0,056
195	3,66	0,11	0,19	3380,4	56,206	0,061
210	3,94	0,118	0,206	3363,6	61,244	0,066
225	4,23	0,12	0,21	3346,2	62,758	0,071
240	4,52	0,125	0,215	3328,8	64,588	0,075
255	4,82	0,13	0,22	3310,8	66,449	0,080
270	5,11	0,132	0,224	3293,4	68,015	0,085
285	5,4	0,135	0,23	3276	70,208	0,090
300	5,7	0,14	0,24	3258	73,665	0,095
315	6	0,142	0,244	3240	75,309	0,100
330	6,3	0,145	0,25	3222	77,592	0,105
345	6,6	0,148	0,256	3204	79,900	0,110
360	6,9	0,152	0,262	3186	82,235	0,115
375	7,2	0,155	0,265	3168	83,649	0,120
390	7,5	0,158	0,265	3150	84,127	0,125
405	7,8	0,155	0,265	3132	84,610	0,130
420	8,1	0,155	0,265	3114	85,100	0,135

Tableau 1.17 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=2$ bar avec 30% de puces de pneu 0-4(mm).

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc= l(l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,15	0,032	0,054	3591	15,038	0,003
30	0,42	0,045	0,06	3574,8	16,784	0,007
45	0,71	0,052	0,092	3557,4	25,862	0,012
60	0,99	0,065	0,11	3540,6	31,068	0,017
75	1,28	0,072	0,124	3523,2	35,195	0,021
90	1,58	0,078	0,136	3505,2	38,799	0,026

Annexe 1

105	1,86	0,082	0,142	3488,4	40,706	0,031
120	2,11	0,09	0,15	3473,4	43,185	0,035
135	2,43	0,095	0,16	3454,2	46,320	0,041
150	2,75	0,1	0,17	3435	49,491	0,046
165	3,03	0,108	0,186	3418,2	54,415	0,051
180	3,33	0,11	0,19	3400,2	55,879	0,056
195	3,62	0,118	0,206	3382,8	60,896	0,060
210	3,91	0,12	0,21	3365,4	62,400	0,065
225	4,2	0,125	0,215	3348	64,217	0,070
240	4,5	0,13	0,22	3330	66,066	0,075
255	4,79	0,135	0,23	3312,6	69,432	0,080
270	5,08	0,14	0,24	3295,2	72,833	0,085
285	5,38	0,142	0,244	3277,2	74,454	0,090
300	5,69	0,148	0,256	3258,6	78,561	0,095
315	5,97	0,15	0,26	3241,8	80,202	0,100
330	6,26	0,16	0,27	3224,4	83,737	0,104
345	6,57	0,165	0,28	3205,8	87,342	0,110
360	6,86	0,172	0,294	3188,4	92,209	0,114
375	7,16	0,178	0,306	3170,4	96,518	0,119
390	7,44	0,185	0,32	3153,6	101,471	0,124
405	7,75	0,19	0,33	3135	105,263	0,129
420	8,03	0,195	0,335	3118,2	107,434	0,134
435	8,32	0,2	0,34	3100,8	109,649	0,139
450	8,61	0,205	0,35	3083,4	113,511	0,144
465	8,89	0,2	0,34	3066,6	110,872	0,148

Tableau 1.18 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=3$ bar avec 30% de puces de pneu 0-4(mm).

d. Sable renforcé par 40 % des granulats de pneu

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc= l(l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,22	0,015	0,025	3586,8	6,970	0,004
30	0,51	0,025	0,04	3569,4	11,206	0,009
45	0,81	0,032	0,054	3551,4	15,205	0,014
60	1,11	0,035	0,06	3533,4	16,981	0,019
75	1,4	0,04	0,07	3516	19,909	0,023
90	1,69	0,042	0,074	3498,6	21,151	0,028
105	1,99	0,048	0,086	3480,6	24,708	0,033
120	2,28	0,05	0,09	3463,2	25,988	0,038
135	2,58	0,055	0,095	3445,2	27,575	0,043
150	2,87	0,06	0,1	3427,8	29,173	0,048
165	3,17	0,062	0,104	3409,8	30,500	0,053
180	3,46	0,068	0,116	3392,4	34,194	0,058

Annexe 1

195	3,77	0,07	0,12	3373,8	35,568	0,063
210	4,05	0,075	0,13	3357	38,725	0,068
225	4,35	0,08	0,14	3339	41,929	0,073
240	4,64	0,082	0,142	3321,6	42,750	0,077
255	4,94	0,085	0,145	3303,6	43,892	0,082
270	5,22	0,09	0,15	3286,8	45,637	0,087
285	5,53	0,094	0,158	3268,2	48,345	0,092
300	5,82	0,098	0,166	3250,8	51,064	0,097
315	6,12	0,1	0,17	3232,8	52,586	0,102
330	6,42	0,1	0,17	3214,8	52,880	0,107
345	6,72	0,1	0,17	3196,8	53,178	0,112
360	7	0,102	0,174	3180	54,717	0,117
375	7,31	0,105	0,18	3161,4	56,937	0,122
390	7,61	0,108	0,186	3143,4	59,172	0,127
405	7,91	0,105	0,18	3125,4	57,593	0,132

Tableau 1.19 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=1$ bar avec 40% de puces de pneu 0-4(mm).

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc= l(l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,23	0,02	0,03	3586,2	8,365	0,004
30	0,53	0,03	0,05	3568,2	14,013	0,009
45	0,81	0,035	0,06	3551,4	16,895	0,014
60	1,1	0,04	0,07	3534	19,808	0,018
75	1,4	0,048	0,086	3516	24,460	0,023
90	1,68	0,052	0,092	3499,2	26,292	0,028
105	1,99	0,058	0,098	3480,6	28,156	0,033
120	2,29	0,06	0,1	3462,6	28,880	0,038
135	2,59	0,065	0,11	3444,6	31,934	0,043
150	2,87	0,07	0,12	3427,8	35,008	0,048
165	3,17	0,075	0,13	3409,8	38,125	0,053
180	3,4	0,08	0,14	3396	41,225	0,057
195	3,76	0,085	0,145	3374,4	42,971	0,063
210	4,03	0,089	0,149	3358,2	44,369	0,067
225	4,34	0,09	0,15	3339,6	44,916	0,072
240	4,64	0,095	0,16	3321,6	48,170	0,077
255	4,94	0,1	0,17	3303,6	51,459	0,082
270	5,22	0,102	0,174	3286,8	52,939	0,087
285	5,53	0,105	0,18	3268,2	55,076	0,092
300	5,83	0,107	0,184	3250,2	56,612	0,097
315	6,11	0,11	0,19	3233,4	58,762	0,102
330	6,41	0,112	0,194	3215,4	60,335	0,107

Annexe 1

345	6,71	0,115	0,2	3197,4	62,551	0,112
360	7	0,117	0,204	3180	64,151	0,117
375	7,3	0,12	0,21	3162	66,414	0,122
390	7,6	0,118	0,206	3144	65,522	0,127

Tableau 1.20 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=2$ bar avec 40% de puces de pneu 0-4(mm).

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc= l(l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,21	0,035	0,06	3587,4	16,725	0,004
30	0,49	0,05	0,09	3570,6	25,206	0,008
45	0,79	0,06	0,1	3552,6	28,148	0,013
60	1,08	0,07	0,12	3535,2	33,944	0,018
75	1,35	0,075	0,13	3519	36,942	0,023
90	1,63	0,08	0,14	3502,2	39,975	0,027
105	1,92	0,09	0,15	3484,8	43,044	0,032
120	2,23	0,095	0,16	3466,2	46,160	0,037
135	2,52	0,1	0,17	3448,8	49,293	0,042
150	2,81	0,108	0,186	3431,4	54,205	0,047
165	3,1	0,115	0,2	3414	58,582	0,052
180	3,41	0,12	0,21	3395,4	61,848	0,057
195	3,7	0,125	0,215	3378	63,647	0,062
210	3,99	0,13	0,22	3360,6	65,465	0,067
225	4,29	0,138	0,236	3342,6	70,604	0,072
240	4,6	0,14	0,24	3324	72,202	0,077
255	4,89	0,145	0,25	3306,6	75,606	0,082
270	5,18	0,15	0,26	3289,2	79,047	0,086
285	5,46	0,155	0,265	3272,4	80,980	0,091
300	5,78	0,155	0,265	3253,2	81,458	0,096
315	6,06	0,15	0,26	3236,4	80,336	0,101

Tableau 1.21 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=3$ bar avec 40% de puces de pneu 0-4(mm).

e. Sable renforcé par 50 % des granulats de pneu

t (s)	Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	Sc= l(l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,27	0,018	0,028	3583,8	7,813	0,005
30	0,57	0,025	0,04	3565,8	11,218	0,010
45	0,87	0,03	0,05	3547,8	14,093	0,015
60	1,16	0,038	0,066	3530,4	18,695	0,019

Annexe 1

75	1,44	0,04	0,07	3513,6	19,923	0,024
90	1,75	0,045	0,08	3495	22,890	0,029
105	2,02	0,05	0,09	3478,8	25,871	0,034
120	2,32	0,052	0,092	3460,8	26,583	0,039
135	2,61	0,058	0,098	3443,4	28,460	0,044
150	2,9	0,06	0,1	3426	29,189	0,048
165	3,2	0,065	0,11	3408	32,277	0,053
180	3,5	0,068	0,116	3390	34,218	0,058
195	3,8	0,07	0,12	3372	35,587	0,063
210	4,08	0,072	0,124	3355,2	36,958	0,068
225	4,37	0,075	0,13	3337,8	38,948	0,073
240	4,67	0,078	0,136	3319,8	40,966	0,078
255	4,96	0,08	0,14	3302,4	42,393	0,083
270	5,26	0,085	0,145	3284,4	44,148	0,088
285	5,56	0,087	0,147	3266,4	45,004	0,093
300	5,85	0,09	0,15	3249	46,168	0,098
315	6,15	0,092	0,154	3231	47,663	0,103
330	6,45	0,095	0,16	3213	49,798	0,108
345	6,76	0,097	0,164	3194,4	51,340	0,113
360	7,04	0,099	0,168	3177,6	52,870	0,117
375	7,35	0,1	0,17	3159	53,814	0,123
390	7,63	0,099	0,168	3142,2	53,466	0,127

Tableau 1.22 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=1$ bar avec 50% de puces de pneu 0-4(mm).

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S_c = l(l-\Delta l)$ (mm ²)	$\tau = T/S_c$ (kPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,27	0,02	0,03	3583,8	8,371	0,005
30	0,53	0,028	0,046	3568,2	12,892	0,009
45	0,8	0,035	0,06	3552	16,892	0,013
60	1,07	0,04	0,07	3535,8	19,797	0,018
75	1,37	0,052	0,092	3517,8	26,153	0,023
90	1,66	0,058	0,098	3500,4	27,997	0,028
105	1,97	0,062	0,104	3481,8	29,870	0,033
120	2,26	0,068	0,116	3464,4	33,483	0,038
135	2,55	0,07	0,12	3447	34,813	0,043
150	2,84	0,075	0,13	3429,6	37,905	0,047
165	3,12	0,08	0,14	3412,8	41,022	0,052
180	3,42	0,085	0,145	3394,8	42,712	0,057
195	3,71	0,092	0,154	3377,4	45,597	0,062
210	4,01	0,098	0,168	3359,4	50,009	0,067
225	4,31	0,1	0,17	3341,4	50,877	0,072

Annexe 1

240	4,6	0,105	0,18	3324	54,152	0,077
255	4,9	0,108	0,186	3306	56,261	0,082
270	5,2	0,11	0,19	3288	57,786	0,087
285	5,5	0,112	0,194	3270	59,327	0,092
300	5,79	0,115	0,2	3252,6	61,489	0,097
315	6,09	0,118	0,206	3234,6	63,686	0,102
330	6,39	0,118	0,206	3216,6	64,043	0,107
345	6,68	0,115	0,2	3199,2	62,516	0,111

Tableau1.23 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=2$ bar avec 50% de puces de pneu 0-4(mm).

t (s)	Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	Sc= l (l- Δl) (mm ²)	$\tau = T/Sc$ (KPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	3600	0	0
15	0,24	0,022	0,034	3585,6	9,482	0,004
30	0,52	0,035	0,06	3568,8	16,812	0,009
45	0,79	0,042	0,074	3552,6	20,830	0,013
60	1,07	0,05	0,09	3535,8	25,454	0,018
75	1,37	0,055	0,095	3517,8	27,006	0,023
90	1,66	0,06	0,1	3500,4	28,568	0,028
105	1,96	0,065	0,11	3482,4	31,587	0,033
120	2,25	0,07	0,12	3465	34,632	0,038
135	2,54	0,075	0,13	3447,6	37,707	0,042
150	2,84	0,08	0,14	3429,6	40,821	0,047
165	3,14	0,09	0,15	3411,6	43,968	0,052
180	3,43	0,092	0,154	3394,2	45,372	0,057
195	3,72	0,098	0,166	3376,8	49,159	0,062
210	4,02	0,102	0,174	3358,8	51,804	0,067
225	4,32	0,11	0,19	3340,8	56,873	0,072
240	4,6	0,115	0,2	3324	60,168	0,077
255	4,9	0,12	0,21	3306	63,521	0,082
270	5,19	0,12	0,21	3288,6	63,857	0,087
285	5,48	0,122	0,212	3271,2	64,808	0,091
300	5,79	0,128	0,218	3252,6	67,023	0,097
315	6,09	0,13	0,22	3234,6	68,015	0,102
330	6,39	0,13	0,22	3216,6	68,395	0,107
345	6,67	0,128	0,218	3199,8	68,129	0,111

Tableau1.24 : Lecture de l'essai de cisaillement pour $\sigma=3$ bar avec 50% de puces de pneu 0-4(mm).



Annexe 2

Annexe 2

Annexe 2

Résultats de L'ICBR (chapitre IV)

1. Sable entièrement renforcé

- Granulats de pneu 0-4 (mm)

25 Coups

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,025	0,555	1931,23	0,287	0,54
1,25	0,047	1,044	1931,23	0,541	1,08
2	0,075	1,67	1931,23	0,865	1,72
2,5	0,09	2	1931,23	1,036	2,16
5	0,095	2,11	1931,23	1,093	4,31
7,5	0,089	1,978	1931,23	1,024	6,47
10	0,1	2,22	1931,23	1,150	8,62

Tableau 2.1 : Lecture de l'essai CBR sable non renforcé (25 coups)

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,226	0,0	0,00
0,625	0,018	0,396	1931,226	0,205	0,54
1,25	0,033	0,736	1931,226	0,381	1,08
2	0,052	1,154	1931,226	0,598	1,72
2,5	0,065	1,445	1931,226	0,748	2,16
5	0,102	2,264	1931,226	1,172	4,31
7,5	0,088	1,956	1931,226	1,013	6,47
10	0,085	1,894	1931,226	0,981	8,62

Tableau 2.2 : Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 5% (25 coups)

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,226	0,000	0,00
0,625	0,006	0,132	1931,226	0,068	0,54
1,25	0,012	0,264	1931,226	0,137	1,08
2	0,021	0,462	1931,226	0,239	1,72
2,5	0,027	0,581	1931,226	0,301	2,16
5	0,062	1,344	1931,226	0,696	4,31
7,5	0,094	2,088	1931,226	1,081	6,47
10	0,108	2,396	1931,226	1,241	8,62

Tableau 2.3 : Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 10% (25 coups)

Annexe 2

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0	0,00
0,625	0,007	0,154	1931,23	0,080	0,54
1,25	0,013	0,286	1931,23	0,148	1,08
2	0,02	0,44	1931,23	0,228	1,72
2,5	0,024	0,532	1931,23	0,275	2,16
5	0,05	1,11	1931,23	0,575	4,31
7,5	0,078	1,732	1931,23	0,897	6,47
10	0,085	1,89	1931,23	0,979	8,62

Tableau 2.4 : Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 15% (25 coups)

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0	0,00
0,625	0,004	0,088	1931,23	0,046	0,54
1,25	0,008	0,176	1931,23	0,091	1,08
2	0,012	0,264	1931,23	0,137	1,72
2,5	0,014	0,308	1931,23	0,159	2,16
5	0,028	0,624	1931,23	0,323	4,31
7,5	0,045	1	1931,23	0,518	6,47
10	0,072	1,604	1931,23	0,831	8,62

Tableau 2.5 : Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 20% (25 coups)

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,000	0,00
0,625	0,003	0,066	1931,23	0,034	0,54
1,25	0,006	0,132	1931,23	0,068	1,08
2	0,009	0,198	1931,23	0,103	1,72
2,5	0,01	0,22	1931,23	0,114	2,16
5	0,018	0,396	1931,23	0,205	4,31
7,5	0,033	0,736	1931,23	0,381	6,47
10	0,048	1,066	1931,23	0,552	8,62

Tableau 2.6 : Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 25% (25 coups)

Annexe 2

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,000	0,00
0,625	0,003	0,066	1931,23	0,034	0,54
1,25	0,006	0,132	1931,23	0,068	1,08
2	0,009	0,198	1931,23	0,103	1,72
2,5	0,01	0,22	1931,23	0,114	2,16
5	0,018	0,396	1931,23	0,205	4,31
7,5	0,033	0,736	1931,23	0,381	6,47
10	0,048	1,066	1931,23	0,552	8,62

Tableau 2.7: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 30% (25 coups)

55 coups

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0	0
0,625	0,028	0,624	1931,23	0,323	0,54
1,25	0,048	1,066	1931,23	0,552	1,08
2	0,071	1,582	1931,23	0,819	1,72
2,5	0,082	1,824	1931,23	0,944	2,16
5	0,09	2	1931,23	1,036	4,31
7,5	0,072	1,604	1931,23	0,831	6,47
10	0,072	1,604	1931,23	0,831	8,62

Tableau 2.8: Lecture de l'essai CBR sable non renforcé par (55 coups)

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	0	1931,226	0
0,625	0,625	0,012	0,264	1931,226	0,137
1,25	1,25	0,017	0,374	1931,226	0,194
2	2	0,03	0,67	1931,226	0,347
2,5	2,5	0,038	0,846	1931,226	0,438
5	5	0,07	1,56	1931,226	0,808
7,5	7,5	0,08	1,78	1931,226	0,922
10	10	0,08	1,78	1931,226	0,922

Tableau 2.9: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 5% (55 coups)

Annexe 2

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,226	0	0
0,625	0,008	0,176	1931,226	0,091	0,54
1,25	0,013	0,286	1931,226	0,148	1,08
2	0,021	0,463	1931,226	0,240	1,72
2,5	0,028	0,624	1931,226	0,323	2,16
5	0,055	1,22	1931,226	0,632	4,31
7,5	0,078	1,736	1931,226	0,899	6,47
10	0,089	1,978	1931,226	1,024	8,62

Tableau 2.10: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 7,5% (55 coups)

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,226	0	0
0,625	0,007	0,156	1931,226	0,081	0,54
1,25	0,011	0,242	1931,226	0,125	1,08
2	0,017	0,374	1931,226	0,194	1,72
2,5	0,022	0,484	1931,226	0,251	2,16
5	0,043	0,956	1931,226	0,495	4,31
7,5	0,064	1,418	1931,226	0,734	6,47
10	0,082	1,814	1931,226	0,939	8,62

Tableau 2.11: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 10% (55 coups)

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,226	0	0,00
0,625	0,005	0,11	1931,226	0,057	0,54
1,25	0,008	0,176	1931,226	0,091	1,08
2	0,012	0,264	1931,226	0,137	1,72
2,5	0,018	0,396	1931,226	0,205	2,16
5	0,035	0,78	1931,226	0,404	4,31
7,5	0,052	1,154	1931,226	0,598	6,47
10	0,07	1,56	1931,226	0,808	8,62

Tableau 2.12: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 12,5% (55 coups)

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,226	0	0,00
0,625	0,004	0,088	1931,226	0,046	0,54
1,25	0,007	0,144	1931,226	0,075	1,08
2	0,01	0,22	1931,226	0,114	1,72

Annexe 2

2,5	0,012	0,264	1931,226	0,137	2,16
5	0,028	0,379	1931,226	0,196	4,31
7,5	0,042	0,934	1931,226	0,484	6,47
10	0,058	1,289	1931,226	0,667	8,62

Tableau 2.13: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 15% (55 coups)

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S_c$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0	0,00
0,625	0,05	1,11	1931,23	0,575	0,54
1,25	0,11	2,44	1931,23	1,263	1,08
2	0,17	3,78	1931,23	1,957	1,72
2,5	0,195	4,33	1931,23	2,242	2,16
5	0,13	2,89	1931,23	1,496	4,31
7,5	0,098	2,176	1931,23	1,127	6,47
10	0,12	2,67	1931,23	1,383	8,62

Tableau 2.14: Lecture de l'essai CBR sable non renforcé par (11 coups)

11 coups

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S_c$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,226	0	0
0,625	0,012	0,264	1931,226	0,137	0,54
1,25	0,017	0,374	1931,226	0,194	1,08
2	0,03	0,67	1931,226	0,347	1,72
2,5	0,038	0,846	1931,226	0,438	2,16
5	0,07	1,56	1931,226	0,808	4,31
7,5	0,08	1,78	1931,226	0,922	6,47
10	0,08	1,78	1931,226	0,922	8,62

Tableau 2.15: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 5% (11 coups)

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S_c$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,226	0	0
0,625	0,008	0,176	1931,226	0,091	0,54
1,25	0,013	0,286	1931,226	0,148	1,08
2	0,021	0,463	1931,226	0,240	1,72
2,5	0,028	0,624	1931,226	0,323	2,16
5	0,055	1,22	1931,226	0,632	4,31
7,5	0,078	1,736	1931,226	0,899	6,47
10	0,089	1,978	1931,226	1,024	8,62

Tableau 2.16: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 7,5% (11 coups)

Annexe 2

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S_c$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,226	0	0
0,625	0,007	0,156	1931,226	0,081	0,54
1,25	0,011	0,242	1931,226	0,125	1,08
2	0,017	0,374	1931,226	0,194	1,72
2,5	0,022	0,484	1931,226	0,251	2,16
5	0,043	0,956	1931,226	0,495	4,31
7,5	0,064	1,418	1931,226	0,734	6,47
10	0,082	1,814	1931,226	0,939	8,62

Tableau 2.17: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 10% (11 coups)

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S_c$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,226	0	0,00
0,625	0,005	0,11	1931,226	0,057	0,54
1,25	0,008	0,176	1931,226	0,091	1,08
2	0,012	0,264	1931,226	0,137	1,72
2,5	0,018	0,396	1931,226	0,205	2,16
5	0,035	0,78	1931,226	0,404	4,31
7,5	0,052	1,154	1931,226	0,598	6,47
10	0,07	1,56	1931,226	0,808	8,62

Tableau 2.18: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 12,5% (11 coups)

Δl (mm)	Lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S_c$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,226	0	0,00
0,625	0,004	0,088	1931,226	0,046	0,54
1,25	0,007	0,144	1931,226	0,075	1,08
2	0,01	0,22	1931,226	0,114	1,72
2,5	0,012	0,264	1931,226	0,137	2,16
5	0,028	0,379	1931,226	0,196	4,31
7,5	0,042	0,934	1931,226	0,484	6,47
10	0,058	1,289	1931,226	0,667	8,62

Tableau 2.19: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 15% (11 coups)

Annexe 2

- Granulats de pneu 0-2 (mm)

11 coups

Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S_c$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,226	0	0
0,625	0,011	0,242	1931,226	0,125	0,54
1,25	0,021	0,462	1931,226	0,239	1,08
2	0,032	0,704	1931,226	0,365	1,72
2,5	0,04	0,89	1931,226	0,461	2,16
5	0,078	1,736	1931,226	0,899	4,31
7,5	0,088	1,956	1931,226	1,013	6,47
10	0,088	1,956	1931,226	1,013	8,62

Tableau 2.20: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 5% (11 coups)

Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S_c$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,226	0	0
0,625	0,009	0,198	1931,226	0,103	0,54
1,25	0,016	0,352	1931,226	0,182	1,08
2	0,025	0,555	1931,226	0,287	1,72
2,5	0,032	0,714	1931,226	0,370	2,16
5	0,061	1,353	1931,226	0,701	4,31
7,5	0,078	1,736	1931,226	0,899	6,47
10	0,08	1,78	1931,226	0,922	8,62

Tableau 2.21: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 7,5% (11 coups)

Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S_c$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,2256	0	0
0,625	0,007	0,154	1931,2256	0,080	0,54
1,25	0,013	0,286	1931,2256	0,148	1,08
2	0,021	0,463	1931,2256	0,240	1,72
2,5	0,025	0,555	1931,2256	0,287	2,16
5	0,048	1,066	1931,2256	0,552	4,31
7,5	0,068	1,514	1931,2256	0,784	6,47
10	0,082	1,824	1931,2256	0,944	8,62

Tableau 2.22: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 10% (11 coups)

Annexe 2

Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,226	0	0
0,625	0,005	0,11	1931,226	0,057	0,54
1,25	0,009	0,198	1931,226	0,103	1,08
2	0,014	0,308	1931,226	0,159	1,72
2,5	0,018	0,396	1931,226	0,205	2,16
5	0,038	0,846	1931,226	0,438	4,31
7,5	0,058	1,286	1931,226	0,666	6,47
10	0,077	1,714	1931,226	0,888	8,62

Tableau 2.23: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 12,5% (11 coups)

Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,2256	0	0
0,625	0,004	0,088	1931,2256	0,05	0,54
1,25	0,008	0,176	1931,2256	0,09	1,08
2	0,012	0,264	1931,2256	0,14	1,72
2,5	0,016	0,352	1931,2256	0,18	2,16
5	0,033	0,736	1931,2256	0,38	4,31
7,5	0,051	1,132	1931,2256	0,59	6,47
10	0,078	1,736	1931,2256	0,90	8,62

Tableau 2.24: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 15% (11 coups)

25 coups

Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,2256	0	0
0,625	0,018	0,396	1931,2256	0,21	0,54
1,25	0,038	0,846	1931,2256	0,44	1,08
2	0,059	1,308	1931,2256	0,68	1,72
2,5	0,072	1,604	1931,2256	0,83	2,16
5	0,112	2,494	1931,2256	1,29	4,31
7,5	0,095	2,11	1931,2256	1,09	6,47
10	0,09	2	1931,2256	1,04	8,62

Tableau 2.25: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 5% (25 coups)

Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,2256	0	0
0,625	0,011	0,242	1931,2256	0,13	0,54
1,25	0,018	0,396	1931,2256	0,21	1,08

Annexe 2

2	0,028	0,624	1931,2256	0,32	1,72
2,5	0,035	0,78	1931,2256	0,40	2,16
5	0,07	1,56	1931,2256	0,81	4,31
7,5	0,097	2,154	1931,2256	1,12	6,47
10	0,106	2,352	1931,2256	1,22	8,62

Tableau 2.26: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 7,5% (25 coups)

Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,2256	0	0
0,625	0,008	0,176	1931,2256	0,09	0,54
1,25	0,012	0,264	1931,2256	0,14	1,08
2	0,022	0,486	1931,2256	0,25	1,72
2,5	0,028	0,624	1931,2256	0,32	2,16
5	0,058	1,286	1931,2256	0,67	4,31
7,5	0,083	1,846	1931,2256	0,96	6,47
10	0,103	2,286	1931,2256	1,18	8,62

Tableau 2.27: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 10% (25 coups)

Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0	0
0,625	0,007	0,154	1931,23	0,08	0,54
1,25	0,012	0,264	1931,23	0,14	1,08
2	0,022	0,486	1931,23	0,25	1,72
2,5	0,029	0,647	1931,23	0,34	2,16
5	0,057	1,264	1931,23	0,65	4,31
7,5	0,087	1,934	1931,23	1,00	6,47
10	0,105	2,33	1931,23	1,21	8,62

Tableau 2.28: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 12,5% (25 coups)

Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,006	0,132	1931,23	0,07	0,54
1,25	0,01	0,22	1931,23	0,11	1,08
2	0,016	0,352	1931,23	0,18	1,72
2,5	0,019	0,418	1931,23	0,22	2,16
5	0,042	0,934	1931,23	0,48	4,31
7,5	0,063	1,399	1931,23	0,72	6,47
10	0,085	1,89	1931,23	0,98	8,62

Tableau 2.28: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 15% (25 coups)

Annexe 2

55 coups

Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,015	0,33	1931,23	0,17	0,54
1,25	0,035	0,78	1931,23	0,40	1,08
2	0,062	1,376	1931,23	0,71	1,72
2,5	0,083	1,846	1931,23	0,96	2,16
5	0,175	3,89	1931,23	2,01	4,31
7,5	0,145	3,22	1931,23	1,67	6,47
10	0,135	3	1931,23	1,55	8,62

Tableau 2.29: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 5% (55 coups)

Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,011	0,242	1931,23	0,13	0,54
1,25	0,024	0,532	1931,23	0,28	1,08
2	0,045	1	1931,23	0,52	1,72
2,5	0,06	1,33	1931,23	0,69	2,16
5	0,13	2,89	1931,23	1,50	4,31
7,5	0,138	3,066	1931,23	1,59	6,47
10	0,118	2,624	1931,23	1,36	8,62

Tableau 2.30: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 7,5% (55 coups)

Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,011	0,242	1931,23	0,13	0,54
1,25	0,02	0,44	1931,23	0,23	1,08
2	0,031	0,692	1931,23	0,36	1,72
2,5	0,04	0,89	1931,23	0,46	2,16
5	0,085	1,89	1931,23	0,98	4,31
7,5	0,125	2,78	1931,23	1,44	6,47
10	0,132	2,904	1931,23	1,50	8,62

Tableau 2.31: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 10% (55 coups)

Annexe 2

Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,01	0,22	1931,23	0,11	0,54
1,25	0,018	0,396	1931,23	0,21	1,08
2	0,026	0,578	1931,23	0,30	1,72
2,5	0,032	0,714	1931,23	0,37	2,16
5	0,07	1,56	1931,23	0,81	4,31
7,5	0,11	2,43	1931,23	1,26	6,47
10	0,09	1,99	1931,23	1,03	8,62

Tableau 2.32: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 12,5% (55 coups)

Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,006	0,132	1931,23	0,07	0,54
1,25	0,014	0,308	1931,23	0,16	1,08
2	0,02	0,445	1931,23	0,23	1,72
2,5	0,025	0,555	1931,23	0,29	2,16
5	0,06	1,33	1931,23	0,69	4,31
7,5	0,09	2	1931,23	1,04	6,47
10	0,11	2,44	1931,23	1,26	8,62

Tableau 2.33: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 15% (55 coups)

2. Sable partiellement renforcé

- Granulats de pneu 0-4 (mm)

Δh (mm)	lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,038	0,846	1931,23	0,44	0,54
1,25	0,075	1,67	1931,23	0,86	1,08
2	0,113	2,509	1931,23	1,30	1,72
2,5	0,132	2,934	1931,23	1,52	2,16
5	0,14	3,11	1931,23	1,61	4,31
7,5	0,118	2,624	1931,23	1,36	6,47
10	0,1	2,22	1931,23	1,15	8,62

Tableau 2.34: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 5% (25 coups)

Δl (mm)	lecture (mm)	T (kN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,03	0,67	1931,23	0,35	0,54

Annexe 2

1,25	0,058	1,286	1931,23	0,67	1,08
2	0,095	2,11	1931,23	1,09	1,72
2,5	0,112	2,486	1931,23	1,29	2,16
5	0,142	3,154	1931,23	1,63	4,31
7,5	0,108	2,396	1931,23	1,24	6,47
10	0,088	1,956	1931,23	1,01	8,62

Tableau 2.35: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 7,5% (25 coups)

Δh (mm)	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,03	0,67	1931,23	0,35	0,54
1,25	0,058	1,286	1931,23	0,67	1,08
2	0,095	2,11	1931,23	1,09	1,72
2,5	0,112	2,486	1931,23	1,29	2,16
5	0,142	3,154	1931,23	1,63	4,31
7,5	0,108	2,396	1931,23	1,24	6,47
10	0,088	1,956	1931,23	1,01	8,62

Tableau 2.36: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 10% (25 coups)

Δh (mm)	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,018	0,396	1931,23	0,21	0,54
1,25	0,039	0,868	1931,23	0,45	1,08
2	0,068	1,514	1931,23	0,78	1,72
2,5	0,083	1,826	1931,23	0,95	2,16
5	0,138	3,066	1931,23	1,59	4,31
7,5	0,13	2,86	1931,23	1,48	6,47
10	0,118	2,624	1931,23	1,36	8,62

Tableau 2.37: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 12,5% (25 coups)

Δh (mm)	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,012	0,264	1931,23	0,14	0,54
1,25	0,024	0,532	1931,23	0,28	1,08
2	0,04	0,89	1931,23	0,46	1,72
2,5	0,055	1,22	1931,23	0,63	2,16
5	0,098	2,176	1931,23	1,13	4,31
7,5	0,114	2,532	1931,23	1,31	6,47
10	0,11	2,44	1931,23	1,26	8,62

Annexe 2

Tableau 2.38: Lecture de l'essai CBR sable renforcé par 15% (25 coups)

2. Renforcement par une couche

11 coups

Δh (mm)	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,022	0,486	1931,23	0,25	0,54
1,25	0,04	0,89	1931,23	0,46	1,08
2	0,06	1,33	1931,23	0,69	1,72
2,5	0,07	1,56	1931,23	0,81	2,16
5	0,092	2,044	1931,23	1,06	4,31
7,5	0,088	1,956	1931,23	1,01	6,47
10	0,08	1,78	1931,23	0,92	8,62

Tableau 2.39: Lecture de l'essai CBR sable renforcé (11 coups)

Δh (mm)	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,017	0,374	1931,23	0,19	0,54
1,25	0,033	0,736	1931,23	0,38	1,08
2	0,052	1,154	1931,23	0,60	1,72
2,5	0,063	1,399	1931,23	0,72	2,16
5	0,088	1,956	1931,23	1,01	4,31
7,5	0,08	1,78	1931,23	0,92	6,47
10	0,078	1,736	1931,23	0,90	8,62

Tableau 2.40: Lecture de l'essai CBR sable renforcé (11 coups)

Δh (mm)	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0,00	0,00	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,03	0,56	1931,23	0,29	0,54
1,25	0,05	1,07	1931,23	0,55	1,08
2	0,07	1,56	1931,23	0,81	1,72
2,5	0,08	1,78	1931,23	0,92	2,16
5	0,10	2,11	1931,23	1,09	4,31
7,5	0,08	1,74	1931,23	0,90	6,47
10	0,07	1,56	1931,23	0,81	8,62

Tableau 2.41: Lecture de l'essai CBR sable renforcé (11 coups)

Annexe 2

25 coups

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,02	0,44	1931,23	0,23	0,54
1,25	0,035	0,78	1931,23	0,40	1,08
2	0,052	1,154	1931,23	0,60	1,72
2,5	0,065	1,445	1931,23	0,75	2,16
5	0,088	1,956	1931,23	1,01	4,31
7,5	0,082	1,824	1931,23	0,94	6,47
10	0,078	1,736	1931,23	0,90	8,62

Tableau 2.42: Lecture de l'essai CBR sable renforcé (25 coups)

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,22	0	0
0,625	0,033	0,736	1931,22	0,381	0,538
1,25	0,063	1,399	1931,22	0,724	1,07
2	0,097	2,154	1931,22	1,115	1,724
2,5	0,12	2,67	1931,22	1,382	2,15
5	0,138	3,066	1931,22	1,587	4,310
7,5	0,102	2,264	1931,22	1,172	6,46
10	0,083	1,846	1931,22	0,955	8,62

Tableau 2.43: Lecture de l'essai CBR sable renforcé (25 coups)

55 coups

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,2256	0	0
0,625	0,04	0,89	1931,23	0,46	0,54
1,25	0,098	2,176	1931,23	1,13	1,08
2	0,16	3,55	1931,23	1,84	1,72
2,5	0,192	4,264	1931,23	2,21	2,16
5	0,19	4,22	1931,23	2,19	4,31
7,5	0,125	2,78	1931,23	1,44	6,47
10	0,115	2,555	1931,23	1,32	8,62

Tableau 2.44: Lecture de l'essai CBR sable renforcé (55 coups)

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,038	0,846	1931,23	0,44	0,54
1,25	0,083	1,846	1931,23	0,96	1,08

Annexe 2

2	0,138	3,066	1931,23	1,59	1,72
2,5	0,172	3,824	1931,23	1,98	2,16
5	0,178	3,956	1931,23	2,05	4,31
7,5	0,138	3,066	1931,23	1,59	6,47
10	0,11	2,44	1931,23	1,26	8,62

Tableau 2.45: Lecture de l'essai CBR sable renforcé (55 coups)

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$	$\sigma = T/S'$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,2256	0	0
0,625	0,04	0,89	1931,23	0,46	0,54
1,25	0,098	2,176	1931,23	1,13	1,08
2	0,16	3,55	1931,23	1,84	1,72
2,5	0,192	4,264	1931,23	2,21	2,16
5	0,19	4,22	1931,23	2,19	4,31
7,5	0,125	2,78	1931,23	1,44	6,47
10	0,115	2,555	1931,23	1,32	8,62

Tableau 2.46: Lecture de l'essai CBR sable renforcé (55 coups)

Par deux couches

25 coups

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,029	0,647	1931,23	0,34	0,54
1,25	0,056	1,242	1931,23	0,64	1,08
2	0,085	1,89	1931,23	0,98	1,72
2,5	0,1	2,22	1931,23	1,15	2,16
5	0,121	2,692	1931,23	1,39	4,31
7,5	0,098	2,176	1931,23	1,13	6,47
10	0,098	2,176	1931,23	1,13	8,62

Tableau 2.47: Lecture de l'essai CBR sable renforcé (25 coups)

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\tau = T/S$ (MPa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,02	0,44	1931,23	0,23	0,54
1,25	0,045	1	1931,23	0,52	1,08
2	0,072	1,604	1931,23	0,83	1,72
2,5	0,09	2	1931,23	1,04	2,16
5	0,13	2,89	1931,23	1,50	4,31

Annexe 2

7,5	0,112	2,486	1931,23	1,29	6,47
10	0,112	2,486	1931,23	1,29	8,62

Tableau 2.48: Lecture de l'essai CBR sable renforcé (25 coups)

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	1931,23	0,00	0,00
0,625	0,027	0,601	1931,23	0,31	0,54
1,25	0,052	1,154	1931,23	0,60	1,08
2	0,08	1,78	1931,23	0,92	1,72
2,5	0,097	2,154	1931,23	1,12	2,16
5	0,125	2,78	1931,23	1,44	4,31
7,5	0,115	2,555	1931,23	1,32	6,47
10	0,11	2,44	1931,23	1,26	8,62

Tableau 2.49: Lecture de l'essai CBR sable renforcé (25 coups)

Partie 2 :

1. Semelle filante

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	$S = B \times L$	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	8120	0,00	0,00
0,625	0,158	3,506	8120	0,43	0,54
1,25	0,39	8,58	8120	1,06	1,08
2	0,74	16,28	8120	2,00	1,72
2,5	1,1	24,2	8120	2,98	2,16
5	0,82	18,04	8120	2,22	4,31
7,5	0,59	12,98	8120	1,60	6,47
10	0,542	11,924	8120	1,47	8,62

Tableau 2.50: Lecture de l'essai CBR sable non renforcé (25 coups)

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	$S = B \times L$	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	8120	0,00	0,00
0,625	0,13	2,86	8120	0,35	0,54
1,25	0,35	7,7	8120	0,95	1,08
2	0,62	13,64	8120	1,68	1,72
2,5	0,76	16,72	8120	2,06	2,16
5	0,77	16,94	8120	2,09	4,31
7,5	0,585	12,87	8120	1,58	6,47
10	0,615	13,53	8120	1,67	8,62

Tableau 2.51: Lecture de l'essai CBR sable non renforcé (11 coups)

Annexe 2

Pneu 0-4

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	S = B × L	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	8120	0,00	0,00
0,625	0,15	3,33	8120	0,41	0,54
1,25	0,39	8,58	8120	1,06	1,08
2	0,8	17,6	8120	2,17	1,72
2,5	0,91	20,02	8120	2,47	2,16
5	0,75	16,5	8120	2,03	4,31
7,5	0,68	14,96	8120	1,84	6,47
10	0,75	16,5	8120	2,03	8,62

Tableau 2.52: Lecture de l'essai CBR sable renforcé (25 coups)

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	S = B × L (mm ²)	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	8120	0,00	0,00
0,625	0,06	1,35	8120	0,17	0,54
1,25	0,2	4,4	8120	0,54	1,08
2	0,45	9,9	8120	1,22	1,72
2,5	0,62	13,64	8120	1,68	2,16
5	0,8	17,6	8120	2,17	4,31
7,5	0,66	14,52	8120	1,79	6,47
10	0,72	15,84	8120	1,95	8,62

Tableau 2.53: Lecture de l'essai CBR sable renforcé (11 coups)

Pneu 0-2

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	S = B × L (mm ²)	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	8120	0,00	0,00
0,625	0,07	1,57	8120	0,19	0,54
1,25	0,25	5,5	8120	0,68	1,08
2	0,6	13,2	8120	1,63	1,72
2,5	1,03	22,66	8120	2,79	2,16
5	0,86	18,92	8120	2,33	4,31
7,5	0,66	14,52	8120	1,79	6,47
10	0,66	14,52	8120	1,79	8,62

Tableau 2.54: Lecture de l'essai CBR sable renforcé (25 coups)

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	S = B × L (mm ²)	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	8120	0,00	0,00
0,625	0,11	2,42	8120	0,30	0,54
1,25	0,3	6,6	8120	0,81	1,08

Annexe 2

2	0,59	12,98	8120	1,60	1,72
2,5	0,67	14,74	8120	1,82	2,16
5	0,71	15,62	8120	1,92	4,31
7,5	0,56	12,32	8120	1,52	6,47
10	0,52	11,44	8120	1,41	8,62

Tableau 2.55: Lecture de l'essai CBR sable renforcé (11 coups)

2. Semelle carrée

Δh (mm)	lecture (mm)	T (KN)	S=L×L(mm ²)	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	4130	0,00	0,00
0,625	0,075	1,65	4130	0,40	0,54
1,25	0,175	3,85	4130	0,93	1,08
2	0,265	5,83	4130	1,41	1,72
2,5	0,275	6,05	4130	1,46	2,16
5	0,185	4,07	4130	0,99	4,31
7,5	0,12	2,64	4130	0,64	6,47
10	0,112	2,464	4130	0,60	8,62

Tableau 2.56: Lecture de l'essai CBR sable non renforcé (25 coups)

Δh (mm)	lecture (mm)	T (KN)	S=L×L (mm ²)	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	4130	0,00	0,00
0,625	0,068	1,496	4130	0,36	0,54
1,25	0,148	3,256	4130	0,79	1,08
2	0,198	4,356	4130	1,05	1,72
2,5	0,19	4,18	4130	1,01	2,16
5	0,115	2,53	4130	0,61	4,31
7,5	0,098	2,156	4130	0,52	6,47
10	0,088	1,936	4130	0,47	8,62

Tableau 2.57: Lecture de l'essai CBR sable non renforcé (11 coups)

Pneu 0-4

Δh (mm)	lecture (mm)	T (KN)	S=L×L (mm ²)	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	4130	0,00	0,00
0,625	0,06	1,32	4130	0,32	0,54
1,25	0,18	3,96	4130	0,96	1,08
2	0,21	4,62	4130	1,12	1,72
2,5	0,215	4,73	4130	1,15	2,16
5	0,17	3,74	4130	0,91	4,31
7,5	0,17	3,74	4130	0,91	6,47
10	0,158	3,476	4130	0,84	8,62

Tableau 2.58: Lecture de l'essai CBR sable renforcé (25 coups)

Annexe 2

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	S = L×L (mm ²)	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	4130	0,00	0,00
0,625	0,04	0,88	4130	0,21	0,54
1,25	0,095	2,09	4130	0,51	1,08
2	0,15	3,3	4130	0,80	1,72
2,5	0,17	3,74	4130	0,91	2,16
5	0,135	2,97	4130	0,72	4,31
7,5	0,092	2,024	4130	0,49	6,47
10	0,098	2,156	4130	0,52	8,62

Tableau 2.59: Lecture de l'essai CBR sable renforcé (11 coups)

Pneu 0-2

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	S = L×L (mm ²)	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	4130	0,00	0,00
0,625	0,04	0,88	4130	0,21	0,54
1,25	0,11	2,42	4130	0,59	1,08
2	0,202	4,444	4130	1,08	1,72
2,5	0,26	5,72	4130	1,38	2,16
5	0,22	4,84	4130	1,17	4,31
7,5	0,138	3,036	4130	0,74	6,47
10	0,11	2,42	4130	0,59	8,62

Tableau 2.60 Lecture de l'essai CBR sable renforcé (25 coups)

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	S = L×L (mm ²)	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	4130	0,00	0,00
0,625	0,054	1,188	4130	0,29	0,54
1,25	0,14	3,08	4130	0,75	1,08
2	0,17	3,74	4130	0,91	1,72
2,5	0,182	4,004	4130	0,97	2,16
5	0,12	2,64	4130	0,64	4,31
7,5	0,08	1,76	4130	0,43	6,47
10	0,082	1,804	4130	0,44	8,62

Tableau 2.61 Lecture de l'essai CBR sable renforcé (11 coups)

Annexe 2

3. Semelle circulaire

Δh (mm)	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	2374,625	0,00	0,00
0,625	0,04	0,88	2374,625	0,37	0,54
1,25	0,09	1,98	2374,625	0,83	1,08
2	0,13	2,86	2374,625	1,20	1,72
2,5	0,116	2,552	2374,625	1,07	2,16
5	0,05	1,1	2374,625	0,46	4,31
7,5	0,03	0,66	2374,625	0,28	6,47
10	0,028	0,616	2374,625	0,26	8,62

Tableau 2.62 : Lecture de l'essai CBR sable non renforcé (25 coups)

Δh (mm)	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	2374,625	0,00	0,00
0,625	0,03	0,66	2374,625	0,28	0,54
1,25	0,05	1,1	2374,625	0,46	1,08
2	0,07	1,54	2374,625	0,65	1,72
2,5	0,08	1,76	2374,625	0,74	2,16
5	0,038	0,836	2374,625	0,35	4,31
7,5	0,018	0,396	2374,625	0,17	6,47
10	0,01	0,22	2374,625	0,09	8,62

Tableau 2.63 : Lecture de l'essai CBR sable non renforcé (11 coups)

Pneu 0-4

Δh (mm)	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	2374,625	0,00	0,00
0,625	0,02	0,44	2374,625	0,19	0,54
1,25	0,045	0,99	2374,625	0,42	1,08
2	0,082	1,804	2374,625	0,76	1,72
2,5	0,1	2,2	2374,625	0,93	2,16
5	0,052	1,144	2374,625	0,48	4,31
7,5	0,03	0,66	2374,625	0,28	6,47
10	0,048	1,056	2374,625	0,44	8,62

Tableau 2.64 : Lecture de l'essai CBR sable renforcé (25 coups)

Annexe 2

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	2374,625	0,00	0,00
0,625	0,021	0,462	2374,625	0,19	0,54
1,25	0,042	0,924	2374,625	0,39	1,08
2	0,061	1,342	2374,625	0,57	1,72
2,5	0,065	1,43	2374,625	0,60	2,16
5	0,042	0,924	2374,625	0,39	4,31
7,5	0,04	0,88	2374,625	0,37	6,47
10	0,041	0,902	2374,625	0,38	8,62

Tableau 2.65 : Lecture de l'essai CBR sable renforcé (11 coups)

Pneu 0-2

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	2374,625	0,00	0,00
0,625	0,028	0,616	2374,625	0,26	0,54
1,25	0,053	1,166	2374,625	0,49	1,08
2	0,08	1,76	2374,625	0,74	1,72
2,5	0,092	2,024	2374,625	0,85	2,16
5	0,063	1,386	2374,625	0,58	4,31
7,5	0,042	0,924	2374,625	0,39	6,47
10	0,035	0,77	2374,625	0,32	8,62

Tableau 2.66 : Lecture de l'essai CBR sable renforcé (25 coups)

$\Delta h(\text{mm})$	lecture (mm)	T (KN)	$S = r^2 \times \pi$ (mm ²)	$\sigma = T/S$ (Mpa)	$\varepsilon = \Delta l/l$ (%)
0	0	0	2374,625	0,00	0,00
0,625	0,03	0,66	2374,625	0,28	0,54
1,25	0,048	1,056	2374,625	0,44	1,08
2	0,064	1,408	2374,625	0,59	1,72
2,5	0,076	1,672	2374,625	0,70	2,16
5	0,033	0,726	2374,625	0,31	4,31
7,5	0,019	0,418	2374,625	0,18	6,47
10	0,008	0,176	2374,625	0,07	8,62

Tableau 2.67 : Lecture de l'essai CBR sable renforcé (11 coups)