

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du génie de la construction
Département de génie civil



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Option : Géotechnique

Thème

**Comportement mécanique d'une argile sous
l'effet d'ajout des granulats de pneus usés**

Présenté par : M^r YAMOUN Mourad

Devant le jury composé de :

M ^r GABI Smail	Professeur à l'UMMTO	Président
M ^{me} AIT BACHIR Samia	Maitre assistante A à l'UMMTO	Examinatrice
M ^{me} MEZIANI Faroudja	Maitre de conférences B à l'UMMTO	Promotrice

Promotion : 2020/2021

Remerciements

Tout d'abord, je remercie le bon dieu qui m'a donné la force, le courage et surtout la santé tout au long de mes années d'études.

Je tiens à remercier très chaleureusement Madame MEZIANI Faroudja, Maître de conférences à l'UMMTO, pour l'encadrement de qualité dont elle a su faire preuve, pour sa patience, pour sa disponibilité à tout moment, et pour ses qualités humaines. Je la remercie pour la confiance et le courage qu'elle m'a donné dès le début de ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur GABI Smaïl, Professeur à l'UMMTO, qui m'a honoré d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance.

Je tiens également à remercier Madame AIT BACHIR Samia, Maître assistante à l'UMMTO, pour avoir accepté de juger ce travail.

Enfin, je remercie madame BOUAZZOUNI Fatima, Responsable du laboratoire de mécanique des sols, pour son aide et sa disponibilité durant la partie expérimentale de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents Rachid et Fazia.

À mon frère Karim, ma belle sœur Chanez, et à tous ceux que j'aime.

Résumé :

Plusieurs techniques en génie civil, associant des déchets à des sols, sont connues dans le monde. Les déchets de pneus sont des déchets encombrants, polluants et non biodégradables. L'association de ces derniers à des sols cohérents peut donner des matériaux performants et solutionner plusieurs problèmes rencontrés par l'ingénieur dans le secteur de la géotechnique. L'objectif de notre étude est d'évaluer l'effet d'ajout des granulats de pneus usés, sur le comportement mécanique d'une argile. Après que les différents matériaux soient tamisés, les échantillons préparés sont ensuite soumis à des essais d'identification et des essais mécaniques, principalement : les essais de compactage avec le Proctor normal et les essais de cisaillement. En plus de l'avantage environnemental de l'approche proposée dans cette étude, la création d'une nouvelle application qui permette d'absorber une quantité de déchets caoutchouteux, les résultats obtenus montrent que l'ajout de granulats de caoutchouc à un sol argileux, permet d'améliorer les caractéristiques du compactage selon les différents pourcentages d'ajout et les paramètres de résistance au cisaillement, par la diminution de la cohésion et l'augmentation de l'angle de frottement interne.

Mots clés : Argile, granulats de pneus, techniques de traitement, compactage, cisaillement.

Abstract:

Several techniques in civil engineering, combining waste with soil, are known in the world. Waste tires are bulky, polluting and non-biodegradable waste. The association of these wastes with coherent soils can give efficient materials and solve several problems encountered by the engineer in the geotechnical sector. The objective of our study is to evaluate the effect of adding used tire aggregates on the mechanical behavior of a clay. After the different materials are sieved, the prepared samples are then submitted to identification and mechanical tests, mainly: compaction tests with the normal Proctor and shear tests. In addition to the environmental benefit of the approach proposed in this study, the creation of a new application that allows to absorb a quantity of rubbery waste, the results obtained show that the addition of rubber aggregates to a clay soil, allows to improve the characteristics of compaction according to the different percentages of addition and the parameters of shear strength, by decreasing the cohesion and increasing the angle of internal friction.

Keywords: Clay, tire aggregate, processing techniques, compaction, shear.

Tableau des principales notations et indices

Indices	Désignations
W	Teneur en eau
M_w	Masse de l'eau
M_s	La masse sèche
M_h	La masse humide
M_t	La masse de la tare
W_L	Limite de liquidité
W_P	Limite de plasticité
I_P	Indice de plasticité
I_c	Indice de consistance
ρ_w	La masse volumique de l'eau
ρ_s	La masse volumique des particules solides
ρ_d	La masse volumique sèche
V_p	Le volume de la paraffine
V_{ep}	Le volume de l'échantillon paraffiné
V	Le volume total de l'échantillon
ρ_p	La masse volumique de la paraffine
M_{ep}	La masse de l'échantillon paraffiné
M'_{ep}	La masse de l'échantillon paraffiné immergé
M_e	La masse de l'échantillon
M_B	La masse du bleu de méthylène introduite dans le bécher
V_B	Le volume du bleu de méthylène
M	La masse de l'échantillon
L_a	Les lectures horizontales du comparateur
L	La longueur de l'éprouvette
ΔL	Le déplacement horizontal
S_c	La section corrigée
T	La force nette
τ	La contrainte tangentielle
σ_1	La contrainte normale
φ	L'angle de frottement interne
C	La cohésion
W_{opt}	La teneur en eau optimale

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les argiles

Figure I.1. Les constituants généraux de l'argile	4
Figure I.2. Processus de formation de l'argile	5
Figure I.3. Les différents types de philo silicates formés au cours de l'altération.....	5
Figure I.4. Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile.....	6
Figure I.5. Représentation des couches : tétraédrique, octaédrique et l'espace interfoliaire.....	7
Figure I.6. Représentation polyédrique d'un feuillet : (a)- Trioctaédrique (b)- Dioctaédrique ..	7
Figure I.7. Différentes structures des argiles, d'après TERZAGHI, 1951	8
Figure I.8. (A) : Vue microscopique d'une kaolinite, (B)	8
Figure I.9. (A) : Vue microscopique d'une illite, (B) : Structure d'une illite.....	9
Figure I.10. (A) : Vue microscopique d'une chlorite, (B) : Structure d'une chlorite.....	9
Figure I.11. Représentation schématique d'interstratifié Smectite/illite	10
Figure I.12. Mécanisme de gonflement des argiles par hydratation	17
Figure I.13. Phénomène osmotique idéal	18
Figure I.14. Représentation du phénomène du retrait gonflement.....	20
Figure. I.15. Fissures au niveau d'une structure	20
Figure I.16. Représentation du phénomène de glissement de terrain.....	21
Figure I.17. (A) : Tassement uniforme, (B) : Tassement différentiel	21
Figure I.18. Tassement différentiel	22
Figure I.19. Érosion de sol.....	22
Figure I.20. Déformation d'une chaussée.....	23
Figure I.21. Soulèvement puis dislocation du radier d'un tunnel	24

Chapitre II : Techniques de traitement des argiles

Figure II.1. Compactage dynamique d'un sol.....	27
Figure II.2. Le vibro-compactage.....	27
Figure II.3. Installation des drains verticaux	29
Figure II.4. La chaux aérienne	32
Figure II.5. Application des liants hydrauliques routiers	33
Figure II.6. Épandage de la chaux.....	39
Figure II.7. (A) : Le pulvimalaxeur, (B) : La manière de malaxer le sol	39
Figure II.8. Application des cendres volantes sur une route.....	43
Figure II.9. Poudre de verre	43
Figure II.10. Poudre de diabase.....	44
Figure II.11. Coquilles d'œuf.....	45

Chapitre III : Valorisation de pneus usés

Figure III.1. Schéma d'une filière de valorisation matière	48
--	----

Figure III.2. Coupe d'un pneu.....	50
Figure III.3. La poudrette de caoutchouc.....	53
Figure III.4. Les différents diamètres de granulats des pneus usés après broyage	54
Figure III.5. Constructeurs pneumatiques en Europe (2017).....	58
Figure III.6. Les principaux fabricants de pneus mondiaux d'après leurs ventes (2018).....	59
Figure III.7. Le cycle de recyclage des pneus.....	60
Figure III.8. Schéma d'un remblai pneusol	65
Figure III.9. Réalisation d'un mur de soutènement à Bejaia	66
Figure III.10. Chantier expérimental pneusol à Bousmail.....	66
Figure III.11. (A) : Pneus entiers avec flancs, (B) : Pneus entiers sans flancs	67
Figure III.12. Réalisation d'un bassin de rétention	70
Figure III.13. Coupe schématique verticale d'un sol sportif	72

Chapitre IV : Présentation et identification des matériaux utilisés

Figure IV.1. L'emplacement du sol étudié.....	75
Figure IV.2. Appareillage pour déterminer la teneur en eau	76
Figure IV.3. Appareillage de l'analyse granulométrique par tamisage	78
Figure IV.4. Courbe granulométrique de l'argile.....	79
Figure IV.5. Outils de l'essai de sédimentométrie	80
Figure IV.6. Limite d'Atterberg d'un sol	82
Figure IV.7. Matériels de limite de liquidité.....	83
Figure IV.8. Limite de liquidité du sol.....	84
Figure IV.9. Rouleaux pour la détermination de la limite de plasticité.....	85
Figure IV.10. Les étapes de l'essai de limite de plasticité.....	85
Figure IV.11. Abaque de plasticité de Casagrande	87
Figure IV.12. Essai de Détermination de la masse volumique des particules solides des sols	89
Figure IV.13. La pesé hydrostatique	91
Figure IV.14. Les trois échantillons paraffinés	92
Figure IV.15. Exécution de l'essai VBS.....	94
Figure IV.16. Observations de taches de l'essai VBS.....	95
Figure IV.17. Courbe granulométrique des grains de caoutchouc.....	97

Chapitre V : Les essais mécaniques réalisés

Figure V.1. Différents états d'un sol	98
Figure V.2. Les objectifs du compactage	99
Figure V.3. Influence de la nature du matériau.....	100
Figure V.4. Matériaux de l'essai Proctor.....	103
Figure V.5. Extraction d'une éprouvette avec un cric.....	104
Figure V.6. Forme de la courbe Proctor	104
Figure V.7. Schéma de la boîte de cisaillement	107
Figure V.8. Mise en place de l'échantillon dans la boîte.....	108

Figure V.9. L'éprouvette après cisaillement.....	109
Figure V.10.Schéma de la machine de cisaillement.....	110

Chapitre VI :Interpretation des résultats

Figure VI.1. Courbe Proctor (sans ajout).....	130
Figure VI.2. Courbe Proctor (ajout de 2% de caoutchouc)	131
Figure VI.3. Courbe Proctor (ajout de 4% de caoutchouc)	131
Figure VI.4. Courbe Proctor (ajout de 6% de caoutchouc)	132
Figure VI.5. La variation de la teneur en eau en fonction du pourcentage d'ajout.....	132
Figure VI.6. La variation de la masse volumique sèche en fonction du pourcentage d'ajout	133
Figure VI.7. Les courbes Proctor pour les différents ajouts	133
Figure VI.8. La contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal à 1, 2, et 3 bar (sans ajout).....	134
Figure VI.9. La contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale (sans ajout)	135
Figure VI.10. La contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal à 1, 2, et 3 bar (ajout de 2% de caoutchouc).....	135
Figure VI.11. La contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale (ajout de 2% de caoutchouc)	136
Figure VI.12. La contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal à 1, 2, et 3 bar (ajout de 4% de caoutchouc).....	137
Figure VI.13. La contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale (ajout de 4% de caoutchouc)	137
Figure VI.14. La contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal à 1, 2, et 3 bar (ajout de 6% de caoutchouc).....	138
Figure VI.15. La contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale (ajout de 6% de caoutchouc)	139

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les argiles

Tableau I.1. Classification des phyllosilicates, d'après CAILLERE, 1959, complété par MITCHELL, 1993	10
Tableau I.2. Surface spécifique et C.E.C de quelques minéraux argileux.....	12
Tableau I.3. Caractéristiques physiques générales des argiles.....	15

Chapitre III : Valorisation de pneus usés

Tableau III.1. Les composants chimiques de pneus légers et lourds	51
Tableau III.2. La distribution granulométrique pour les trous de filière de Ø 16 mm et Ø20 mm (Technique et procédés KAHL pour le recyclage des pneus usagés).....	54
Tableau III.3. Les méthodes d'extraction des contaminants d'un pneu	55
Tableau III.4. Quantité de pneus importés par l'Algérie depuis 2006	64
Tableau III.5. Ouvrages pneusol en Algérie	67

Chapitre IV : Présentation et identification des matériaux utilisés

Tableau IV.1. Les résultats de la teneur en eau.....	77
Tableau IV.2. Résultats de l'analyse granulométrique de l'argile	79
Tableau IV.3. Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentation	81
Tableau IV.4. Les résultats de limite de liquidité	83
Tableau IV.5. Les résultats de la limite de plasticité.....	86
Tableau IV.6. Types des sols en fonction de l'indice de plasticité Ip	87
Tableau IV.7. Nature du sol en fonction de l'indice de plasticité Ip.....	88
Tableau IV.8. L'état du sol en fonction de l'indice de consistance	88
Tableau IV.9. Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique des particules solides	90
Tableau IV.10. Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique sèche.....	93
Tableau IV.11. Classement de la valeur du VBS	96
Tableau IV.12. Résultats de l'analyse granulométrique des grains de caoutchouc	96

Chapitre V : Les essais mécaniques réalisés

Tableau V.1. Les résultats de l'essai Proctor (sans ajout)	105
Tableau V.2. Les résultats de l'essai Proctor (avec ajout de 2% de caoutchouc)	105
Tableau V.3. Les résultats de l'essai Proctor (ajout de 4% de caoutchouc)	106
Tableau V.4. Les résultats de l'essai Proctor (avec ajout de 6% de caoutchouc)	106
Tableau V.5. Les pics des différents chargements	111
Tableau V.6. Résultats du cisaillement sans ajout à 1 bar.....	112
Tableau V.7. Résultats du cisaillement sans ajout à 2 bar.....	113

Tableau V.8. Résultats du cisaillement sans ajout à 3 bar.....	115
Tableau V.9. Résultats du cisaillement avec ajout 2% de caoutchouc à 1 bar	116
Tableau V.10. Résultats du cisaillement avec ajout 2% de caoutchouc à 2 bar	117
Tableau V.11. Résultats du cisaillement avec ajout 2% de caoutchouc à 3 bar	119
Tableau V.12. Résultats du cisaillement avec ajout 4% de caoutchouc à 1 bar	120
Tableau V.13. Résultats du cisaillement avec ajout 4% de caoutchouc à 2 bar	121
Tableau V.14. Résultats du cisaillement avec ajout 4% de caoutchouc à 3 bar	123
Tableau V.15. Résultats du cisaillement avec ajout 6% de caoutchouc à 1 bar	124
Tableau V.16. Résultats du cisaillement avec ajout 6% de caoutchouc à 2 bar	126
Tableau V.17. Résultats du cisaillement avec ajout 6% de caoutchouc à 3 bar	127
Tableau V.18. La variation de la cohésion en fonction du pourcentage de caoutchouc	129
Tableau V.19. La variation de l'angle de frottement interne en fonction du pourcentage de caoutchouc	129

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les argiles	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Définition.....	4
I.3. Origine des minéraux argileux.....	5
I.4. Structure des sols argileux et liaisons structurelles.....	6
I.5. Classification des argiles.....	8
I.5.1. Minéraux de type 1 :1 (ou T-O).....	8
I.5.2. Minéraux de type 2 :1 (ou T-O-T).....	9
I.5.3. Minéraux de type 2:1:1(ou T-O-T-O).....	9
I.5.4. Minéraux interstratifiés.....	10
I.6. Les propriétés des argiles.....	11
I.6.1. La plasticité.....	11
I.6.2. La surface spécifique.....	11
I.6.3. La capacité d'échange cationique (C.E.C).....	11
I.6.4. Propriétés colloïdales.....	12
I.6.5. Propriétés de gonflement.....	12
I.6.6. Absorption et adsorption.....	12
I.6.7. Rétention des métaux par les argiles.....	13
I.6.8. La théorie d'échange d'ions.....	13
I.6.9. Échanges d'eau.....	14
I.7. Les forces entre les minéraux d'argile.....	14
I.7.1. Force de répulsion.....	14
I.7.2. Force d'attraction.....	14
I.7.3. Force d'hydratation (attractive-répulsive).....	15
I.8. Les caractéristiques physiques des argiles.....	15
I.9. Les caractéristiques mécaniques des argiles.....	15
I.10. Le gonflement des argiles.....	16
I.11. Les principales causes du gonflement.....	17
I.11.1. Hydratation par adsorption.....	17
I.11.1.1. Les forces d'attraction.....	18

I.11.1.2. Les forces de répulsion.....	18
I.11.2. Hydratation par osmose.....	18
I.11.3. Hydratation par capillarité.....	19
I.11.4. Transformations chimiques.....	19
I.12. Les principaux problèmes des sols argileux.....	19
I.12.1. Le phénomène du retrait gonflement.....	19
I.12.2. Le phénomène de glissement.....	20
I.12.3. Le phénomène de tassement.....	21
I.12.4. Érosion des sols.....	22
I.13. Les conséquences dues aux problèmes des sols argileux.....	22
I.13.1. Cas des bâtiments.....	22
I.13.2. Cas des chaussées.....	23
I.13.3. Cas des ouvrages souterrains.....	23
I.13.3.1. Cas des tunnels.....	24
I.13.3.2. Cas des puits pétroliers.....	24
I.13.3.3. Cas des monuments historiques.....	25
I.14. Conclusion.....	25

Chapitre II : Techniques de traitement des argiles

II.1. Introduction.....	26
II.2. Les techniques d'amélioration des sols.....	26
II.2.1. Les méthodes mécaniques.....	26
II.2.1.1. Le compactage dynamique.....	26
II.2.1.2. Le vibro-compactage.....	27
II.2.2. Les méthodes hydromécaniques.....	28
II.2.2.1. Le préchargement ou précompression.....	28
II.2.2.2. L'accélération de la consolidation par l'installation des drains verticaux.....	28
II.2.3. Les méthodes thermiques.....	29
II.2.3.1. La déshydratation.....	29
II.2.3.2. La congélation.....	29

II.2.4. Les méthodes chimiques	30
II.3. Le choix de traitement du sol.....	30
II.4. Le principe de choix d'une solution de traitement.....	31
II.5. Les produits de traitement	31
II.5.1. La chaux aérienne	31
II.5.2. Les liants hydrauliques.....	32
II.5.3. Les ciments.....	32
II.5.4. Les liants hydrauliques routiers (LHR).....	33
II.6. Action des liants.....	33
II.6.1. L'amélioration	34
II.6.2. La stabilisation.....	34
II.7. Techniques de réalisation	34
II.7.1. Technique courante.....	34
II.7.2. Mélange par la technique dite du dépôt reprise	34
II.7.3. Traitement dans le déblai ou sur le remblai	35
II.8. Les étapes de traitement des sols	35
II.8.1. Identification du sol	35
II.8.2. Études de la formulation	36
II.8.3. La mise en œuvre du sol traité.....	37
II.8.4. Contrôle de qualité des travaux	37
II.9. La méthode d'utilisation de la chaux dans le traitement du sol.....	38
II.9.1. La préparation du sol à traiter.....	38
II.9.2. L'épandage	38
II.9.3. Le malaxage.....	39
II.9.4. Le réglage.....	39
II.9.5. Le compactage.....	40
II.9.6. La protection de surface	40
II.10. Matériels de traitement.....	40
II.11. Les problèmes à rencontrer lors des opérations de traitement des sols.....	40
II.11.1. Le froid et le gel.....	40
II.11.2. La présence d'éléments néfastes à la prise hydraulique.....	41
II.11.2.1. Les sulfates.....	41

II.11.2.2. Les matières organiques.....	41
II.11.3. Le problème du climat par rapport à la cinétique de durcissement	42
II.11.4. Les émissions de poussière.....	42
II.12. Les nouveaux produits qui rentrent dans la composition des liants.....	42
II.12.1. Les cendres volantes	42
II.12.2. La poudre de verre	43
II.12.3. Les déchets industriels	44
II.12.4. Mélange chaux-fibres de polypropylène et laitiers moulus associés à la chaux	44
II.12.5. Poudre de diabase associé au ciment	44
II.12.6. La coquille d'œuf calcinée	45
II.13. Avantages du traitement des sols	45
II.13.1. Avantages techniques.....	46
II.13.2. Avantages économiques.....	46
II.13.3. Avantages écologiques et environnementaux	46
II.14. Conclusion	46

Chapitre III :Valorisation de pneus usés

III.1. Introduction	47
III.2. Généralités sur les pneus.....	47
III.3. La définition des pneus usagés non réutilisables (PUNR).....	48
III.3.1. Les composants d'un pneu	48
III.3.2. Les composants chimiques d'un pneu	50
III.3.3. Les caractéristiques mécaniques des pneus usagés non réutilisables	51
III.3.4. Critères de durée de service des pneus usagés non réutilisables	51
III.4. La poudrette de caoutchouc.....	52
III.4.1. Les caractéristiques de granulats de caoutchouc	53
III.4.2. Transformation de la poudrette de caoutchouc	54
III.4.2.1. Déchiquetage primaire.....	55
III.4.2.1.1. Déchiquetage à température ambiante	55
III.4.2.1.2. Cryogénie.....	56
III.4.2.2. Déchiquetage secondaire	56

III.4.2.2.1. Déchiquetage à température ambiante	56
III.4.2.2.2. Cryogénie.....	56
III.5. L'industrie pneumatique	57
III.5.1. L'industrie pneumatique dans le monde	57
III.5.2. L'industrie pneumatique en Algérie	57
III.6. Le recyclage de pneus	59
III.7. Valorisation du pneumatique usagé.....	60
III.7.1. Valorisation énergétique	60
III.7.1.1. Les aciéries	61
III.7.1.2. Les cimenteries	61
III.7.2. Valorisation matière.....	62
III.7.3. Valorisation originale de pneus usagés.....	62
III.8. Valorisation de pneumatiques usagés en Algérie	63
III.9. La technique pneusol	64
III.9.1. Définition et généralités	64
III.9.2. Intérêt de la technique pneusol.....	64
III.9.3. La technique pneusol en Algérie	65
III.9.4. Le comportement du pneusol	67
III.9.5. Le comportement général du pneusol.....	68
III.9.6. Le comportement mécanique du pneusol	68
III.9.7. Adhérence terre-pneumatiques.....	69
III.10. Valorisation de poudrette de caoutchouc	69
III.10.1. Application de poudrette de caoutchouc.....	69
III.10.2. La recherche en Algérie sur l'utilisation de la poudrette de caoutchouc dans les chaussées routières.....	71
III.10.3. Gazon synthétique	71
III.10.4. Autres domaines d'application	72
III.11. Conditions et mise en œuvre	72
III.12. L'intérêt de la poudrette de caoutchouc	73
III.13. Conclusion.....	74

Chapitre IV : Présentation et identification des matériaux utilisés

IV.1. Introduction	75
IV.2. Origine du matériau utilisé.....	75
IV.3. Prélèvement des échantillons	76
IV.4. Essais d'identification.....	76
IV.4.1. La teneur en eau (NF P94-050).....	76
IV.4.1.1. Objectif.....	76
IV.4.1.2. Appareillage.....	76
IV.4.1.3. Mode opératoire	76
IV.4.2. Analyse granulométrique	77
IV.4.2.1. Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056).....	78
IV.4.2.1.1. Objet de l'essai	78
IV.4.2.2.2. Principe de l'essai	78
IV.4.2.3.3. L'appareillage	78
IV.4.2.2. Analyse granulométrique par sédimentation (NF P94-057).....	80
IV.4.2.2.1. Le but de l'essai	80
IV.4.2.2.2. Le matériel nécessaire	80
IV.4.2.2.3. Le principe de l'essai	80
IV.4.2.2.4. Le mode opératoire	81
IV.4.3. Les limites d'Atterberg (NF P 94-051).....	81
IV.4.3.1. Le but des essais.....	82
IV.4.3.2. Préparation de l'échantillon.....	82
IV.4.3.3. La limite de liquidité	82
IV.4.3.3.1. Le matériel nécessaire	82
IV.4.3.3.2. Le principe de l'essai	83
IV.4.3.3.3. Le mode opératoire	83
IV.4.3.4. La limite de plasticité	84
IV.4.3.4.1. Le matériel nécessaire	84
IV.4.3.4.2. Le mode opératoire	85
IV.4.3.4.3. Le type du sol	87
IV.4.3.4.4. La nature du sol	88

IV.4.3.5. L'indice de consistance	88
IV.4.4. Détermination de la masse volumique des particules solides des sols (NF P 94-054)	89
IV.4.4.1. Objectif et but de l'essai	89
IV.4.4.2. Le matériel utilisé.....	89
IV.4.4.3. Exécution de l'essai.....	89
IV.4.5. Détermination de la masse volumique sèche (NF P 94-064).....	90
IV.4.5.1. Définition et but de l'essai.....	91
IV.4.5.2. Principe de l'essai	91
IV.4.5.3. Appareillage.....	91
IV.4.5.4. Exécution de l'essai.....	91
IV.4.6. Essai au bleu de Méthylène (VBS) (NF P 94-068).....	93
IV.4.6.1. Le but de l'essai	93
IV.4.6.2. Le principe de l'essai.....	93
IV.4.6.3. Le matériel nécessaire	94
IV.4.6.4. Conduite de l'essai	94
IV.5. Analyse granulométrique des grains de caoutchouc.....	96
IV.6. Conclusion	97

Chapitre V : Les essais mécaniques réalisés

V.1. Introduction	98
V.2. Le compactage des matériaux	98
V.2.1. Définition du compactage	98
V.2.2. Rôle du compactage sur la durée de vie des ouvrages.....	99
V.3. Les paramètres qui influent sur le compactage	99
V.3.1. La teneur en eau.....	99
V.3.2. La nature du matériau	100
V.3.3. L'énergie de compactage	100
V.3.4. L'angularité, la forme, la granularité et le pourcentage des fines.....	101
V.3.5. Sol support	101
V.4. Les essais de compactage en laboratoire.....	101

V.5. Essai Proctor normal (NF P 94-093).....	102
V.5.1. Le but de l'essai.....	102
V.5.2. Principe de l'essai.....	102
V.5.3. Matériel nécessaire	102
V.5.4. Le mode opératoire	103
V.5.5. Les calculs.....	104
V.6. Essais Proctor réalisés.....	105
V.6.1. Essai Proctor sans ajout	105
V.6.2. Ajout de 2 % de caoutchouc.....	105
V.6.3. Ajout de 4% de caoutchouc.....	106
V.6.4. Ajout de 6% de caoutchouc.....	106
V.7. Essai de cisaillement (NF P 94- 071-1)	106
V.7.1. But de l'essai	106
V.7.2. Principe de l'essai.....	107
V.7.3. Déroulement de l'essai.....	107
V.7.3.1. Mise en place de l'échantillon dans la boîte	107
V.7.3.2. Mise en place de la boîte sur la machine	108
V.7.3.3. Vitesse d'essai.....	109
V.7.3.4. Lectures.....	109
V.7.3.5. Fin de l'essai	109
V.7.4. Les calculs.....	110
V.7.5. Les caractéristiques mécaniques.....	111
V.7.5.1. Les calculs.....	111
V.7.5.2. Présentation des résultats.....	112
V.7.5.3. La variation de la cohésion en fonction du pourcentage de caoutchouc	129
V.7.5.4. La variation de l'angle de frottement interne en fonction du pourcentage de caoutchouc	129
V.8. Conclusion.....	129

Chapitre VI :Interpretation des résultats

VI.1. Introduction	130
--------------------------	-----

VI.2. Essais Proctor	130
VI.2.1. Essai Proctor sans ajout	130
VI.2.2. Ajout de 2 % de caoutchouc	130
VI.2.3. Ajout de 4 % de caoutchouc	131
VI.2.4. Ajout de 6 % de caoutchouc	131
VI.3. Interprétation des résultats	132
VI.3.1. La variation de la teneur en eau en fonction du pourcentage d'ajout.....	132
VI.3.2. La variation de la masse volumique sèche en fonction du pourcentage d'ajout	133
VI.3.3. Superposition des courbes	133
VI.4. Essai de cisaillement et interprétation des résultats	134
VI.4.1. Cisaillement pour le sol sans ajout a 1, 2, 3 Bar	134
VI.4.2. Cisaillement pour le sol avec ajout de 2% de caoutchouc à 1, 2, 3 bar.....	135
VI.4.3. Cisaillement pour le sol avec ajout de 4% de caoutchouc à 1, 2, 3 bar.....	137
VI.4.4. Cisaillement pour le sol avec ajout de 6% de caoutchouc à 1, 2, 3 bar.....	138
VI.5. Interprétation des résultats	139
VI.6. Conclusion	140
Conclusion générale.....	140
Références bibliographiques.....	142



Introduction générale

Introduction générale

En génie civil, le sol est un terme utilisé pour désigner un matériau constitué d'un agrégat naturel de particules minérales de dimensions comprises dans des limites prédéfinies. L'argile est l'une des différentes particules minérales qui forment le sol, c'est une matière première utilisée depuis l'antiquité dans divers domaines de la vie courante comme la poterie et les matériaux de constructions. Aujourd'hui le champ d'exploitation de cette matière est encore développé jusqu'au domaine des travaux publics et du bâtiment.

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

Le comportement des sols argileux pose un problème très important aux ingénieurs lors de réalisation de différents ouvrages du génie civil. Le matériau argileux possède une particularité de changement. En effet, un certain degré d'humidité peut le transformer en un matériau plastique et malléable. Ces modifications de consistance peuvent s'accompagner, en fonction de la structure particulière de certains minéraux argileux, de variations de volume plus ou moins conséquentes qui se manifestent soit sous forme d'une forte augmentation de volume (phénomène de gonflement) lorsque la teneur en eau augmente, ou de rétrécissement (phénomène de retrait) en période de déficit pluviométrique marqué.

Pour répondre au besoin de la construction les ingénieurs et les chercheurs sont amenés à prêter une attention particulière à la stabilisation des sols avec incorporation de stabilisants afin de développer la production des matériaux de construction nécessaires tant en quantité qu'en qualité.

Les vingt dernières années ont vu la recherche se consacrer en grande partie au développement et à la mise à disposition du plus grand nombre de nouvelles techniques d'amélioration des sols. Il existe plusieurs techniques de construction, de stabilisation et de confortement elles ont été utilisées dans le domaine de génie civil afin de résoudre les problèmes vécus. L'ajout de granulats de pneus usagés est l'une des techniques d'amélioration des caractéristiques des sols de qualité médiocre.

Les déchets caoutchouteux sont considérés comme encombrants et non respectueux de l'environnement. L'industrie automobile est une activité qui consomme un volume important de caoutchouc et par conséquent elle est la source principale des déchets de caoutchouc. Il convient donc indispensable, avec l'accroissement continu du nombre de véhicules dans le monde, de trouver des applications innovantes pour absorber une quantité de ces déchets.

Introduction générale

Les pneus usés présentent un danger pour la nature ainsi que pour l'homme, aujourd'hui les déchets posent un véritable défi, ce qui impose la valorisation de ces pneus pour un but multiple : libérer la nature de ces déchets et les réutiliser.

L'objectif visé dans ce mémoire est l'étude de l'effet d'ajout des granulats de caoutchouc issus du broyage des pneumatiques usagés, sur le comportement au compactage et la résistance au cisaillement d'une argile, selon différents pourcentages.

Le mémoire comporte deux parties, une partie théorique dans laquelle les principes fondamentaux de comportement des sols argileux ont été présentés. De plus, un état de l'art sur les déchets caoutchouteux et ses applications dans le domaine du génie civil, a été présenté. Dans la partie expérimentale, nous avons présenté et discuté les résultats d'essais Proctor et de cisaillement à la boîte de l'argile avec des granulats de pneus usés.

Pour arriver aux objectifs de l'étude, nous avons structuré le mémoire en six chapitres :

- **Le premier chapitre** « Généralités sur les argiles » est consacré à la présentation des argiles, leurs structures, leurs méthodes d'identification, leurs caractéristiques, leurs propriétés, et leurs problèmes.
- **Le deuxième chapitre** « Techniques de traitement des argiles » présente une synthèse bibliographique sur la stabilisation et les divers stabilisants à incorporer aux sols argileux pour répondre aux exigences de qualité que doit avoir un matériau moderne.
- **Le troisième chapitre** « Valorisation de pneus usés » est consacré à la problématique des pneus usagés dans le monde et en Algérie, ainsi que les différentes techniques de valorisation dans le secteur du génie civil.
- **Le quatrième chapitre** « Présentation et identification des matériaux utilisés » englobe la partie expérimentale de cette étude réalisée au niveau du laboratoire de mécanique des sols du département de génie civil à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Dans ce chapitre, sont présentés les différents essais d'identification du matériau utilisé.
- **Le cinquième chapitre** « Les essais mécaniques réalisés » est consacré aux essais mécaniques réalisés, tout en montrant le but, le principe, le mode opératoire, l'appareillage et les résultats de chaque essai sous forme de tableaux.

Introduction générale

- **Le sixième chapitre** « Interprétation des résultats » est un chapitre récapitulatif, contenant toutes les interprétations des résultats obtenus lors des différents essais réalisés dans ce travail.

Enfin, on termine cette étude par une conclusion générale, où on a synthétisé l'ensemble des résultats obtenus.



Chapitre I

Généralités sur les argiles

I.1. Introduction

Dans leur état naturel, les sols sont des matériaux hétérogènes avec des caractéristiques très variables. Les principaux problèmes liés à l'utilisation des sols dans les terrassements des infrastructures de transport (routes, chemins de fer, aérodromes, ports...) se manifestent en général par une capacité portante faible, des déformations (tassements) et des glissements de talus. Le développement de la mécanique des sols, et la recherche dans le domaine de la géotechnique, ont permis de mieux connaître les sols à travers des essais de caractérisation afin de mettre au point des techniques permettant l'amélioration des sols présentant de médiocres propriétés mécaniques. Dans ce chapitre, on s'intéresse aux généralités sur les argiles, ainsi que les différentes pathologies rencontrées lors de réalisation des différents ouvrages sur ce type de sols.

I.2. Définition

Le terme argile trouve son origine dans le mot grec argilos dérivé d'argos qui signifie blanc, puis sa traduction en latin : argilla. Cette nomination par les anciens est semblable-t-il due à la couleur du matériau utilisé en céramique.

L'argile brute contient généralement des particules élémentaires dont le diamètre des grains est inférieur à 2 micromètres ($<2\mu\text{m}$) qui représentent les individus cristallins (phase minérale pure) appelés minéraux argileux responsables de ses propriétés tel que le gonflement, la plasticité et les propriétés d'adsorption. Mais dans les sols, ces particules élémentaires sont en général liées entre elles par des ciments de nature très diverse (carbonates, composés organiques, composés minéraux amorphes ou oxydes et hydroxyde de fer et d'aluminium, quartz feldspaths) au sein d'agrégats de tailles beaucoup plus grandes.

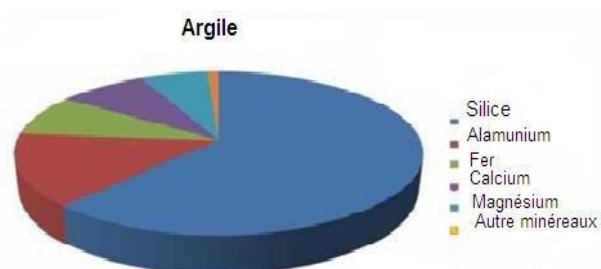


Figure I.1. Les constituants généraux de l'argile

L'argile s'applique dans divers domaines de notre vie de tous les jours (médecine vétérinaire, industrie pétrolière, la poterie, l'industrie alimentaire...), donc c'est une matière première qui joue un rôle très important dans le développement de plusieurs secteurs.

I.3. Origine des minéraux argileux

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

Les reliefs qui forment la surface de la terre sont composés de différentes roches, pour certaines magmatiques (issues directement du magma) pour d'autres, métamorphiques (seconde cristallisation de sédiments ou de roches magmatiques).

En fonction des roches mères et du climat, les minéraux argileux résultant sont différents. En climat froid : L'altération est faible, les minéraux argileux sont identiques ou peu différents des minéraux de la roche (illite et chlorite), ils sont hérités de la roche d'origine. En climat chaud et humide, l'hydrolyse est poussée, la kaolinite se forme en milieu drainé, les Smectite en milieu confiné (Figure I.2).

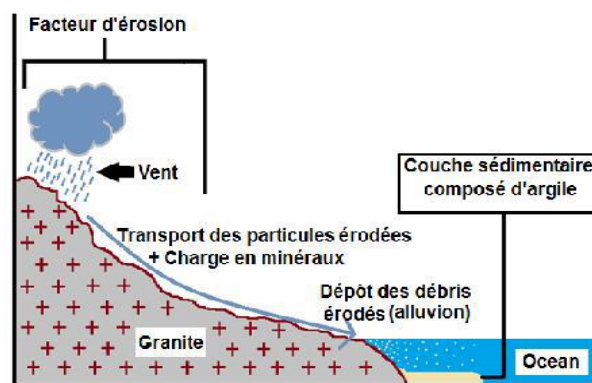


Figure I.2. Processus de formation de l'argile

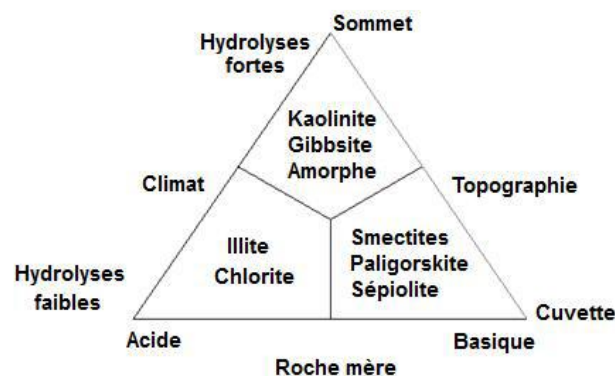


Figure I.3. Les différents types de phyllosilicates formés au cours de l'altération

I.4. Structure des sols argileux et liaisons structurelles

La structure initiale des sols argileux se forme, en règle générale, lors de la sédimentation en milieu aqueux des produits de l'altération des massifs rocheux contenant des quantités importantes de petites particules de minéraux secondaires. Par la suite, des processus lents et variés de diagenèse peuvent modifier sensiblement la structure initiale de ces argiles. La combinaison de particules isolées et d'agrégats conduit à la formation d'un système structurel, c'est-à-dire une disposition ordonnée des particules et agrégats dans le sol indépendante de l'influence des parties gazeuses ou liquides du sol, qui se forme dans les processus de sédimentation, de diagenèse et de post-genèse [DEGOUTE G. et al., 2005].

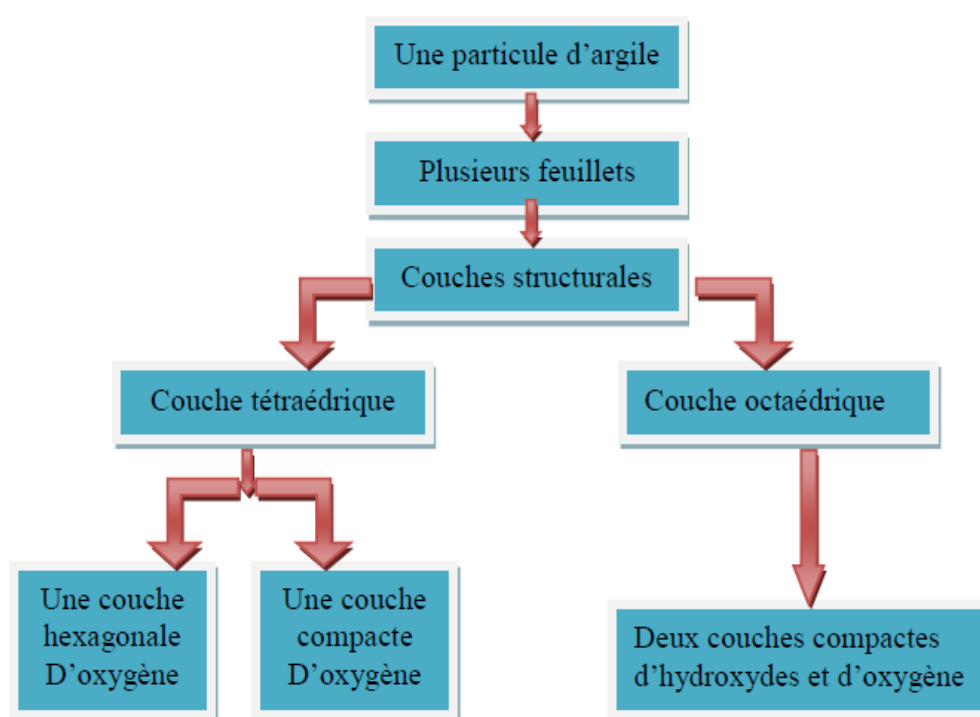


Figure I.4. Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile

Les minéraux argileux sont des phyllosilicates ayant leur structure composée de couches de types différentes : une couche tétraédrique et une couche octaédrique (Figure I.4). Le réseau cristallin fondamental est constitué de deux éléments essentiels : le silicium et l'aluminium entourés d'oxygène et/ou d'hydroxydes. Le silicium occupe le centre d'un tétraèdre et l'aluminium celui d'un octaèdre. L'accolement de plusieurs tétraèdres ou de plusieurs octaèdres constitue une couche correspondante [CAILLERE S. et al., 1982].

L'identification des différents groupes de minéraux argileux est fonction de l'arrangement de ces couches. L'organisation structurale des phyllosilicates est basée sur une charpente

d'ions O^{2-} et OH^- . Des cations de taille variable (Si^{4+} ; Al^{3+} ; Fe^{2+} ; et Mg^{2+}) viennent se loger dans les cavités de ces unités structurales élémentaires en position tétraédrique ou octaédrique. Le nombre de couches octaédriques et tétraédriques constitué, permet de déterminer l'épaisseur du feuillet. L'espace entre deux feuillets successifs s'appelle espace interfoliaire [CAILLERE S. et al., 1982].

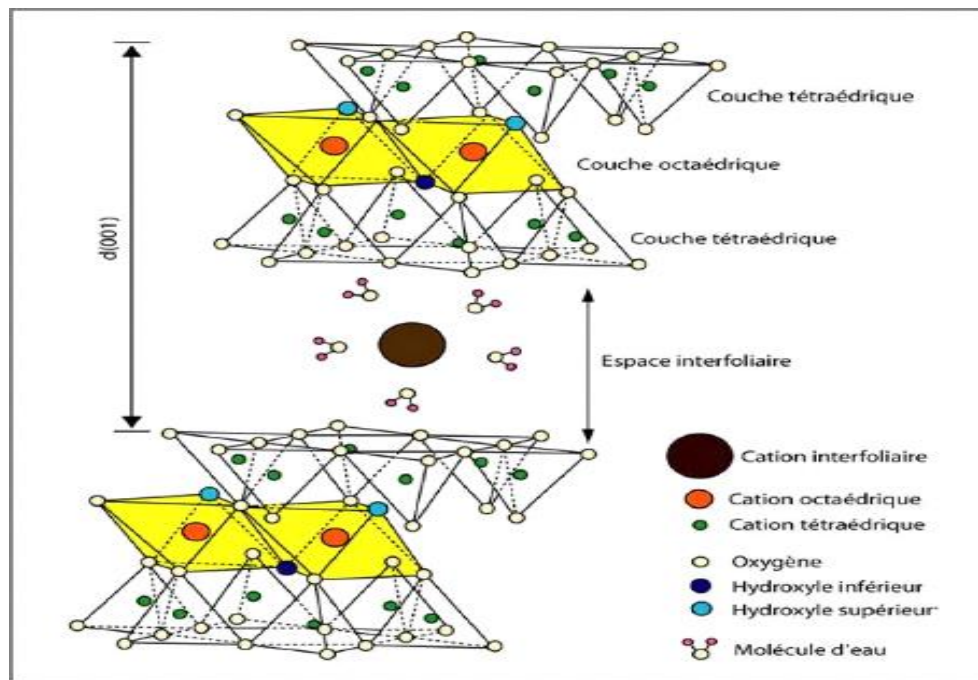


Figure I.5. Représentation des couches : tétraédrique, octaédrique et l'espace interfoliaire

Lorsque deux cavités sur trois de la couche octaédrique sont occupées par Al^{3+} (ou un autre ion métallique trivalent) la structure est dénommée **dioctaédrique**.

Dans le cas où la totalité des cavités de la cavité octaédrique est occupée par des ions métallique bivalents, la structure est dite **trioctaédrique**.

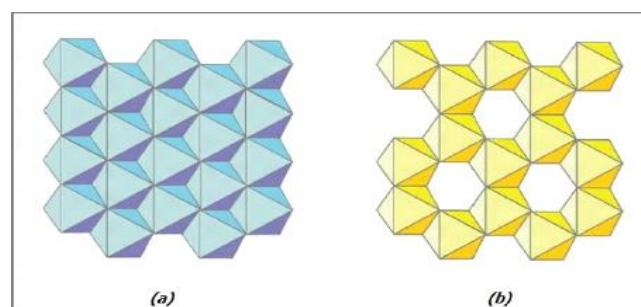


Figure I.6. Représentation polyédrale d'un feuillet : (a)- Trioctaédrique (b)- Dioctaédrique

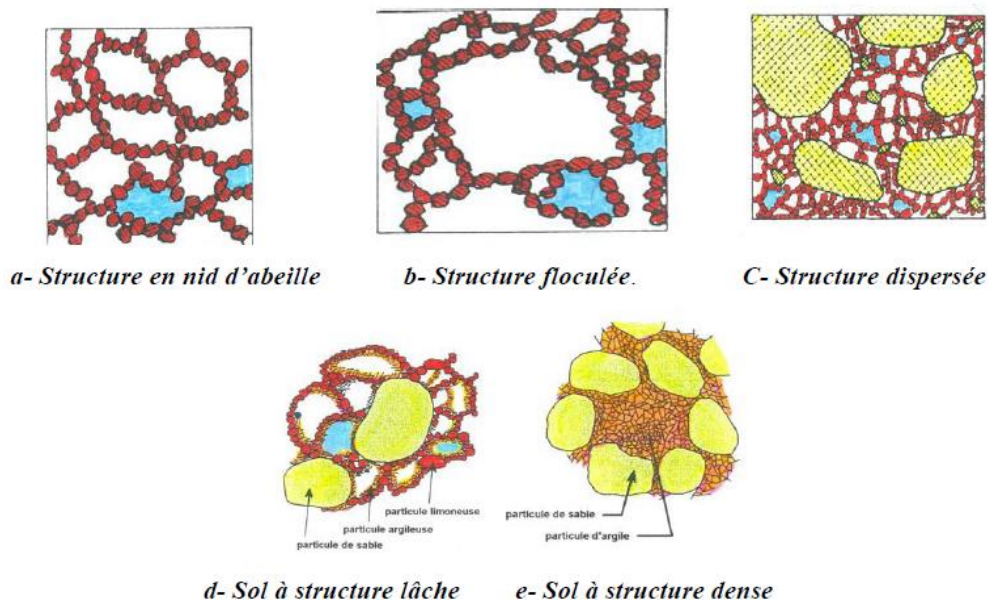


Figure I.7. Différentes structures des argiles, d'après TERZAGHI, 1951

I .5. Classification des agriles

Il existe différentes classifications des argiles. La plus classique est basée sur l'épaisseur et la structure des feuillets. La classification des argiles la plus classique est basée sur le mode d'association des couches structurales. On distingue quatre groupes :

I .5.1. Minéraux de type 1 :1 (ou T-O)

Ce type de minéraux a une couche d'octaèdre (O) et une couche de tétraèdre (T). La maille élémentaire se compose de six sites octaédriques. L'équidistance caractéristique de cette classe est voisine de 7 Å. L'espace interfoliaire de cette classe de minéraux argileux est vide, par conséquent leur cohésion des couches élémentaires est assurée par les forces (assez faibles) de Van Der Waals et des liaisons hydrogènes entravant l'insertion de toute espèce chimique. À ce type correspond le groupe de la kaolinite [LAHCEN B., 2012].

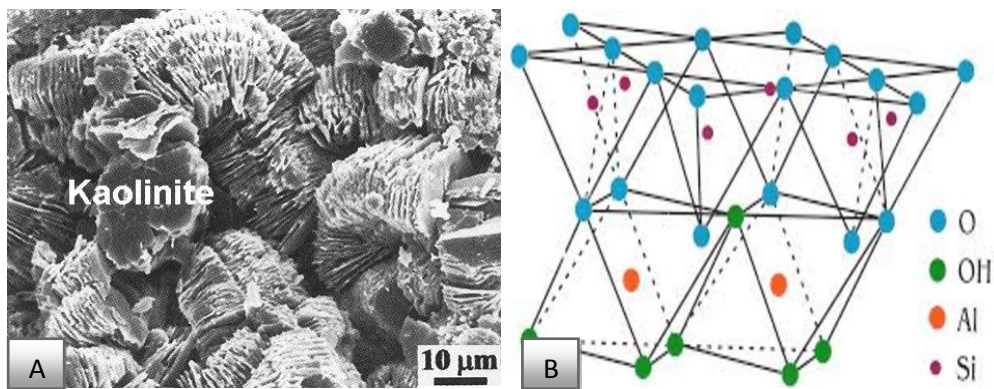


Figure I.8. (A) : Vue microscopique d'une kaolinite, (B) : Structure d'une kaolinite

I.5.2. Minéraux de type 2 :1 (ou T-O-T)

Ce type des minéraux a une couche octaédrique (O) encadrée par deux couches tétraédriques(T). Dans ce cas, la maille élémentaire est formée de six sites octaédriques et huit sites tétraédriques. La distance basale caractéristique varie de 9,4 à 15 Å selon le contenu de l'espace interfoliaire [LAHCEN B., 2012].

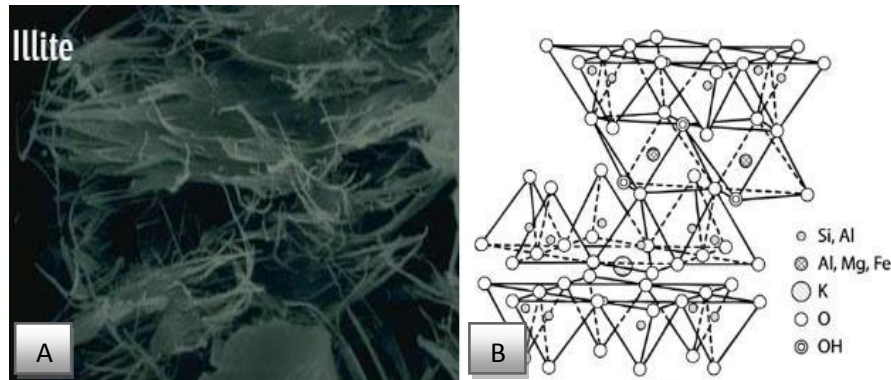


Figure I.9. (A) : Vue microscopique d'une illite, (B) : Structure d'une illite

I.5.3. Minéraux de type 2:1:1(ou T-O-T-O)

Ce type de minéraux a une couche octaédrique encadrée par deux couches tétraédriques et dont l'espace interfoliaire est occupé par une couche d'octaèdre. Ce groupe de minéraux argileux exhibe une équidistance d'environ 14 Å. Le minéral argileux cristallisant dans cette structure correspond à la famille des chlorites [LAHCEN B., 2012].

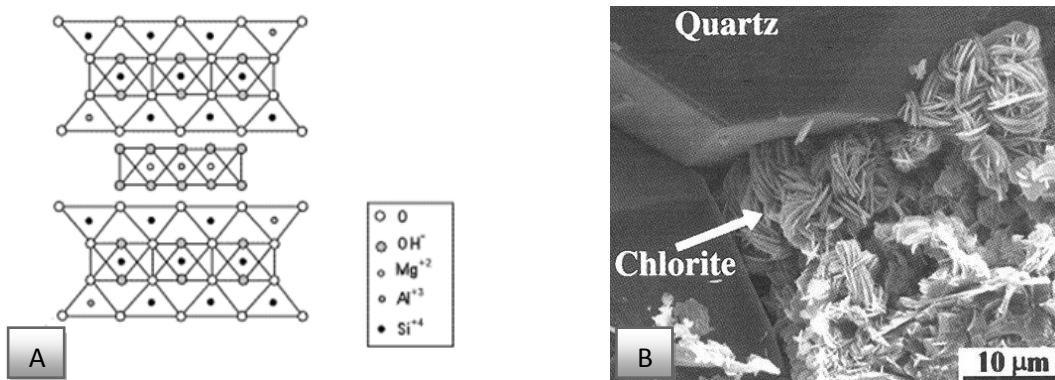


Figure I.10. (A) : Vue microscopique d'une chlorite, (B) : Structure d'une chlorite

I.5.4. Minéraux interstratifiés

Ce type de minéraux est formé par un mélange d'argile phylliteuses. C'est l'association de deux ou plusieurs feuillets, qui s'alternent de différentes manières soit :

- irrégulière : la sudoite (chlorite – montmorillonite) ;
- régulière : bravaisite (illite – montmorillonite).

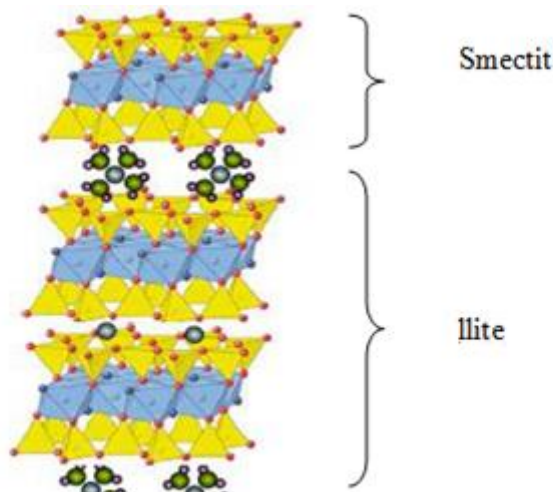


Figure I.11. Représentation schématique d'interstratifié Smectite/illite

Tableau I.1. Classification des phyllosilicates, d'après CAILLÈRE, 1959, complété par MITCHELL, 1993

Nature du feuillet	Nature des cations interfoliaires	Groupe	Nature de la couche octaédrique	Exemples
1 : 1	Pas de cations ou seulement de l'eau	Kaolinite	Diocatédrigue	Kaolinite, halloysite, nacrite, dickite
2 : 1	Pas de cations	Pyrophyllites	Diocatédrigue	Talc
	Cations hydratés et échangeables	Smectites	Diocatédrigue	Montmorillonite, nontronite, beidellite, saponite
		Vermiculites	Diocatédrigue	Vermiculite diocatédrigue à trioctatédrigue
	Cations monovalents non-hydratés	Micas	Diocatédrigue	Muscovite, Illite, Paragonite, biotite
	Cations divalents non-hydratés	Micas durs	Diocatédrigue	Margarite, clintonite
	Hydroxyles	Chlorites	Diocatédrigue	Donbassite, sudoite, Clinochore
2:1 fibré	/	Palygorskites, Sépiolites	Diocatédrigue	Sépiolite, Palygorskite

I.6. Les propriétés des argiles

Les minéraux argileux se caractérisent par trois propriétés principales : leur forme et leur surface spécifique, leur capacité d'adsorption d'eau de gonflement et leurs multiples possibilités d'échanges ioniques [AMIROUCHE.L, 2011].

I.6.1. La plasticité

Elle est liée à la présence des feuillets dont les déplacements possibles les uns sur les autres ont pour conséquence la malléabilité de l'argile (la propriété d'un matériau à être déformé à chaud et à froid par un choc ou pression, en conservant la nouvelle forme acquise).

I.6.2. La surface spécifique

La surface spécifique d'une poudre d'argile est la surface développée par l'ensemble des grains. La surface spécifique d'un matériau argileux constitue un indicateur de sa susceptibilité au phénomène de retrait-gonflement, et par conséquent il s'agit d'un paramètre important pour le choix des voies de valorisation. On la mesure le plus souvent en fixant un gaz (azote) à basse température en monocouche sur la surface de chaque grain.

I.6.3. La capacité d'échange cationique (C.E.C)

Les argiles ont la propriété de fixer de façon réversible (échangeable) des cations contenus dans les solutions environnantes. La capacité d'échange cationique (CEC) (Tableau I.2) correspond au nombre de cations monovalents qu'il est possible de substituer aux cations compensateurs pour compenser la charge négative de 100 grammes d'argile. Elle s'exprime généralement en milliéquivalents pour 100 grammes (még/100g), 1 milliéquivalent = 96,5 Coulomb. Cette caractéristique est fonction du type d'argile, de ses caractéristiques cristallographiques, de ses cations et du pH du milieu. Cette propriété est importante dans le comportement rhéologique des argiles. L'échange de cations n'est possible que s'ils sont retenus par des liaisons faibles sur des surfaces externes ou internes (zone inter foliaires) des cristaux.

La C.E.C externe dépend du nombre de sites de fixations des cations sur les surfaces externes. Aux bordures d'un feuillet, les valences du silicium et de l'oxygène en couche tétraédrique d'une part, de l'aluminium et de l'oxygène en couche octaédrique, d'autre part, ne sont pas saturées. Pour comprendre ces valences, des molécules d'eau s'introduisent et il y a apparition de groupes Silanol (Si - OH) ou aluminol (Al - OH) qui en fonction du pH peuvent capter ou libérer des protons. Ces derniers peuvent être échangés avec d'autres cations. Le

nombre et la nature des charges de bordure de feuillet seront directement liés au pH [CAILLERE S. et al., 1982] .

La CEC interne dépend des charges permanentes [MEUNIER A., 2002], la substitution la plus fréquente est celle de Al^{3+} par Mg^{2+} dans la couche octaédrique. C'est le mécanisme principal d'échange pour une montmorillonite. Pour cette argile, la distance entre les sites négatifs situés au niveau de la couche octaédrique et le cation échangeable situé à la surface du feuillet est telle que les forces d'attraction sont faibles [CAILLERE S. et al., 1982] .

Tableau I.2. Surface spécifique et C.E.C de quelques minéraux argileux

Minéral	Surface interne (m ² /g)	Surface externe (m ² /g)	Surface totale (m ² /g)	C.E.C (milliéquivalent/100g)
Kaolinite	0	10-30	10-30	5-15
Illite	20-55	80-120	100-175	10-40
Smectites	600-700	80	700-800	80-150
chlorite	-	100-175	100-175	10-40

I.6.4. Propriétés colloïdales

Cette propriété est d'une grande importance pour les procédés de purification des argiles. Elle est liée à la présence de charges négatives à la surface de chaque grain d'argile. Le caractère colloïdal se traduit par le recouvrement de chaque grain d'argile par une double couche d'ions hydrosoluble de charges opposées [AMIROUCHE L., 2011].

I.6.5. Propriétés de gonflement

Mise en suspension aqueuse, l'argile peut fixer une quantité notable d'eau (c'est plus particulièrement le cas de la montmorillonite). On a deux types de gonflement [FREDERIC., 2001] : gonflement interfoliaire et gonflement interparticulaire.

I.6.6. Absorption et adsorption

L'intérêt des argiles en thérapeutique est lié à leur pouvoir couvrant et à leurs propriétés de surface et réactivité qui leur confèrent des propriétés **d'adsorption**, chélation et capture des particules externes, ainsi qu'à leur capacité **d'absorption**, des propriétés spécifiques des silicates et des alumines qui les composent et à celles de leurs ions de compensation.

- **L'absorption** est la propriété que présentent les solides et les liquides de retenir certaines substances (gaz ou liquides) dans la totalité de leur volume (comme dans une éponge) ;
- **L'adsorption** est un phénomène de surface par lequel des atomes ou des molécules de gaz ou de liquides se fixent sur une surface solide selon divers processus plus ou moins intenses.

I.6.7. Rétention des métaux par les argiles

L'étude du comportement des argiles dans le cadre de l'interaction argile-polluant est un sujet qui a suscité un grand intérêt depuis de nombreuses années. Des mécanismes distincts peuvent conduire à la rétention d'éléments par une surface solide. Ces mécanismes sont:

- la précipitation, engendrant l'apparition d'une nouvelle phase solide sur la surface du minéral;
- l'absorption, correspondant à la migration d'espèces dissoutes vers l'intérieur des solides (espace inter foliaire) ;
- l'adsorption, correspondant à la fixation physique ou chimique des espèces ou d'éléments dissous (à la surface du solide) ;
- l'échange d'ion, correspond au remplacement d'un ion initialement présent en position échangeable (dans l'espace inter foliaire ou à la surface du solide), par un ion présent à l'état dissous [JOZJA N., 2003].

I.6.8. La théorie d'échange d'ions

Le phénomène d'échange d'ions peut être invoqué pour tout système constitué d'au moins deux phases non miscibles présentant les propriétés suivantes :

- la phase solide (constituant l'échangeur d'ions) imprégnée de liquide, développe à sa surface des charges positives ou négatives qui sont alors exactement compensées par des charges de signes opposés apportés par les ions de la solution ;
- l'ensemble (solide, ions compensateurs) constitue la phase échangeuse d'ions. La charge totale nette doit être nulle ;
- les charges portées par le solide sont localisées au niveau de groupements fonctionnels ionisés (par exemple la charge permanente résultant de substitutions isomorphiques au sein du cristal argileux). On considère que les zones de surface

où sont concentrées les charges électrostatiques constituent des sites d'échanges d'ions [AMIROUCHE.L, 2011].

I.6.9. Échanges d'eau

La réactivité des argiles en milieu aqueux est aussi corrélée à la capacité d'échange d'eau. Celle-ci est plus ou moins étroitement liée à la structure:

- eau libre entre les particules (macroporosité, capillarité, eau dite hygroscopique);
- eau captée entre les différents feuillets par les ions de compensation (nano porosité eau dite d'hydratation), et qui permet l'écartement de ces mêmes feuillets ou « gonflement » ;
- eau intégrée à la structure même des feuillets (hydroxyles, eau dite de constitution ou de cristallisation), qui ne sera libérée que lorsque ceux-ci seront détruits, par une trop forte cuisson par exemple.

Pour rappel, grâce à leurs propriétés d'absorption, les argiles sont capables de capter les liquides environnants. Dans les sols, les particules d'argile servent de banque d'eau, la captant lorsqu'elle est abondante, la reléguant lorsque le milieu s'assèche, s'équilibrant avec le milieu. Les argiles servent également de banque de minéraux pour les plantes, les livrant à celles-ci en fonction de leurs besoins [GRIM E., 1962].

I.7. Les forces entre les minéraux d'argile

Les feuillets sont soumis à trois forces dont deux de nature répulsive et l'autre attractive du type Van der Waals.

La résultante des forces, qui est de nature répulsive, diminue avec l'augmentation de la distance interfoliaire, autrement dit avec le gonflement [BEKHTI M, 2019].

I.7.1. Force de répulsion

Les forces de répulsion sont dues généralement à l'énergie d'hydratation des feuillets et des cations compensateurs, à l'interaction des doubles couches ioniques associés à des feuillets voisins et à la pression osmotique [BEKHTI M, 2019].

I.7.2. Force d'attraction

La force de Van der Waals est de nature attractive. Elle génère une énergie d'attraction qui est inversement proportionnelle à la distance qui sépare les deux feuillets [BEKHTI M, 2019].

I.7.3. Force d'hydratation (attractive-réulsive)

En théorie, lorsque la distance interfeuille est réduite, les forces d'attraction dominent les forces de répulsion, autrement dit il n'y a pas de gonflement [BEKHTI M, 2019].

I.8. Les caractéristiques physiques des argiles

L'argile en particulier a fait l'objet de nombreux travaux de recherche sur sa nature minéralogique. La différenciation entre les différents types d'argile se fait essentiellement par un certain nombre d'essais en laboratoire ou in situ, qui permettent de déterminer les paramètres d'état de nature du matériau (voir tableau I.3), ainsi que son comportement mécanique et hydraulique.

Tableau I.3. Caractéristiques physiques générales des argiles

caractéristiques physiques	Notation	Valeur moyenne	Unité
Poids volumique humide	γ ou γ_h	16 à 22	KN/m ³
Poids volumique sec	γ_d	10 à 20	KN/m ³
Poids volumique saturé	γ_{sat}	19 à 22	KN/m ³
Poids volumique déjaugé	γ'	9 à 12	KN/m ³
Densité relative	G_s	2.60 à 2.86	/
Porosité	η	0.20 à 0.80	/
Indice des vides	e	0.3 à 1	/
Teneur en eau	w	10 à 20	%

I.9. Les caractéristiques mécaniques des argiles

Le comportement mécanique des matériaux est caractérisé par des paramètres qui permettent d'estimer les tassements, la compressibilité ou la consolidation, et la résistance au cisaillement des sols. Ces paramètres sont obtenus à partir des essais géotechniques en laboratoire, notamment [HOTLZ. Et al., 1991] :

- **l'essai de compactage Proctor**, il a pour objectif d'étudier l'influence de la teneur en eau d'un échantillon de sol sur son poids volumique sec soumis à une énergie de compactage déterminée. Il permet ainsi, de déterminer la teneur en eau optimale nécessaire pour avoir la densité sèche maximale du sol ou des matériaux analysés ;
- **l'indice portant immédiat (IPI)**, à teneur en eau naturelle exprime la capacité au poinçonnement d'une éprouvette de sol compactée à énergie Proctor ;

- **l'essai de cisaillement direct à la boîte**, a pour objectif de déterminer la résistance au cisaillement du sol (la contrainte de cisaillement à la rupture τ), ainsi que les caractéristiques mécaniques (c et ϕ) pour une contrainte normale donnée (σ), suivant un plan de cisaillement horizontal imposé ;
- **l'essai de cisaillement à l'appareil triaxial**, a pour objectif de déterminer la résistance au cisaillement du sol ainsi que les caractéristiques mécaniques (c et ϕ) pour une contrainte de confinement donnée σ_3 ;
- **l'essai de compression simple**, a pour objectif de mesurer la force axiale de rupture de l'échantillon sous une vitesse de compression donnée ;
- **l'essai oedométrique**, permet d'évaluer le tassement et le gonflement du matériau au cours du temps. Il permet également de classer les sols vis-à-vis de leur compressibilité.

I.10. Le gonflement des argiles

Certaines argiles, pour lesquelles les liaisons inter-feuillets sont faibles, ont la propriété de fixer des molécules d'eau entre deux feuillets voisins, comme dans le cas des smectites, l'eau pénètre alors à l'intérieur des particules et s'organise en couches mono-moléculaires [BEKHTI M, 2019].

On distingue deux types de gonflements, un gonflement interfoliaire et un gonflement interparticulaire.

Le gonflement interfoliaire : résulte de la cassure des faibles liaisons entre les feuillets des particules d'argile, et permettent l'acquisition d'eau au sein de la structure des particules. Ce gonflement est assez rapide et son amplitude est très notable.

Le gonflement interparticulaire : résulte de l'apport d'eau supplémentaire qui écarte les plaquettes (assemblage de feuillets) les unes des autres. Cette réaction est lente et peut durer des années même lorsque la succion devient nulle. Le gonflement interparticulaire a une ampleur assez limitée et affecte toutes les argiles contrairement au gonflement interfoliaire.

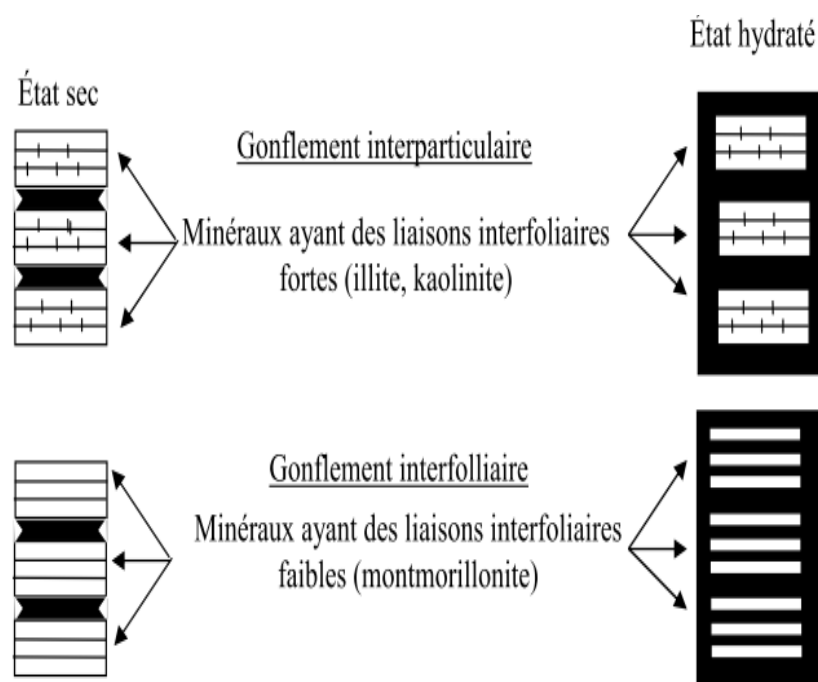


Figure I.12. Mécanisme de gonflement des argiles par hydratation

Le processus de gonflement des sols argileux est contrôlé par plusieurs mécanismes superposés à différentes échelles et s'exprime de manière différée à l'échelle macroscopique. La cinétique du gonflement, c'est-à-dire la relation existante entre la déformation et le temps, est en générale très lente et dépend de la nature et de l'état du sol et du niveau de chargement.

I.11. Les principales causes du gonflement

Les quatre principaux phénomènes expliquant les causes du gonflement sont :

- hydratation par adsorption ;
- hydratation par osmose ;
- hydratation par capillarité ;
- transformations chimiques.

I.11.1. Hydratation par adsorption

Les argiles sont principalement caractérisées par un déséquilibre électrique dû à une substitution isomorphe de cations dans la structure octaédrique des feuillets. Il en résulte alors la formation de la double couche diffusée due à la fixation des cations échangeables qui s'installent à la surface des feuillets du fait des forces électrostatiques qui sont les suivantes :

I.11.1.1. Les forces d'attraction

Généralement causées par les forces de Van Der Waals entre les feuillets voisins.

I.11.1.2. Les forces de répulsion

Ayant plusieurs composantes (interaction des doubles couches associées aux feuillets, énergie d'hydratation des cations compensateurs). Ces deux forces décroissent rapidement avec la distance interparticulaire. Quant à la force de répulsion, elle diminue également avec l'augmentation de la concentration en électrolytes.

I.11.2. Hydratation par osmose

Lorsqu'une solution saline est séparée de l'eau pure par une membrane semi-perméable idéale (permettant uniquement le passage des molécules d'eau mais non des substances dissoutes), l'eau pure a alors tendance à traverser la membrane pour diminuer la concentration de la solution. Ce phénomène est appelé osmose. La pression qu'il faut appliquer pour empêcher l'arrivée de l'eau dans la solution saline est nommée la pression osmotique.

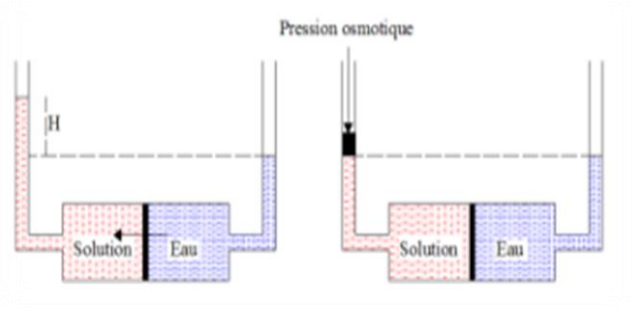


Figure I.13. Phénomène osmotique idéal

Si la concentration de l'eau libre est inférieure à la concentration de l'eau de la double couche, ils résultent alors une migration des molécules d'eau des pores larges vers les particules argileuses, entraînant l'augmentation de la distance inter feuillet.

Par contre, il en résulte une pression osmotique d'attraction entraînant la contraction du matériau argileux. Le phénomène d'hydratation par osmose permet d'expliquer le fait que lorsque la salinité de la solution d'hydratation augmente, le matériau argileux gonfle moins [BELABBACI., 2014].

I.11.3. Hydratation par capillarité

La capillarité est une caractéristique des matériaux non saturés de faible porosité. Elle se traduit par une extension dans la phase liquide lors de la saturation ou par une contraction lors de la désaturation.

La saturation des matériaux fins après une phase de drainage peut entraîner le piégeage de l'air par l'eau à l'intérieur du réseau poreux. Ce mécanisme peut engendrer la compression de l'air responsable de la dégradation ou de la fragmentation des matériaux argileux.

La capillarité dépend du phénomène d'adsorption, le film d'eau adsorbé diminue l'espace poreux et modifie par la suite la capillarité [BELABBACI., 2014].

I.11.4. Transformations chimiques

Les trois transformations chimiques sont [BELABBACI., 2014] :

- la transformation de l'anhydrite en gypse ;
- l'oxydation de la pyrite ;
- la dissolution des carbonates dans l'eau.

I.12. Les principaux problèmes des sols argileux

Les sols argileux peuvent se modifier en fonction des variations d'eau du terrain. Lors des périodes de sécheresse, le manque d'eau entraîne un tassement irrégulier du sol en surface : on parle de retrait. À l'inverse, un nouvel apport d'eau dans ces terrains produit un phénomène de gonflement.

I.12.1. Le phénomène du retrait gonflement

Le retrait-gonflement des argiles est lié aux variations de teneur en eau des terrains argileux : ils gonflent avec l'humidité et se rétractent avec la sécheresse. Ces variations de volume induisent des tassements plus ou moins uniformes et dont l'amplitude varie suivant la configuration et l'ampleur du phénomène [LERAU, 2006].

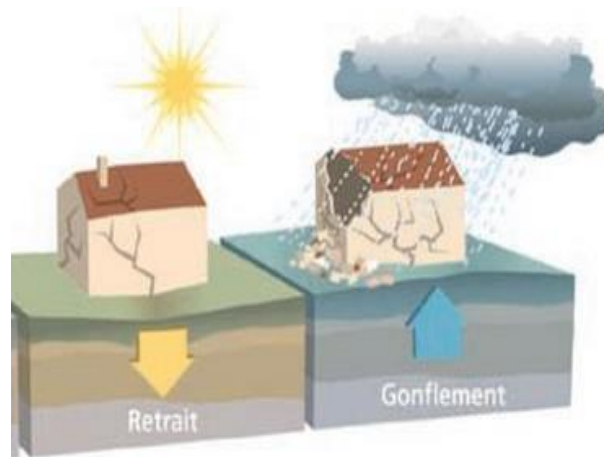


Figure I.14. Représentation du phénomène du retrait gonflement

Les mouvements de terrain induits par le retrait et le gonflement des argiles se traduisent principalement par des fissurations en façade des habitations, souvent obliques, et passant par les points de faiblesse que constituent les ouvertures.



Figure. I.15. Fissures au niveau d'une structure

I.12.2. Le phénomène de glissement

Le glissement de terrain est un déplacement lent par gravité d'un versant instable pouvant s'accélérer pour aller jusqu'à la rupture. il peut-être superficiel ou profond.

Les glissements se caractérisent par la translation latérale d'une certaine masse de matériaux au niveau d'une surface de rupture nettement individualisée et se produisent généralement dans des matériaux faiblement cohérents. Ce sont les mouvements qui affectent le plus fréquemment les ouvrages de génie civil.

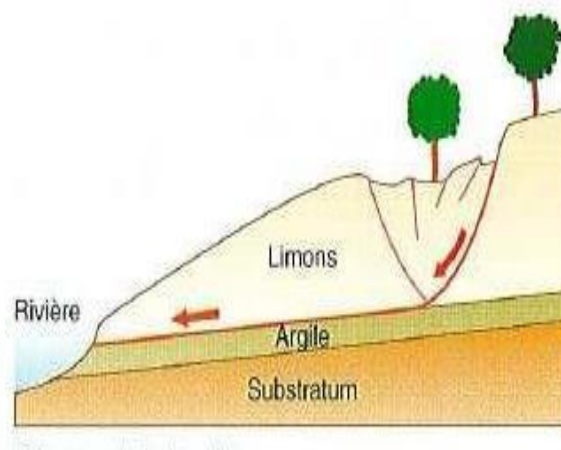


Figure I.16. Représentation du phénomène de glissement de terrain

I.12.3. Le phénomène de tassement

Le tassement du sol est sa déformation verticale due à l'application des contraintes extérieures telles que les remblais, les fondations ou son propre poids.

Les tassements peuvent être uniformes ou différents d'un point à l'autre selon la nature du sol en place [COSTET. et al., 1981] .

Le tassement uniforme : les tassements uniformément repartis affectent peu la structure les mouvements qui en résultent peuvent cependant endommager les services et accessoires tels les conduites d'eau et les passages souterrains.

Le tassement différentiel : est un mouvement d'enfoncement du sol qui n'est pas uniforme. Il peut de ce fait provoquer des dislocations des maçonneries comme l'apparition de fissures. C'est un grave facteur de désordre qui est la plupart du temps irrémédiable.

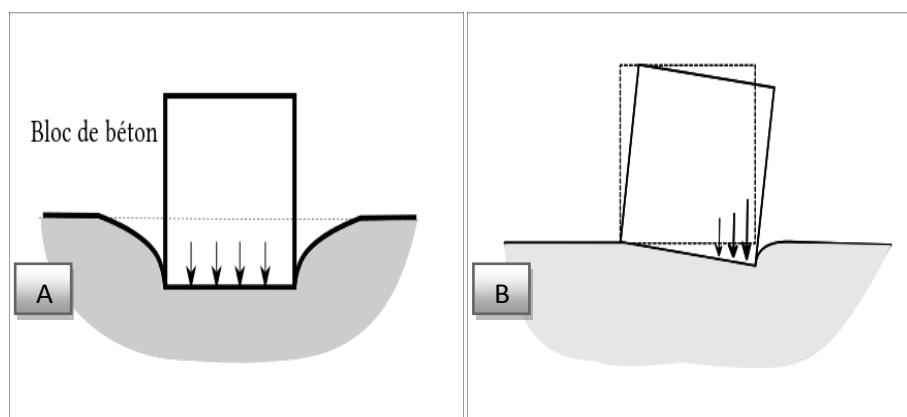


Figure I.17. (A) : Tassement uniforme, (B) : Tassement différentiel



Figure I.18. Tassement différentiel

I.12.4. Érosion des sols

L'érosion se définit comme un déplacement de sol attribuable à l'action érosive de l'eau, qui entraîne un apport récurrent de sédiments, même en faible quantité, dans le réseau hydrographique situé sur ou en bordure immédiate des parterres de coupe ou du tronçon de route faisant l'objet de l'évaluation. Il doit être récurrent, c'est-à-dire qu'il doit se répéter dans le temps lors des averses de pluie ou de la fonte des neiges. Il peut être direct ou indirect, via le réseau routier ou le drainage naturel.



Figure I.19. Érosion de sol

I.13. Les conséquences dues aux problèmes des sols argileux

Les phénomènes précédents peuvent entraîner des désordres que sa soit sur les structures ou sur les routes.

I.13.1. Cas des bâtiments

Pour les structures de génie civil, on peut observer les désordres suivants :

- fissuration déstructives ;
- distorsion découvertures ;
- rupture des canalisations ;
- décollement des bâtiments.

I.13.2. Cas des chaussées

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Ce phénomène est causé par des variations de la teneur en eau du sous-sol. Il peut être attribué au climat et à la surcharge.

Le désordre subis par la chaussée se résume généralement à des fissures qui apparaissent à la fin de la saison sèche sur ses accotements.

En saison de pluie, ces fissures permettent à l'eau de s'infiltrer plus facilement entraînant la saturation de ces zones et par conséquent leur gonflement, engendrant ainsi l'apparition de déformation à la surface de la chaussée, puis l'apparition de fissures longitudinales qui peuvent être assimilées à la chute de la portance dans les zones latérales de la chaussée entraînant l'affaissement des bords. Ces phénomènes sont accélérés par le flux routier. Ces désordres s'amplifient avec le début de la saison sèche.



Figure I.20. Déformation d'une chaussée

I.13.3. Cas des ouvrages souterrains

Les ouvrages souterrains sujets au gonflement les plus communément répandus sont :

- les tunnels ;
- les puits pétroliers ;
- les cavités de stockage des déchets radioactifs ;
- les monuments historiques.

I.13.3.1. Cas des tunnels

Les tunnels dans un milieu gonflant, posent de très importantes difficultés et aussi bien lors de leur construction qu'après leur mise en service. Le creusement du tunnel entraîne une modification des contraintes autour de l'ouvrage.

Cette modification engendre souvent l'apparition de fissures facilitant la circulation de l'eau et l'hydratation des minéraux argileux. Cette dernière entraîne le gonflement qui se manifeste par un déplacement de la paroi du tunnel avant la mise en place du revêtement en béton ou par une pression de gonflement après sa mise en place [BELABBACI., 2014].



Figure I.21. Soulèvement puis dislocation du radier d'un tunnel

I.13.3.2. Cas des puits pétroliers

La boue de forage est un mélange complexe de divers produits chimiques. Elle joue un rôle à la fois physique, chimique et mécanique. Ses caractéristiques physiques et chimiques permettent d'assurer une bonne stabilité des parois du puits, de refroidir et de lubrifier l'outil et le train de sonde et de transmettre la puissance hydraulique.

. Les différents mécanismes induisant le gonflement de la roche autour du puits de forage peuvent être résumés comme suit:

- la pression capillaire ;
- la pression osmotique générée entre la boue de forage et l'eau des pores ;
- la pression d'hydratation causée par l'interaction entre les ions de la boue et les surfaces argileuses chargées négativement.
- Les principaux désordres rencontrés sont les suivants:
- l'instabilité et l'élargissement de la paroi du puits de forage ;
- la distorsion des tiges.

I.13.3.3. Cas des monuments historiques

Les monuments historiques peuvent être endommagés par le gonflement du terrain, qui les encaissent ou sur lesquels ils reposent.

Des décollements du toit, des chutes de blocs et l'apparition de fissures, ainsi que l'effondrement des murs, ont été observés au niveau des zones de contact des monuments avec des couches argileuses [BELABBACI., 2014].

I.14. Conclusion

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

Les sols fins et les argiles en particulier, présentent une faible capacité portante en plus des problèmes qu'ils engendrent tels que le gonflement et le tassement, ce qui ne convient pas pour certains ouvrages de génie civil qui exigent une haute portance et une stabilité à long terme.

Pour remédier à ces problèmes des solutions existent, telles que :

- le remplacement du sol par un matériau adéquat ;
- le changement du site de l'ouvrage ;
- l'amélioration de la qualité du sol par traitement chimique ou par renforcement.

Dans le chapitre suivant sont représentées les différentes techniques de traitement des argiles.



Chapitre II

Techniques de traitement des argiles

II.1. Introduction

Le traitement de sol ou la stabilisation chimique des sols est une technique économique qui permet de rendre apte à l'usage des matériaux qui ne l'étaient pas. Cette technique s'inscrit ainsi dans la démarche environnementale du développement durable en préservant les ressources naturelles des produits de carrières, et en valorisant les matériaux du site par leur réutilisation.

Le traitement de sol permet d'améliorer les performances mécaniques (portance), baisser la sensibilité à l'eau et au gel (protection), homogénéiser et valoriser les matériaux de voisinage du chantier.

Dans ce chapitre, sont représentées les différentes techniques de traitement et de stabilisation des sols argileux.

II.2. Les techniques d'amélioration des sols

Les techniques d'amélioration des sols, sont les suivantes :

- les méthodes mécaniques ;
- les méthodes hydromécaniques ;
- les méthodes thermiques ;
- les méthodes chimiques.

II.2.1. Les méthodes mécaniques

Nous citons deux méthodes de stabilisation mécanique :

II.2.1.1. Le compactage dynamique

Le compactage de surface peut être utilisé pour une profondeur maximale de 3m. Au-delà de cette profondeur un autre type de compactage existe connu sous le nom de compactage dynamique profond. C'est un procédé qui consiste à pilonner le sol en surface avec une dame en chute libre (Figure II.1). L'énergie transmise par chaque impact pénètre dans le sol et produit une déstructuration.

Au bout de quelques jours ou semaines, une restructuration s'opère qui aboutit à des caractéristiques de portance améliorées. Le procédé s'applique aux sols sablo-graveleux et aux matériaux argilo-limoneux saturés à condition qu'il y ait présence d'air occlus. Son emploi peut être intéressant pour consolider des couches sous l'eau.



Figure II.1. Compactage dynamique d'un sol

II.2.1.2. Le vibro-compactage

Le procédé de vibro compactage, développé à la fin des années trente, permet de compacter localement ou dans la masse, les sols grenus sans cohésion (sables, graviers, cailloux) en place ou mis en remblai au-dessus ou en-dessous de la nappe et ceci jusqu'à des profondeurs maximum de plus de 50 m. C'est une technique d'amélioration des sols pulvérulents de type sablo-graveleux permettant de les densifier sous l'effet de la vibration (Figure II.2).

Ces vibrations, émises par l'outil, se propagent de grains en grains et provoquent un réarrangement optimal du volume initial occupé.

La réduction de la porosité du matériau permet aussi d'augmenter sa capacité portante de manière significative.



Figure II.2. Le vibro-compactage

Ce procédé de vibro compactage est appelé aussi la vibro-flottation. Cette méthode trouve son application dans les sols granulaires particulièrement les sables propres et les sables silteux avec une teneur en fines inférieure à 20%.

Les vibrations engendrent un phénomène localisé de liquéfaction sous l'effet des surpressions interstitielles qui met les grains du sol dans un état liquéfié. Les grains se réarrangent en un état plus dense.

II.2.2. Les méthodes hydromécaniques

II.2.2.1. Le préchargement ou précompression

La précompression nécessite la compression du sol sous une pression appliquée avant l'application des charges. Cette méthode est utilisée sur des terrains dont le tassement va se prolonger durant plusieurs années.

On applique généralement ces méthodes sur des mauvais terrains de composition principalement argileuse. Le principe consiste à surcharger le terrain afin qu'il se tasse naturellement. Le préchargement des sols s'opère selon les mêmes principes dans le cas des sols fins ou grenus.

Le mode de réalisation est le même, mais la perméabilité élevée des sols grenus permet d'obtenir l'amélioration souhaitée dans des délais beaucoup plus brefs que les sols fins et surtout argileux.

Les effets bénéfiques de ce procédé incluent une augmentation considérable de la capacité de portance par la réduction des pressions interstitielles excessives et de plus la réduction de la compressibilité des sols mous par l'accélération de la consolidation.

II.2.2.2. L'accélération de la consolidation par l'installation des drains verticaux

Les drains verticaux peuvent donc être utilisés dans beaucoup de cas pour accélérer le taux du tassement de la consolidation primaire à l'intérieur de la zone préchargée avec ou sans la surcharge ajoutée.

Ce procédé est inefficace dans les sols tels que les argiles très organiques et les tourbes où leur comportement de tassement est beaucoup plus dominé par la compression secondaire. Les drains verticaux permettent donc au drainage de s'effectuer horizontalement et verticalement.



Figure II.3. Installation des drains verticaux

Durant les années 1980, les drains verticaux sont constitués généralement de sable réalisés par différents procédés tels que le battage et le vibro-fonçage.

À partir des années 1980, une nouvelle génération de drains qui sont les drains préfabriqués en forme de bande a fait son apparition. La part de ces drains a augmenté de façon très rapide.

II.2.3. Les méthodes thermiques

II.2.3.1. La déshydratation

La déshydratation par la chaleur est très rarement appliquée en géotechnique, elle permet de durcir certaines argiles par exemple.

En pratique, la méthode consiste à brûler un carburant dans un forage en utilisant un forage voisin communiquant avec le premier et servant de cheminée de tirage.

II.2.3.2. La congélation

La congélation des terrains instables est un procédé ancien à caractère provisoire, employé pour le creusement des fouilles de puits ou de galeries. Cette technique rend le sol étanche et résistant provisoirement.

Ce procédé est généralement développé pour les sols grenus mais il peut être appliqué aux argiles molles et aux limons. La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé.

Les techniques de congélation utilisées sont basées sur la circulation d'un fluide froid dans des tubes enfoncés dans le massif de sol. Une saturation complète du sol est souhaitée. La congélation du sol s'effectue d'habitude en deux étapes à savoir les étapes active et passive de congélation. L'étape active est la plus importante et l'appareillage de réfrigération marche avec sa grande capacité que durant l'étape passive nécessaire pour maintenir l'épaisseur du front de gel contre le dégel.

II.2.4. Les méthodes chimiques

La stabilisation chimique est une technique intéressante pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux. Aujourd'hui les divers produits et techniques font partie d'une pratique courante des grands ouvrages du Génie Civil à l'échelle mondiale.

Le recours massif à cette technique qui valorise les matériaux en place ce qui entraîne une diminution notable des coûts est due principalement aux facteurs suivants tels que la raréfaction des gisements naturels de matériaux nobles, le souci écologique croissant imposant de préserver d'une part les ressources naturelles existantes et délimiter d'autre part la mise en dépôt des matériaux impropres à la réutilisation en remblais ou en couches de forme. Les ajouts cimentaires et les produits chimiques les plus utilisés sont le ciment, la chaux, les cendres volantes. L'objectif principal du malaxage des ajouts cimentaires avec le sol est l'amélioration de ses propriétés physico-mécaniques ainsi que sa durabilité.

Les différentes propriétés qui peuvent être améliorées sont la résistance, la plasticité, la compressibilité, la perméabilité, le potentiel de gonflement et le potentiel d'effondrement.

L'amélioration de ces propriétés s'effectue soit par l'augmentation de certaines d'entre elles telle que la résistance, soit par la réduction d'autres telles que la plasticité, la perméabilité et l'érosion. Un bon malaxage des ajouts cimentaires avec le sol à traiter est un facteur important affectant d'une façon significative la qualité des résultats.

II.3. Le choix de traitement du sol

Le choix d'une technique de traitement de sol dépend des objectifs de modification du comportement et/ou d'état du sol visé en fonction du type d'ouvrage réalisé. En dehors de considérations économiques, tout choix de solution devra tenir compte des facteurs suivants :

- le type d'ouvrage réalisé (ou les types d'efforts à reprendre) ;
- le type de sol concerné ;
- la profondeur du sol concernée ;

- les impacts sur l'environnement et les constructions avoisinantes.

Les traitements de sols peuvent concerner une épaisseur de sol plus ou moins importante. On considérera qu'il s'agit d'un traitement :

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

II.4. Le principe de choix d'une solution de traitement

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

- la granulométrie du sol ;
- la profondeur de traitement ;
- le type d'ouvrage réalisé sur la zone traitée.

II.5. Les produits de traitement

Les produits de traitement les plus utilisés sont les chaux aériennes, principalement calciques, et les liants hydrauliques.

II.5.1. La chaux aérienne

La chaux est qualifiée d'aérienne car à la suite de la décarbonatation du calcaire pur aux environs de 900°C, il se forme une chaux dite vive qui, après hydratation, est capable, en atmosphère humide, de fixer le gaz carbonique de l'air pour redonner du calcaire. On parle du cycle de la chaux aérienne.



Selon la composition du calcaire d'origine, on distingue la chaux calcique, issue de carbonate de calcium, de la chaux magnésienne, issue du carbonate mixte de calcium et de magnésium. La chaux calcique est très réactive au contact de l'eau, contrairement à la chaux magnésienne dont l'oxyde de magnésium s'hydrate très lentement, ce qui peut générer des gonflements différés dans le matériau traité. Pour cette raison, c'est la chaux aérienne calcique qui est la plus couramment utilisée en traitement des sols.



Figure II.4. La chaux aérienne

II.5.2. Les liants hydrauliques

Un liant hydraulique est un mélange réalisé après broyage de plusieurs constituants. On distingue :

- les constituants principaux tels que le clinker « K », le laitier granulé de haut fourneau « S », les pouzzolanes naturelles « P », les cendres volantes silico-alumineuses «V», les schistes calcinés (T), le calcaire (L), et dans certains cas la chaux ;
- les constituants secondaires tels que le sulfate de calcium sous forme de gypse ou d'anhydrite ;
- des ajouts éventuels destinés à conférer des propriétés spécifiques.

II.5.3. Les ciments

En fonction de leur composition, les ciments courants sont subdivisés en cinq types : CEM I (ciments Portland) ; CEM II (Ciment Portland composé) ; CEM III (ciment de haut fourneau); CEM IV (ciment pouzzolanique) ; CEM V (ciment composé).

Depuis le 1 avril 2002, les ciments courants doivent être conformes à la norme NF EN 197-1 et font l'objet d'un double marquage CE et NF sur les sacs ou sur les documents d'accompagnement pour le vrac.

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance (32,5 – 42,5 – 52,5) définies par la valeur minimale de la résistance du ciment à 28 jours en MPa (selon NF EN 196-1). Pour chacune de ces classes, deux désignations sont établies en fonction de leur résistance à court terme (2 jours et 7 jours).

II.5.4. Les liants hydrauliques routiers (LHR)

Dès la fin des années quatre-vingt, les sociétés cimentières françaises ont mis au point des liants hydrauliques, distincts des ciments courants, dédiés au traitement des matériaux. Ces produits appelés liants hydrauliques routiers se sont depuis beaucoup développés. Le GTS les désigne aussi sous l'acronyme LSR (Liant Spécial Routier) et la norme NF EN 13282 sous l'acronyme HRB (Hydraulic Road Binder).

Les LHR répondent essentiellement à trois objectifs :

- technique (des délais de maniabilité adaptés) ;
- économique ;
- environnemental (impacts de fabrication plus faibles).

La gamme des liants hydrauliques routiers a été progressivement enrichie pour prendre en compte les besoins spécifiques des chantiers tels que le traitement de sols argilo-limoneux, des graves et des sables, des matériaux carbonatés (craie...) mais également des travaux réalisés à des périodes particulières (température basse ou élevée) ou demandant l'obtention d'une portance rapide.



Figure II.5. Application des liants hydrauliques routiers

II.6. Action des liants

L'action des liants sur le sol dépend de :

- la nature du sol ;
- la nature de la composition du liant et de son dosage ;
- la compacité atteinte à la mise en œuvre ;
- l'âge du mélange ;

- des sollicitations extérieures (infiltration d'eau, température, vibrations...).

II.6.1. L'amélioration

C'est une opération qui consiste à améliorer par addition d'un liant, les propriétés physiques du sol telles que la teneur en eau naturelle, la plasticité, la sensibilité à l'eau, au gel, et l'aptitude au compactage.

L'amélioration d'un matériau est recherchée pour une action à court terme, afin de permettre la traficabilité et la mise en œuvre.

II.6.2. La stabilisation

C'est une opération consistant à modifier (généralement à moyen ou long terme) les caractéristiques du sol de manière à l'amener dans un état définitif de stabilité, en particulier vis-à-vis de l'action de l'eau et du gel, et à lui donner une résistance durable pouvant, le cas échéant, être mesurée par des essais typiques de matériaux solides.

La stabilisation d'un matériau est recherchée pour une action à long terme et est intégrée dans le dimensionnement de la partie d'ouvrage considérée.

II.7. Techniques de réalisation

II.7.1. Technique courante

Le traitement appliqué à la réutilisation des sols sensibles à l'eau trop humides est quasiment toujours réalisé par traitement « en place ». La technique courante consiste à épandre la masse de produit de traitement, calculée pour l'épaisseur de sol malaxée prévue, à la mélanger avec le sol, le plus souvent à l'aide de charrues (à disques ou à socs), jusqu'à obtention d'une mouture présentant de visu un aspect homogène.

Ensuite, suivant les cas, soit on charge et transporte le mélange à son lieu de mise en œuvre (traitement au déblai), soit on le compacte directement après malaxage (traitement au remblai).

II.7.2. Mélange par la technique dite du dépôt reprise

Cette technique permet de mélanger des sols comportant des éléments blocailleux de $D_{max} > 250$ à 350 mm (valeur considérée comme limite pratique pour le malaxage avec des charrues). Elle est réservée toutefois quasi exclusivement au traitement à la chaux car incompatible en principe avec le phénomène de prise hydraulique.

La quantité de produit de traitement correspondant au dosage choisi, calculée pour l'épaisseur de la couche qu'il est prévu d'extraire est épanchée sur le sol. L'ensemble constitué par le matériau de cette couche et le produit de traitement épanché est chargé, transporté puis mis en dépôt provisoire. Celui-ci est profilé et légèrement compacté pour minimiser les entrées d'eaux pluviales. Au moment voulu (qui peut être plusieurs jours, semaines, voire plusieurs mois plus tard), le dépôt est repris, en extraction frontale, pour réaliser le remblai.

Cette technique améliore l'homogénéité du sol du déblai (en nature et en état) en même temps qu'elle réalise un mélange de qualité généralement suffisante pour une mise en remblai, et ceci, sans utiliser de matériel de malaxage spécifique. Elle est cependant propice aux émissions de poussières de produit de traitement, notamment durant les séquences d'épandage et de chargement.

II.7.3. Traitement dans le déblai ou sur le remblai

L'intérêt de traiter dans le déblai est de tirer profit des manipulations que l'on fait subir au sol au cours des phases successives de chargement, déchargement, régalaie, etc., pour améliorer l'homogénéité du mélange sol-chaux et pour produire l'assèchement maximal en conditions météorologiques évaporantes. En procédant ainsi, on améliore également la traficabilité des engins dans le déblai.

Un autre Intérêt est de limiter, le cas échéant, la diffusion des poussières de produit de traitement en confinant le chantier de traitement à l'Intérieur des talus du déblai.

L'intérêt d'exécuter le traitement sur le remblai est de pouvoir minimiser les quantités de matériaux à traiter. En effet, en opérant au stade ultime de la mise en œuvre, il est possible de sélectionner les zones exigeant réellement un traitement à partir de l'observation du comportement du sol (ornières de plus de 10 à 15 cm sous les roues des engins de transport) ou à partir de mesures (portance à la plaque ou à la dynaplaque, IPI ou teneur en eau du sol).

II.8. Les étapes de traitement des sols

II.8.1. Identification du sol

Les études géotechniques permettant la classification des matériaux et leur réutilisation s'appuient sur une reconnaissance générale des sols destinés à être traités et sur la formulation des mélanges. Elle comprend:

- l'identification à partir des paramètres de sol ;
- la localisation dans le profil géotechnique ;

- l'estimation de leur quantité.

Les éléments considérés pour définir le contenu d'une étude de traitement sont :

- la collecte des données (cartes géologiques, sondages de reconnaissance) ;
- le recueil d'expertise locale (notamment la présence d'éléments perturbateurs) ;
- la caractérisation du gisement et la constitution d'échantillons représentatifs (mélanges) ;
- l'identification du produit de traitement ;
- l'organisation et la conduite d'un chantier expérimental si nécessaire.

La caractérisation du gisement permet de fournir un échantillon représentatif du matériau. Un zonage (repérage) de chaque formation est défini sur le profil géotechnique ainsi que les plages de variation des paramètres de nature et d'état des sols. La dispersion des caractéristiques du matériau de chaque zone donne une indication de l'hétérogénéité des sols de la zone.

II.8.2. Études de la formulation

Ce sont les études qui déterminent la nature du produit de traitement et son dosage. Le dosage se calcule notamment en fonction des performances visées selon la formule suivante :

$$d = \frac{Q}{M_{sol} + Q + M_{cg}} \times 100 \quad (\text{II.1})$$

avec :

- d : dosage (en %)
- Q : la masse produite du traitement
- M_{sol} : masse du sol traité
- M_{cg} : la masse correctrice granulométrique

Le calcul du besoin en liant (en tonnes de liant), se fait selon la formule suivante :

$$Q = e \times S \times \rho_d \times \frac{d}{d-100} \quad (\text{II.2})$$

avec:

- e : épaisseur du sol traité
- S : surface du sol traité
- ρ_d : la masse volumique sèche du sol
- d : dosage du liant

Les études comprennent l'essai d'aptitude du sol au traitement :

- gonflement volumique ;
- résistance en compression diamétrale.

Selon le résultat et les valeurs de référence, le produit est dit : adapté, douteux, ou inadapté.

II.8.3. La mise en œuvre du sol traité

Les opérations courantes principales concernent la préparation du sol (scarification, humidification) l'épandage du produit, le malaxage, l'ajustement de l'état hydrique (arrosage), le réglage, et enfin le compactage.

- La préparation du sol
 - ✓ la décohesion du matériau par foisonnement ;
 - ✓ l'élimination de la fraction grossière : scarification, criblage, concassage ;
 - ✓ l'homogénéisation du matériau par tri (chargement et dépôt) ;
 - ✓ l'humidification (changement de l'état hydrique).
- Epandage du produit (épandeur pondéral ou volumétrique asservi à la vitesse).
- Malaxage : mélange sol et produit pour obtention mouture.
- Ajustement de l'état hydrique : arrosage si après malaxage le mélange est trop sec pour être compacté de manière conforme. En effet, cet état a une incidence sur les exigences de compacité et de prise du liant. L'augmentation de teneur en eau doit cependant rester limitée, en général de 1 à 2%.
- Réglage : il s'agit du nivellement du matériau traité à l'épaisseur conforme.
- Le compactage : opération visant à atteindre l'objectif de densification exprimé par la masse volumique sèche à obtenir pour une teneur en eau à l'optimum OPN.

II.8.4. Contrôle de qualité des travaux

Le contrôle de qualité des travaux de traitement des sols appliqué à la réutilisation en remblai des sols très humides, a pour objet de vérifier les seuils minimales et maximales des paramètres fixés pour atteindre la qualité visée, toute en garantissant un aspect économique des opérations de traitement. Après la mise en œuvre, le matériau doit respecter des caractéristiques de portance minimales et maximales. Ces valeurs de portance peuvent être exprimées :

- soit de préférence par des valeurs de module à la plaque ou à la dynaplaque mesurées sur le matériau ;

- soit par des valeurs d'IPI mesurées directement in situ ou au laboratoire sur des échantillons de sol traité prélevés avant compactage ;
- soit par une valeur maximale de la profondeur d'ornière observée sous le passage des engins de transport chargés (décapeuses, tombereaux, etc.) roulant sur le matériau.

II.9. La méthode d'utilisation de la chaux dans le traitement du sol

Les étapes de traitement peuvent se présenter dans un ordre différent suivant qu'il s'agit de traiter le sol en place, ou que l'on prévoit des mouvements de terre avant ou après le traitement. On distingue les étapes principales suivantes :

II.9.1. La préparation du sol à traiter

Cette opération, visant à faciliter le malaxage ultérieur, consiste : soit d'éliminer de gros éléments susceptibles d'entraver le malaxage, soit de permettre la modification de l'état hydrique du sol par aération ou humidification.

L'exécution de cette opération, qui n'est pas toujours nécessaire, s'effectue à l'aide d'un ripper, d'une herse ou d'une charrue.

II.9.2. L'épandage

La technique de l'épandage "au sac" sur des plate-formes préalablement quadrillées peut être envisagée pour des chantiers de surface très limitée ($< 250 \text{ m}^2$) ou de géométrie complexe.

Dans les autres cas, la répartition de la chaux est réalisée à l'aide d'un épandeur à dosage pondéral, équipé en général d'un dispositif asservi à la vitesse du véhicule.

L'épandage de chaux doit être réalisé avec un maximum de précision et de régularité. La chaux est chargée pneumatiquement dans l'épandeur, soit directement à partir de la citerne de transport, soit via des silos-tampons installés.



Figure II.6. Épandage de la chaux

II.9.3. Le malaxage

Cette opération a pour but de faire foisonner le sol, et d'y incorporer la chaux de façon homogène. En fonction de la nature du sol, de la taille et du type de chantier, il est exécuté à l'aide de pulvimixeurs, de rotobêches, de charrues à disques ou à socs. Pour les chantiers de faible importance, du matériel de type agricole peut être utilisé.

Sur sites sensibles au niveau des poussières, il est recommandé d'utiliser des malaxeurs.



Figure II.7. (A) : Le pulvimalaxeur, (B) : La manière de malaxer le sol

II.9.4. Le réglage

Le réglage définitif doit se faire par rabotage sur toute la largeur à régler et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écrêtage des bosses. Il se fait le plus souvent à la niveleuse.

Les matériaux provenant du rabotage doivent être évacués. L'épaisseur à raboter doit être prise en compte au stade du traitement, en prévoyant une surépaisseur suffisante du matériau traité (environ 3cm).

II.9.5. Le compactage

Il doit être réalisé immédiatement après le réglage final, dans tous les cas, avant expiration du délai de maniabilité du mélange sol- chaux, pour apporter le complément de l'énergie exigée pour obtenir la qualité de compactage recherchée suivant la couche considérée.

II.9.6. La protection de surface

Cette protection superficielle (en général, un enduit gravillonné à l'émulsion de bitume) est destinée à imperméabiliser et à protéger la couche traitée des intempéries, de l'évaporation de l'eau et du trafic. Elle doit être réalisée dans les plus brefs délais après la fin du compactage final.

II.10. Matériels de traitement

Suivant les chantiers, les travaux de traitement des sols peuvent nécessiter des ateliers comprenant tout ou une partie des matériels suivants :

- matériels de stockage des produits de traitement ;
- matériels d'épandage ;
- matériels de préparation des sols ;
- matériels de malaxage des sols en place ;
- matériels d'arrosage ;
- centrales de fabrication ;
- matériels de compactage ;
- matériels de réglage et de protection superficielle.

II.11. Les problèmes à rencontrer lors des opérations de traitement des sols

II.11.1. Le froid et le gel

La prise et le durcissement des matériaux traités par des liants hydrauliques, sont déterminés par la température de conservation de ces matériaux. Mais des exigences économiques conduisent souvent à poursuivre les travaux de terrassement, en arrière-saison.

Pour les travaux en période froide, dite « arrière-saison », deux situations vont se présenter :

- la température moyenne faible (entre quelques degrés et 20°C) agissant sur la cinétique des liants hydrauliques, conduisant alors à définir différemment les périodes d'ouverture au trafic du chantier, dans le cas des sols traités ou les résistances aux jeunes âges. Notons, qu'il a été confirmé qu'hors période de gel, un "matériau traité d'hiver" est plus résistant en final, qu'un "matériau traité d'été" ;
- la température négative définissant une période de gel pouvant agir, soit par gélifraction détruisant le matériau traité, soit par gonflement par cryosuccion (phénomène de remontée d'eau liquide vers la zone gelée) de ce matériau ou du sol support de ce matériau, si celui-ci est sensible au gel. Cette situation conduit alors à une augmentation des émiettements de la couche de forme traitée. Les dégâts provoqués par le gel vont dépendre :
 - ✓ du taux d'humidité du sol traité ;
 - ✓ de sa résistance mécanique au moment de l'arrivée du gel ;
 - ✓ de la nature de son réseau poreux.

II.11.2. La présence d'éléments néfastes à la prise hydraulique

II.11.2.1. Les sulfates

Les sols peuvent contenir des quantités variables de sulfate qui peuvent entraîner dans certaines conditions (taux de sulfate, solubilité du sulfate, répartition dans le sol) des gonflements par formation d'ettringite. Les minéraux de sulfure s'oxydent et réagissent avec d'autres minéraux contenus dans le sol pour former des sulfates. Cette transformation induit une augmentation du volume en raison des variations dans la structure atomique en plus de l'adjonction d'eau à la structure minérale. Cependant, dans certains cas, la stabilisation peut se faire en augmentant la concentration en sulfates.

II.11.2.2. Les matières organiques

Les sols ou argiles sont susceptibles de contenir des matières organiques constituées de micro-organismes et de déchets végétaux en état de décomposition. Les matières organiques sont surtout présentes à la surface. Elles ont des compositions variées, mais sont surtout les acides humiques (acides provenant des décompositions de matière organique à la surface du sol) qui sont néfastes, car ils retardent ou annulent la prise des liants (réactions chimiques qui atténuent l'acidité du sol) et diminuent les résistances mécaniques du sol. Le traitement peut même devenir impossible si la concentration de ces acides est trop forte.

II.11.3. Le problème du climat par rapport à la cinétique de durcissement

La température réelle moyenne rencontrée dans les sols à traiter est de l'ordre de 10°C. Elle reflète plus exactement les conditions normales au cœur d'un sol hors période de canicule ou de gel. Il apparaît que la rapidité de la prise de la chaux et du liant empêche parfois d'atteindre la densité spécifiée pour le matériau.

II.11.4. Les émissions de poussière

L'utilisation de tels produits, pulvérulents, pour le traitement de sols implique l'émission de poussière de chaux et/ou poussière de liant hydraulique pendant le traitement pendant l'épandage aussi bien que pendant le fait de labourer. En présence de vent, il est possible d'observer le déplacement du produit de traitement par le vent plus de 20 à 30 mètres de la région de site. Ces poussières sont tout aussi néfastes pour l'environnement que pour l'homme. Ainsi, quand ce type de poussière se dépose sur des substances humides ou sur n'importe quel corps de vie sans protection, le résultat est une augmentation soudaine du pH (en cas de la chaux en particulier) ou de l'adhésion du produit sur ces corps. Les émissions de poussière susmentionnées peuvent alors être agressives à l'environnement, sans oublier l'effet de corrosion qu'il apporte, (coût économique dans un environnement urbain par exemple).

II.12. Les nouveaux produits qui rentrent dans la composition des liants

II.12.1. Les cendres volantes

Les cendres volantes sont déjà employées dans la composition des liants hydrauliques et dans les processus de stabilisation des sols. Les intérêts apportés par l'utilisation de cendres sont nombreux, par exemple on peut citer amélioration de la résistance aux sulfates ou réduction de la diffusion du chlore. Cependant les études menées jusqu'à présent n'ont pas permis de déterminer parfaitement leurs caractéristiques, et leur réaction avec les différents sols.

Les cendres volantes sont un sous-produit des centrales thermiques qui brûlent le charbon en poudre. L'emploi des cendres volantes en grandes quantités pourraient s'avérer très intéressant économiquement.



Figure II.8. Application des cendres volantes sur une route

II.12.2. La poudre de verre

Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile et transparent à la lumière visible, à base d'oxyde de silicium (silice SiO_2 , le constituant principal du sable) et de fondants. Du point de vue physique, le verre est un matériau amorphe (c'est-à-dire non cristallin) présentant le phénomène de transition vitreuse. En dessous de sa température de transition vitreuse, qui varie fortement avec la composition du verre (plus de 1000°C pour la silice vitreuse, moins de 40°C pour le sélénium amorphe), le verre se présente à l'état vitreux. La poudre de verre peut être considérée en tant que source alternative de matière pouzzolanique car elle dispose de propriétés chimiques (oxyde de silice SiO_2) et physiques (structure amorphe) compatibles pour l'activation alcaline en stabilisation des sols.



Figure II.9. Poudre de verre

II.12.3. Les déchets industriels

Les déchets industriels sont employés pour la fabrication des liants hydrauliques dans le même but que la plupart des ajouts : valorisation de matériaux et développement durable. Il existe deux types de déchets qui sont prometteurs en raison de leur qualité pour le traitement des sols. En premier lieu, de la poudre de tuiles broyées et ensuite, de la poudre de caoutchouc.

- la poudre de tuiles broyées, (crushed tile dust (CTD) est un produit qui pourrait être utilisé en remplacement du ciment Portland selon différentes quantités;
- la poudre de caoutchouc broyé, pourrait être très intéressante dans la composition de produits pulvérulents de traitement des sols. En effet elle présente de bonnes caractéristiques mécaniques qui permettent de garantir une haute rigidité du sol traité.

II.12.4. Mélange chaux-fibres de polypropylène et laitiers moulus associés à la chaux

L'amélioration la plus faible est obtenue avec le mélange chaux-fibre. Les auteurs l'attribuent à la présence des fibres qui diminuent la rigidité du sol traité. Le module du sol naturel ou celui du sol traité chaux-fibre, diminue quand on augmente la teneur en eau du compactage. Le sol traité au laitier, a un comportement « non plastique », ce qui signifie que ce traitement à un effet significatif sur l'accroissement des modules.

II.12.5. Poudre de diabase associé au ciment

L'emploi du mélange poudre de diabase-ciment ne modifie pratiquement pas les caractéristiques de compactage, tout en augmentant fortement l'indice CBR. La perméabilité reste stable, par rapport au matériau initial.



Figure II.10. Poudre de diabase

II.12.6. La coquille d'œuf calcinée

La coquille d'œuf est un biominéral naturel composé d'un réseau de fibres protéiques associé à des cristaux de carbonate de calcium (96% du poids de la coquille) de carbonate de magnésium (1%) et de phosphate de calcium (1%), ainsi que des substances organiques et l'eau. Le carbonate de calcium (CaCO_3), le constituant majeur de la coquille, est un cristal amorphe qui se produit naturellement sous forme de calcite (cristal hexagonal) [AMANTE E. et al., 2013].

Les coquilles d'œufs ont largement été utilisées comme catalyseur efficace dans la conversion de l'huile de soja et alcool méthylique dans la production de biodiesel. En analysant différentes conditions de processus, [LI B. et al., 2009] a conclu que CaO était la phase active de la coquille d'œuf dérivée. L'utilisation de la coquille comme source alternative de CaCO_3 (carbonate de calcium) peut réduire l'impact sur les réserves naturelles de calcaire, une source naturelle non renouvelable. [AMU O. et al., 2005] a effectué une étude comparative entre l'effet de chaux et la poudre d'œuf sur le gonflement d'une argile, la quantité de chaux était remplacée partiellement par la poudre d'œuf, a montré que la chaux reste la plus efficace mais la poudre a réussi à réduire le gonflement et augmenter la résistance au cisaillement.



Figure II.11. Coquilles d'œuf

II.13. Avantages du traitement des sols

Le traitement des sols en place est une technique qui présente trois types d'avantages : techniques, économiques, écologiques / environnementaux.

II.13.1. Avantages techniques

Le traitement des sols en place, permet la réalisation en remblais et en couches de forme, d'une couche traitée homogène, stable et durable, qui possède des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'une grave-ciment ou grave hydraulique. De plus, grâce à la rigidité du nouveau matériau, cette technique assure une bonne répartition des charges sur le support. Généralement, elle assure un bon comportement par temps chaud. On ne constate ni déformation, niorniérage, et la structure se comporte bien, vis-à-vis des cycles de gel-dégel, grâce à sa rigidité et à l'effet de dalle induit. Enfin, cette procédure de traitement, est une technique dont la facilité d'adaptation aux contraintes d'exploitation, reste des plus faciles.

II.13.2. Avantages économiques

La réutilisation des matériaux en place, est un facteur d'économie important, puisqu'il réduit au minimum les déblais, issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût des différents transports.

II.13.3. Avantages écologiques et environnementaux

Le traitement permet une importante économie d'énergie globale, par la diminution des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge et donc une diminution des impacts indirects, des désagréments à l'usager et aux riverains ainsi qu'une faible détérioration du réseau routier adjacent au chantier. La réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières, ballastières), ressources naturelles non renouvelables. Ce qui permet de préserver l'environnement.

II.14. Conclusion

La composition des sols étant extrêmement variable, il est nécessaire de redéfinir à chaque fois les caractéristiques géologiques pour faire le choix du traitement à privilégier et du dosage à appliquer.

De nombreuses recherches sont actuellement en cours, avec comme objectifs d'élargir la gamme de sols pouvant être traités. Pour cela, de nouvelles méthodes de réalisation et l'emploi de différents éléments sont testés, en particulier des matériaux à valoriser.

L'ajout de granulats de pneus usés pour un sol est l'une des techniques de traitement des sols. Les composants, le cycle de recyclage, la valorisation des pneus seront exposés dans le chapitre III suivant.



Chapitre III

Valorisation de pneus usés

III.1. Introduction

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

Dans l'objectif de préserver l'environnement devant l'agressivité des déchets pneumatiques, il est devenu nécessaire d'étudier les différentes possibilités de les valoriser.

L'utilisation des déchets pneumatiques dans le domaine du génie civil a connu un développement rapide durant les dernières années. Ils ont entièrement remplacé les matériaux de construction traditionnelle, après une valorisation de ses déchets en plusieurs types.

Dans ce chapitre, sont présentées des généralités sur les pneus (les composants chimiques, les caractéristiques mécaniques...), ainsi-que les différents procédés et voies de valorisation.

III.2. Généralités sur les pneus

Un pneu est constitué principalement de caoutchouc et contient également de l'acier (de 16 à 27% en masse selon le type de véhicule). L'ensemble des pneumatiques usagés des véhicules comprend les pneumatiques usagés réutilisables et les pneumatiques usagés non réutilisables.

Le stockage aérien non contrôlé des pneus peut constituer une source de nuisances (esthétique, ou liée au développement de larves, de moustiques, de rongeurs...) et présente des risques potentiels d'incendie et donc de pollution et de sécurité.

La première étape consiste, dans le cadre de la filière d'élimination des pneus usagés, à séparer les pneus usagés réutilisables des pneus usagés non réutilisables.

Les pneus usagés non réutilisables sont valorisés entiers ou sous forme de demi-produits :

- pneus coupés: morceaux supérieurs à 300 mm ;
- déchetetas: pneus découpés en morceaux irréguliers de 50 à 300 mm ;
- granulats: pneus réduits à une granulométrie comprise entre 1 et 10 mm par processus mécanique, cryogénique ou thermique ;
- poudrettes: particules de granulométrie inférieure à 1 mm, obtenue par réduction mécanique, cryogénique ou thermique...


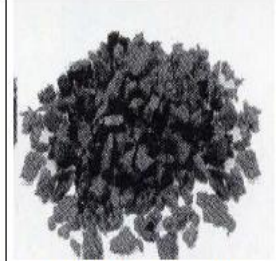


			
Pneus entiers	Pneus déchiquetés Dimension > 50 mm	Pneus déchiquetés Dimension > 50 mm	Granulats 7/15 mm
			
Granulats 2/7 mm	Granulats 0,5/2 mm	Pouquettes 0/0,5 mm	Poudre < 50 µm

Figure III.1. Schéma d'une filière de valorisation matière

III.3. La définition des pneus usés non réutilisables (PUNR)

Il convient de distinguer les pneus usagés et les pneus usagés non rechapables, 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 apparaitre sur les pneus usagés non rechapables telles que l'usure de la bande de roulement, des craquelures ou des fissures. Un pneumatique est déclaré non réutilisable lorsqu'il ne remplit plus sa fonction initiale définie par « la mobilité en toute sécurité ».

III.3.1. Les composants d'un pneu

En effectuant une coupe d'un pneumatique dans le sens transversal comme elle est représentée sur la figure III.2, on peut observer le nombre de constituants, on distingue :

1. La bande de roulement : elle est constituée de caoutchouc synthétique et naturel. Cette surface sculptée garanti un kilométrage important sur un pneu neuf, elle permet une bonne évacuation de l'eau et une bonne adhérence sur les routes. La bande de roulement reliée à la route et au flanc se décompose en trois zones :

- la chape : c'est la partie du pneu qui est la plus en contact avec la route. Elle offre une résistance a l'usure et une stabilité directionnelle ainsi qu'une adhérence sur toutes les surfaces ;

- la nappe : elle se situe sous la chape, elle permet la réduction de la résistance au roulement et l'endommagement de la structure interne du pneu ;
- l'épaule : située aux extrémités de la bande de roulement, cette zone constitue une transition optimale entre la bande de roulement et le flanc du pneu.

2. les nappes ceintures : cette couche se situe juste sous la bande de roulement, elle permet de rouler à vitesse élevée. Elles sont faites d'une corde solide de nylon incrustée dans du caoutchouc. Cette corde s'enroule sur la circonférence du pneu.

3. les bandages d'acier : les bandages d'acier confèrent au pneu sa rigidité ce qui permet :

- d'améliorer le maintien de la forme et de la stabilité directionnelle ;
- de réduire la résistance au roulement ;
- d'augmenter la performance kilométrique du pneu.

4. la nappe textile : cette couche de textile est composée de rayonne caoutchoutée ou de polyester elle permet le contrôle de la pression interne du pneu et permet le maintien de sa forme.

5. le calandrage : qui est une couche étanche faite de caoutchouc butyle qui remplit deux fonctions très importantes :

- rend hermétique la chambre intérieure remplie d'air pour permettre le contrôle de la pression ;
- agit comme un tube interne pour les pneus sans chambre à air d'aujourd'hui.

6. le flanc : c'est la partie latérale du pneu, elle est reliée à la bande de roulement par l'épaule. Elle est constituée de caoutchouc naturel. Le rôle du flanc est de protéger la carcasse des dommages externes et des conditions atmosphériques.

7. la bandelette : constituée de nylon ou d'aramide, qui est une fibre synthétique solide et résistante à la chaleur elle permet :

- d'améliorer la stabilité directionnelle ;
- de faciliter la précision de la réponse en courbe.

8. l'apex : c'est une partie stabilisatrice faite de caoutchouc synthétique, l'apex a les mêmes fonctions que les bandelettes tout en fournissant un confort de direction supplémentaire.

9. la tringle : elle se situe au cœur du talon, la tringle est constituée de fils d'acier incrustés dans du caoutchouc, le cœur garantit une attache sécurisée au bord de la jante.

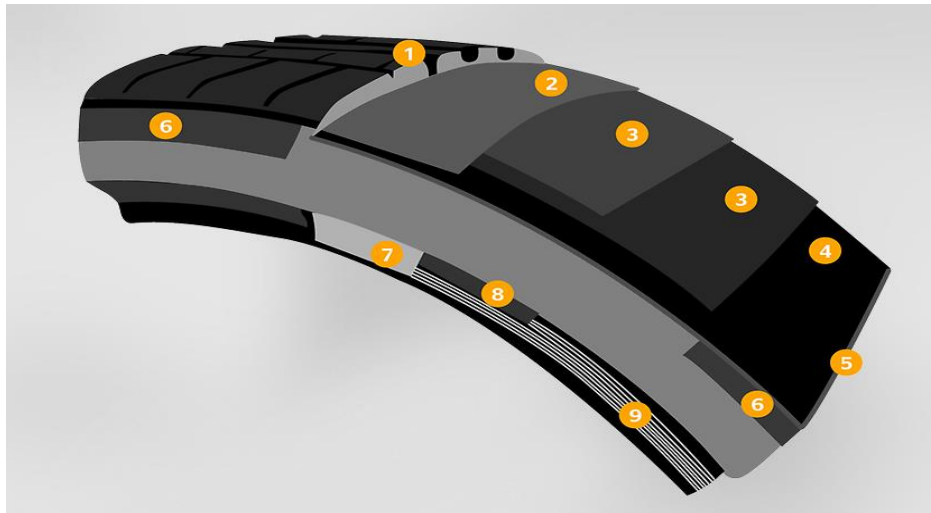


Figure III.2. Coupe d'un pneu

En 2004, ALIAPUR (filiale de valorisation des pneus usés) a défini quatre catégories de PU en fonction de leur poids :

Catégorie A : Poids moyen 6,5 kg (tourisme dont 4x4 tous terrains, enveloppes de secours spéciales ou galettes, camionnettes dont 4x4 tous terrains, petit agricole-agraires roues directrices, motos routières-non routières-trial) ;

Catégorie B : Poids moyen 53 kg (manutention inférieure à 60 kg, poids lourds, remorque agricole) ;

Catégorie C : Poids moyen 77 kg (pneumatiques agraires roues motrices, travaux publics, manutention comprise entre 60 et 200 kg) ;

Catégorie D : Poids moyen 365 kg (génie civil, manutention supérieures à 200 kg).

III.3.2. Les composants chimiques d'un pneu

Un pneu se compose d'un mélange à la base de caoutchouc naturel ou synthétique et un certain nombre de matières auxiliaires.

Le tableau III.1 montre le pourcentage de composants pour les pneus de véhicules légers et poids lourds :

Tableau III.1. Les composants chimiques de pneus légers et lourds

Matériaux	Pneus véhicules légers(%)	Pneus poids lourds(%)
Caoutchouc/ élasto mètre	48	43
Noir de carbone et silice	21.5	21
Métaux	16.5	27
Textiles	5.5	/
Oxyde de zinc	1	2
Soufre	1	1
Autres produits chimiques	7.5	6

III.3.3. Les caractéristiques mécaniques des pneus usagés non réutilisables

Un pneu usé non rechapable conserve encore de nombreuses qualités, ce qui en fait une véritable matière première. Mécaniquement, les armatures du pneu doivent être souples pour lui donner une bonne déformabilité. Elles doivent par ailleurs supporter des efforts de traction importants et posséder une bonne adhérence avec le matériau de remblai.

Des essais mécaniques ont été effectués par des chercheurs dans le domaine du Pneusol sur une presse munie d'un enregistreur d'efforts de traction en fonction de la déformation sur des pneus usagés. À noter que toutes les marques de pneus, ont été testées, les résultats obtenus sont les suivants :

La valeur moyenne de la résistance à la traction des bandes de roulement est de 65 KN, avec un écart type de 24 KN. La probabilité pour que toutes les bandes de roulement, aient une résistance supérieure à 26 KN est de 90 %. Elle n'est que de 80 % pour une résistance supérieure à 36 KN.

Il n'y a pratiquement pas de différence entre les deux flancs d'un même pneu. Les résistances des flancs varient de 17 à 25 KN, selon le taux d'armatures, avec un écart type de 10 KN [LONG N T., 1993].

III.3.4. Critères de durée de service des pneus usagés non réutilisables

Les résultats des travaux de recherches, publiés par de très nombreux chercheurs, ont montré la complexité du phénomène de vieillissement du caoutchouc de pneumatique. Il apparaît que les paramètres influençant cette détérioration, sont nombreux, mais que

finalement leurs actions restent négligeables. On peut néanmoins, en dénombrer quatre très importants.

La lumière et la chaleur : (les rayons Ultra-violet) ont pour effet de provoquer une décomposition superficielle qui se manifeste par un dessèchement du caoutchouc avec apparition de craquelures plus ou moins profondes. Un tel problème ne se pose pas si le pneumatique est complètement enterré car il serait totalement à l'abri de la lumière. En plus, dans un remblai, la température moyenne en profondeur varie dans une fourchette relativement étroite (3 à 4°C) suivant la teneur en eau du matériau. Près de la surface du sol, elle est beaucoup influencée par les variations saisonnières surtout en été. Il reste néanmoins, que la température la plus grande qui serait de l'ordre de 15°C, est beaucoup plus faible que celle subie par le pneu lors de son utilisation [LONG N T., 1993].

L'ozone : le caoutchouc est influencé par l'ozone, mais la présence de ce dernier est faible voire négligeable dans le sol.

L'acidité du sol : on sait qu'un acide fort (PH de l'ordre de 1) détruit le caoutchouc. Or pour l'eau extraite des remblais, le PH est généralement de l'ordre de 4 à 5, ce qui montre qu'en général les sols naturels sont relativement peu acides.

L'eau: [MALEK A. et al., 1986] ont mis en évidence le bon comportement des pneus dans l'eau de mer. Ils ont en effet effectué des analyses poussées sur des échantillons de pneus, se trouvant dans un bateau coulé par les Allemands pendant la seconde guerre mondiale. Quarante-deux ans après, toutes les armatures sont absolument intacts. Leurs caractéristiques mécaniques n'ont pas changé, seule la teneur en eau du caoutchouc, a légèrement changé en quelques points des pneus.

III.4. La poudrette de caoutchouc

Afin d'assimiler les termes utilisés dans l'industrie du pneu, voici un bref historique sur le développement des caoutchoucs naturels et synthétiques. Le caoutchouc naturel provient de plantes diverses, la source la plus importante étant l'arbre à gomme (*Hevea brasiliensis*). Le caoutchouc synthétique, quant à lui, est produit chimiquement à partir de produits pétrochimiques. Les matériaux bruts utilisés dans la fabrication des caoutchoucs synthétiques, sont les suivants:

- isobutylène ;
- isoprène ;
- styrène ;

- butadiène.

La poudrette de caoutchouc est obtenue par broyage de pneus usagés non réutilisables ou de déchets de rechapage. Le broyage peut être mécanique ou cryogénique (fragilisation du caoutchouc à froid). S'il est cryogénique, la poudrette obtenue est de meilleure qualité mais présente un coût plus élevé. La poudrette est utilisée dans la fabrication des revêtements de sols industriels et sportifs, la réalisation de matériaux d'isolation phonique, de membranes anti fissures à usage routier ou de membranes anti vibrations destinées aux plates-formes ferroviaires, de roulettes...

Elle est également employée comme liant dans les bitumes. L'enrobé possède ainsi un pouvoir drainant important évitant le phénomène d'aquaplaning, le bruit de roulage s'en trouve réduit et le processus de vieillissement ralenti.



Figure III.3. La poudrette de caoutchouc

III.4.1. Les caractéristiques de granulats de caoutchouc

D'une manière générale, il est possible de caractériser un granulat de caoutchouc par un certain nombre de propriétés :

- taille de la particule ;
- distribution de taille des particules ;
- morphologie des particules ;
- composition chimique des particules ;
- énergie de surface des particules.



Granulés de 4 à 5mm Granulés de 2 à 4mm Granulés de 0.5 à 2mm Granulés inférieur à 0.5mm

Figure III.4. Les différents diamètres de granulats des pneus usés après broyage

Tableau III.2. La distribution granulométrique pour les trous de filière de Ø 16 mm et Ø20 mm (Technique et procédés KAHL pour le recyclage des pneus usagés).

Ø 16mm	4 à 6 mm ~20%	2 à 4 mm ~20%	0 à 2 mm 55% à 60%
Ø 20mm	4 à 6 mm ~ 25%	2 à 4 mm ~25%	0 à 2 mm 45% à 50%

III.4.2. Transformation de la poudrette de caoutchouc

Aujourd'hui, la recherche technologique dans le domaine du traitement des pneus hors d'usage tend vers une standardisation des méthodes. Les technologies performantes permettant d'effectuer la transformation du pneu au moindre coût seront préconisées. Actuellement, d'études d'impacts environnementaux ont été réalisées au sujet des technologies employées lors du traitement des pneus hors d'usage. Le processus de transformation du pneu en poudrette jusqu'au produit fini se divise en deux étapes, elles sont illustrées comme suit :

- déchetage primaire (grossier) pneu, morceaux, séparation de l'acier et de la fibre ;
- déchetage secondaire (fin) : Morceaux, poudrette, séparation de l'acier et de la fibre.

La transformation primaire consiste à déchiqueter les pneus par des procédés mécaniques. La transformation débute avec un pneu auquel on a préalablement retiré la ceinture d'acier pour ensuite lui faire subir une série d'opérations servant à produire des morceaux de caoutchouc.

III.4.2.1. Déchiquetage primaire

Durant le déchiquetage primaire, les pneus sont broyés en morceaux d'environ 1 pouce x 1 Pouce. Il s'agit de l'étape la plus problématique car le pneu peut contaminer par des pierres, du sable ou des morceaux de métal qui nuiront au bon déroulement de sa transformation. De plus, en raison de sa forme circulaire évidée, le pneu est très flexible et résiste aux coupures infligées par les couteaux. Les méthodes d'extraction des contaminants du pneu sont expliquées dans le tableau suivant :

Tableau III.3. Les méthodes d'extraction des contaminants d'un pneu

Contaminant	Moyens	Pourcentage de libérations des contaminants durant le déchiquetage
Acier	Enlevé par un séparateur électromagnétique durant le procédé de déchiquetage	Libération de 50% à 70% de l'acier lorsque le déchiquetage du caoutchouc est réduit à environ 1 pouce
Fibre	Enlevé avec de l'air sous pression durant le procédé de déchiquetage	Libération de fibre de 0.5 à 0.75 pouce de long lorsque le caoutchouc arrive à une dimension de 0.375 pouce
Saletés	Enlevé par un lavage à l'eau	

Les deux technologies les plus performantes pour effectuer le déchiquetage primaire sont : le déchiquetage à température ambiante et le déchiquetage par cryogénie.

III.4.2.1.1. Déchiquetage à température ambiante

Le déchiquetage à température ambiante produit des morceaux de caoutchouc pouvant contenir un certain pourcentage d'acier et de fibre. Aussi, la friction occasionnée par le déchiquetage contribue à augmenter la température des pneus, ce qui a pour effet de ramollir le caoutchouc qui colle davantage aux couteaux. Conséquences de ces transformations : Une usure prématurée de l'équipement, une demande en puissance accrue et un coût d'opération et d'entretien élevé. La poudrette résultant de ce procédé de découpage sera plutôt de forme allongée et présentera une surface plus régulière. Cette caractéristique contribue à diminuer ses propriétés d'adhérence car moins de facettes sont disponibles pour l'encrage du liant sur la particule de caoutchouc. D'un autre côté, les avantages de cette technologie se trouvent dans la simplicité d'opération du système et dans un coût d'opération relativement moindre.

III.4.2.1.2. Cryogénie

Ce procédé consiste à amener le pneu hors d'usage à une température très basse afin qu'il devienne fragile et friable : le pneu peut atteindre une température oscillant autour de -196°C. Les substances cryogéniques utilisées pour atteindre ces températures sont principalement l'azote liquide et le nitrogène liquide. La cryogénie peut être utilisée à chacune des étapes de réduction des morceaux et des particules de caoutchouc en poudrette. Les pneus entiers sont disposés dans un échangeur d'air, pour ensuite être refroidis au contact de la substance cryogénique. Les quantités requises pour une réfrigération efficace sont d'environ 250 grammes de substance cryogénique pour 500 grammes de caoutchouc. Cette étape provoque une diminution de l'élasticité du pneu, favorisant ainsi sa fragmentation en petits morceaux. On retrouve 3 étapes majeures durant cette transformation :

- refroidissement dans un convoyeur (vis ou réservoir) ;
- déchiquetage mécanique ;
- séparation des sous-produits (fibre, acier, résidus).

Les technologies cryogéniques demeurent encore en développement et sont encore peu utilisées comparativement au déchiquetage à température ambiante. Des recherches sont en cours afin d'utiliser l'air ambiant comme substance cryogénique qui serait refroidi par d'énormes compresseurs. Cette technologie est encore en développement et ne peut actuellement être utilisée dans un contexte industriel.

III.4.2.2. Déchiquetage secondaire

Le déchiquetage secondaire consiste à transformer les morceaux de caoutchouc provenant du déchiquetage primaire. Cette étape permet de diminuer davantage la dimension des morceaux obtenus par le premier déchiquetage afin d'ajuster précisément la granulométrie de la poudrette.

III.4.2.2.1. Déchiquetage à température ambiante

Il s'agit du même procédé utilisé lors du déchiquetage primaire, c'est-à-dire au moyen de couteaux, d'où il est possible d'obtenir des morceaux de caoutchouc ayant une granulométrie plus petite.

III.4.2.2.2. Cryogénie

Il s'agit du même procédé que pour le déchiquetage primaire, la seule différence étant que les morceaux de caoutchouc résultant de l'étape précédente sont réduits à une plus petite

granulométrie. La poudrette issue du procédé de cryogénie contient un taux d'humidité plus élevé, ce qui peut causer des problèmes lors de son utilisation pour le moulage. Un système de contrôle de l'humidité est donc essentiel afin d'assurer une certaine qualité. La capacité de production de ce procédé est d'environ 1000 kilogrammes /heure pour une poudrette de 10 à 20 mailles, et de 600 kilogrammes/heure pour une poudrette de 30 à 40 mailles.

III.5. L'industrie pneumatique

III.5.1. L'industrie pneumatique dans le monde

Dans le monde entier, s'agissant de l'industrie automobile, l'utilisation des pneus en caoutchouc augmente chaque année, en citant quelques cas :

Au Canada, le nombre de pneus usés, est estimé en fonction du nombre de pneus neufs vendus (chaque pneu neuf vendu génère un pneu usé).

La même méthode est utilisée en France sur la base des statistiques de l'office national des statistiques concernant la répartition du parc automobile par genre de véhicules au 31/12/2006 ainsi que les immatriculations des véhicules automobiles durant le premier semestre 2007, le calcul du nombre de véhicules en circulation au premier semestre 2007 par genre.

La France, en 2008, plus de 366.000 tonnes de pneumatiques ont été collectés ce qui constitue une progression de 36% par rapport à 2004 ; la Thaïlande, le bilan de la seule année 2000 indique une consommation d'environ 94.000 tonnes de pneus (SUKONTASUKKUL P., 2006).

Les pneumatiques sont fabriqués selon des procédés relativement standardisées dans environ 455 usines de pneus dans le monde. Il est estimé que, environ 1.5 milliard de pneus sont fabriqués annuellement dans le monde. Actuellement, les 90 usines de l'Union Européen, produisent annuellement environ 355 millions de pneus (24% de la production mondiale)

III.5.2. L'industrie pneumatique en Algérie

Le groupe industriel Iris a mis en exploitation le premier complexe de production des pneumatiques de fabrication algérienne en 2019, il est classé troisième sur le continent africain. L'usine s'étendant sur une superficie de 5,5 hectares, sa production annuelle est estimée à 4,5 millions d'unités par an, et de 400 000 unités/an pour les poids lourds. Le complexe dispose également de 320 points de contrôle, de vérification et d'essai des pneumatiques.

Le parc automobile national Algérien compte 3445129 véhicules qui se répartissent en 60,226 % de véhicules de tourisme, 9,431 % en camions et 20,134 % en camionnettes. Les autocars et autobus représentent 1,605 % du parc. Les tracteurs routiers 1,568 %, les tracteurs agricoles 3,659 %, les remorques 3,012 %, les motos 0,276 % et les véhicules spéciaux 0,089 %. Nous avons classé les pneus usagés non rechapables en trois catégories : Les pneus VL (Véhicules légers), les pneus PL (Poids lourds) et autres. En plus de la différence en dimension entre les pneus VL et PL, la différence de structure est très importante, avec la présence de métal à un taux de 15 % et de 25 % respectivement. Les pneus VL, équipent les véhicules de tourisme et camionnettes avec une moyenne de 4 pneus, le type de pneus PL, équipe les camions, autocars et autobus, tracteurs routiers et les remorques. La moyenne est de 8 pneus pour les camions (un camion peut être équipé de 6 à 12 pneus selon le nombre de ponts), 6 pneus pour les autocars et autobus ainsi que les remorques et de 8 pneus pour les tracteurs routiers (un tracteur routier peut être équipé généralement de 6 à 10 pneus selon le nombre d'essieux). Les tracteurs agricoles, véhicules spéciaux et motos, sont équipés de type de pneu désigné par autres avec une moyenne de 2 pneus pour les motos et 4 pneus pour les véhicules spéciaux et tracteurs agricole.

Les principaux constructeurs des pneus, implantés en Europe, sont montrés dans la figure III.5:

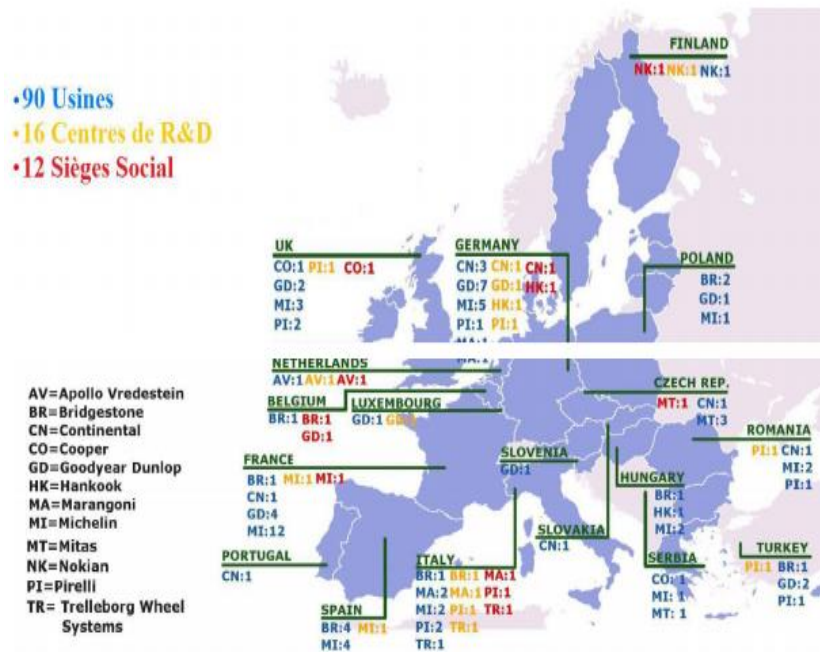


Figure III.5. Constructeurs pneumatiques en Europe (2017)

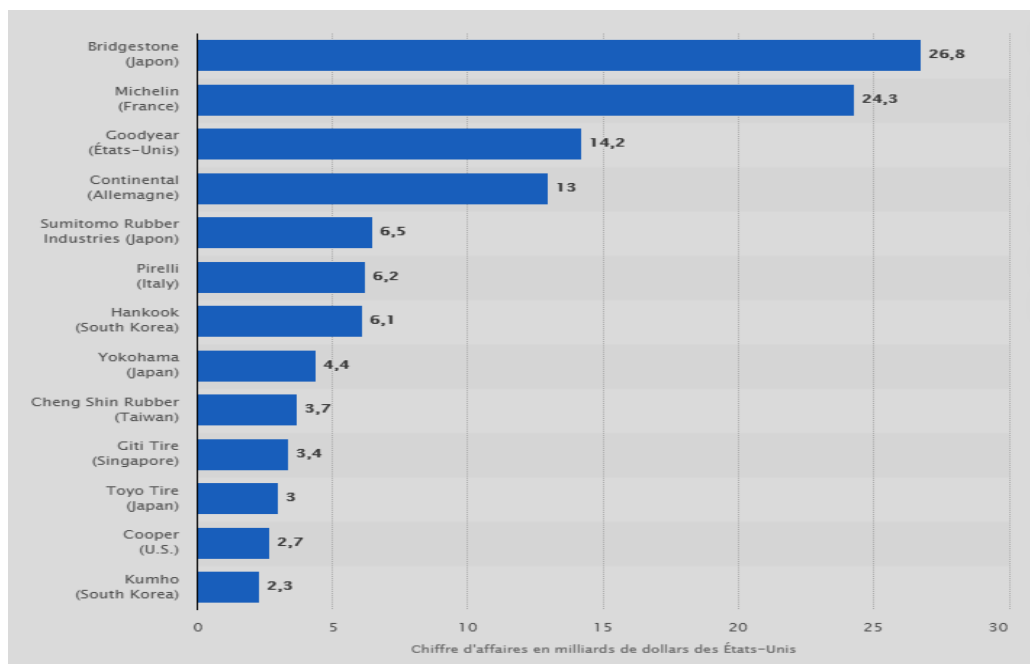


Figure III.6. Les principaux fabricants de pneus mondiaux d'après leurs ventes (2018)

III.6. Le recyclage de pneus

Le recyclage est un judicieux moyen pour se débarrasser des pneus qui ne trouvent plus de place dans l'univers où ils sont réellement affectés. Pour recycler un pneu il faut passer par plusieurs étapes :

- a- La collecte et le transport : lorsque les pneus sont changés en centre de montage, ils seront récupérés par des collecteurs et ensuite ils seront transportés jusqu'au centre concerné.
- b- Le tri des pneus : une fois les pneus sont arrivés sur le site, ils seront triés par taille et par composition afin de les traiter de la bonne manière.
- c- Le déchiquetage : de puissantes machines déchiquètent les pneus, la gomme et la ferraille, afin de n'obtenir que de gros copeaux de caoutchouc et des résidus métalliques.
- d- La récupération de l'acier : les fibres métalliques sont séparées de la gomme et récupérées, cet acier est aussi recyclé de son côté.
- e- Le broyage final : une fois qu'il ne reste que des granulats de gomme, le tout est poussé dans un crible et broyé en taille différentes selon l'usage auquel il est destiné (par exemple : très fin lorsqu'utilisé à la fabrication de nouveau pneus, plaquettes de frein, les adhésifs de peinture...).
- f- Le test et distribution : les particules sont examinées en fin contrôlés de leur qualité puis acheminées selon leur réutilisation.

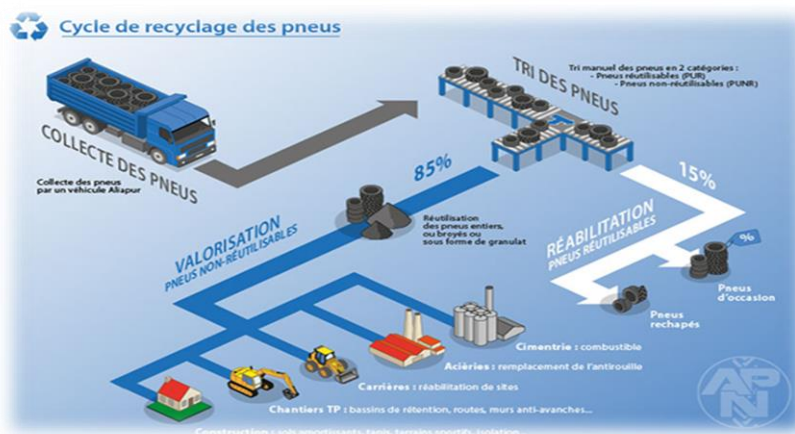


Figure III.7. Le cycle de recyclage des pneus

III.7. Valorisation du pneumatique usagé

Les pneumatiques usagés constituent presque la totalité des déchets de caoutchouc, cependant avant de les considérer comme des déchets, un nombre important de pneumatiques usagés font l'objet d'une valorisation.

La valorisation peut se présenter sous l'une des formes suivantes :

- valorisation énergétique ;
- valorisation matière ;
- valorisation originale.

III.7.1. Valorisation énergétique

Elle est appelée également recyclage énergétique [MICHEL M., 1981], La valorisation énergétique est l'utilisation de broyats de pneus usagés ou de pneus entiers comme combustible alternatif pour la production d'énergie.

Cette énergie sert à fournir de la chaleur et/ou de l'électricité, c'est donc le pouvoir calorifique de pneu qui est recherché lorsque celui-ci est brûlé. Le pouvoir calorifique d'un pneu est estimé entre 24 et 28 Mj/Kg, donc il est proche de celui du charbon et il peut être utilisé dans les cas suivants :

- les aciéries ;
- les cimenteries.

III.7.1.1. Les aciéries

La composition du pneumatique présentant une grande quantité de carbone, il est ainsi possible de remplacer l'anthracite (charbon à combustion lente qui dégage beaucoup d'énergie) que les aciéries électrique utilisent pour réduire la rouille des ferrailles usagées.

La qualité de l'acier reste identique, procédé efficace, économique et écologique, cette utilisation des broyats de pneus est adoptée depuis une dizaine d'année. Chaque année, plusieurs milliers de tonnes sont valorisées en Europe.

La fabrication de l'acier en four à arc électrique repose sur la fusion de ferrailles à haute température (1 650 °C) pendant 45 minutes environ, pour qu'elles soient fondues. Un arc électrique d'une température supérieure à 15 000 °C assure cette montée progressive en température.

Habituellement, dans un four à arc électrique, on ajoute aux 100 tonnes de ferrailles environ 3 300 kg de chaux et 1 150 kg de carbone sous forme d'anthracite et de coke. L'anthracite fournit du carbone qui se dissout dans le métal liquide, où il joue le rôle de réducteur des oxydes de fer (la rouille).

Un pneu est composé de carbone et de fer. La possibilité de substituer tout ou une partie de l'anthracite enfourné dans les fours électriques par des pneumatiques usagés, ouvre la voie à une nouvelle technologie de recyclage des pneumatiques.

III.7.1.2. Les cimenteries

Le processus cimentier consiste à mélanger 80% de calcaire et 20% de marne pour produire du ciment. Ce mélange est concassé, broyé puis cuit dans des fours rotatifs où les matières montent en température à 1400°C et devient du Clinker, principal composant du ciment.

Ce processus est extrêmement énergivore, il utilise une quantité importante de combustible fossile (gaz naturel, fuel, charbon, coke...), mais aujourd'hui il y'a une alternative pour le substituer par des pneus usagés.

Ces pneus sont introduits dans des lignes de cuissons équipées des dernières technologies permettant notamment la valorisation de déchets servant de combustibles.

Les pneus usagés sont utilisés comme combustible de substitution dans les fours des cimenteries, de façon à réduire leur consommation en combustibles fossiles en vue de diminuer

leur consommation énergétique. Les pneus usagés ont l'avantage de présenter un Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) élevé proche à d'autres combustibles conventionnels.

III.7.2. Valorisation matière

Cette valorisation repose principalement sur trois cas :

- par rechapage ;
- calorisation par transformation mécanique (poudrettes, granulés) ;
- valorisation par transformation chimique.

Les pneumatiques usagés sont utilisés sous forme de poudrette pour la fabrication des enrobés (l'asphalte caoutchouté). La poudrette est incorporée dans le mélange lors de la fabrication de l'enrobé. Cette application vise à améliorer les caractéristiques acoustiques de l'enrobé, sa résistance à la fissuration, et adhérence, ce qui donne généralement une plus longue vie avant que l'entretien ne soit exigé (réduction d'entretiens).

III.7.3. Valorisation originale de pneus usagés

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

a- Pneus entiers

- **le pneusol** qui consiste à superposer des couches de pneus reliés entre eux par des attaches et remplis de matériaux de remblai. Cette technique permet la réalisation d'ouvrages de soutènement, de remblais légers, d'ouvrages absorbants d'énergie comme protection contre les chutes de blocs.
- **le pneutex** associe les pneus et les membranes en géotextile.
- **le pneurésil** consiste à empiler des pneus de poids lourds en colonnes à empêcher le sol courant de remplir les vides créés à l'intérieur et entre les pneus ; cette structure a une masse volumique très faible et peut être utilisée comme soubassement de routes ou comme remblai derrière les culées de pont ou les murs de soutènement.
- **le drainage** des fossés et de parcelles en utilisant les pneus mis en place sous forme de tube.
- **la protection de quai** en utilisant les pneus qui absorbent les chocs de quais.
- **l'ensilage** en utilisant des pneus entiers pour le maintien des bâches d'ensilage.

b- Pneus découpés

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

c- Pneus déchiquetés

Les pneus sont déchiquetés en morceaux dont la taille varie entre 5 et 300 mm. Ces morceaux sont appelés : le déchiquetât.

Le déchiquetât de pneus peut être utilisé comme remblais léger dans la construction de routes ou comme sous-couches drainantes de Centres d'enfouissement technique.

III.8. Valorisation de pneumatiques usagés en Algérie

L'Algérie importe en moyenne 49,62 milliers de tonnes de pneumatiques en caoutchouc, selon l'Agence Nationale de Promotion du Commerce Extérieur. Sachant que chaque pneu neuf vendu génère un pneu usagé, et tenant compte de la perte de masse due à l'usure du pneu une fois usé, on se retrouve avec environ 45,65 milliers de tonnes de pneus usagés, chaque année.

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.

Selon une étude statistique estimative du gisement des pneus usagés non réutilisables publiée en 2011, la quantité générée annuellement en Algérie est de l'ordre de 1 439 514 unités, soit 25 918 tonnes par an (3 500 000 véhicules en 2007). Cette quantité évoluera à la hausse à cause de l'augmentation du parc automobile Algérien qui est estimé à 8,4 millions de véhicules, d'après les déclarations du Ministre du Transport en septembre 2016 au journal El Moudjahid.

Le recyclage des pneus usagés est un concept nouveau en Algérie pour lequel le terrain n'est pas encore préparé. Une seule entreprise agréée active dans ce créneau porteur :

« Douib Recyclage Caoutchouc », implantée dans la wilaya de Sétif est entrée en activité en 2012.

Tableau III.4. Quantité de pneus importés par l'Algérie depuis 2006

Périodes	2006	2007	2008	2009	1 ^{er} semestre de 2010
Quantités (milliers de tonnes)	61.58	70.462	60.37	21.43	45.52

III.9. La technique pneusol

III.9.1. Définition et généralités

Le pneusol est inventé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC-1974) et classée par l'Agence Française pour la Récupération et l'Élimination des Déchets (ANRED) comme une valorisation originale.

D'après (Long, 1993) Le Pneusol est formé de l'association de deux éléments : Le pneu et le sol. Le mot « pneus » désigne tous les éléments du pneu usagé (deux flancs, une bande de roulement) ou les pneus entiers qui sont associés linéairement ou en nappes et susceptibles de supporter des efforts de traction importants.

Le mot « sol » englobe toutes les variétés de terrains naturels, artificiels ou des déchets divers. Le Pneusol présente l'avantage de pouvoir améliorer de façon durable les propriétés mécaniques du sol.

Les principaux avantages que confère le Pneusol aux ouvrages utilisant cette technique sont essentiellement :

- une souplesse d'adaptation permettant de supporter des tassements différentiels importants ;
- une meilleure répartition des efforts dans la masse du matériau et sur les fondations.

III.9.2. Intérêt de la technique pneusol

Les intérêts de la technique pneusol, sont :

- valorisation de déchets ;
- montage simple et économique (coût Pneusol=50% coût ouvrage traditionnel) ;
- approvisionnement des constituants aisé : on trouve des pneus usagés partout dans le monde et se prête à une large gamme d'utilisation de remblais ;
- mise en œuvre ne faisant pas appel à de gros moyens.

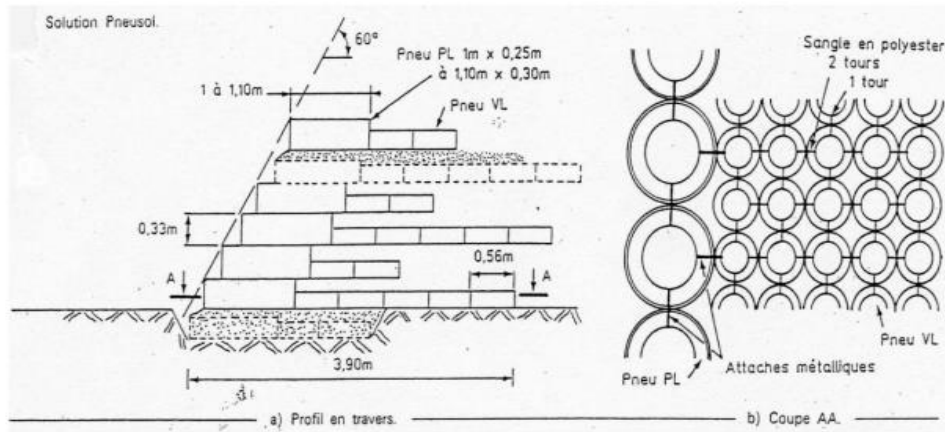


Figure III.8. Schéma d'un remblai pneusol

III.9.3. La technique pneusol en Algérie

Le pneusol est formé par l'association de pneus usagés non rechapables (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 [ASROUN A. et al., 2005], [BOULEBNANE A. et al., 1993].

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 antibruit, des ouvrages de protection des berges et des pentes et talus [HUMPHREY D., 2006].

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.

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 sont réalisés en Algérie en 1986 [LONG N .T., 1993]. 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) du projet de contournement de Bou-Smail

représenté sur la figure III.9. L'étude du projet expérimental 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).

Quelques ouvrages pneusol réalisés en Algérie sont cités dans le Tableau III.5.



Figure III.9. Réalisation d'un mur de soutènement à Bejaia



Figure III.10. Chantier expérimental pneusol à Bousmail

Tableau III.5. Ouvrages pneusol en Algérie

Types d'ouvrage	Lieu de réalisation	Nombre d'ouvrages
Répartiteur de contrainte	Ain Temouchent (1986)	12 ouvrages
Ouvrage de soutènement	Mur de soutènement provisoire Métro d'Alger (2002)	1 ouvrage
Stabilité de talus	Renforcement d'un talus évitement de la ville de Bousmail wilaya de Tipaza (2005)	1 ouvrage
Protection contre les glissements	Wilaya de Bejaia (2006)	1 ouvrage
Stabilité de talus	Modernisation de la RN 11 de la wilaya de Mostaganem (2007)	1 ouvrage
Digue de protection	Pont de Bou Arfa de la wilaya de Blida (2008)	1 ouvrage

III.9.4. Le comportement du pneusol

Utiliser des inclusions résistantes à la traction pour améliorer les caractéristiques mécaniques d'un sol, coûte souvent très cher. Une solution très économique consiste à utiliser le Pneusol, qui est constitué de l'association de sol avec des pneumatiques usagés (ou des parties de pneumatiques) de camions ou de véhicules de tourisme Cette utilisation de pneumatiques comme matériaux de renfort est très intéressante, de part leur disponibilité, et au niveau du comportement mécanique. Dans cette association, le rôle des pneus est d'apporter une cohésion au sol et éventuellement d'alléger le massif. On peut utiliser des pneus entiers avec flanc ou sans flancs (Figure III.11).

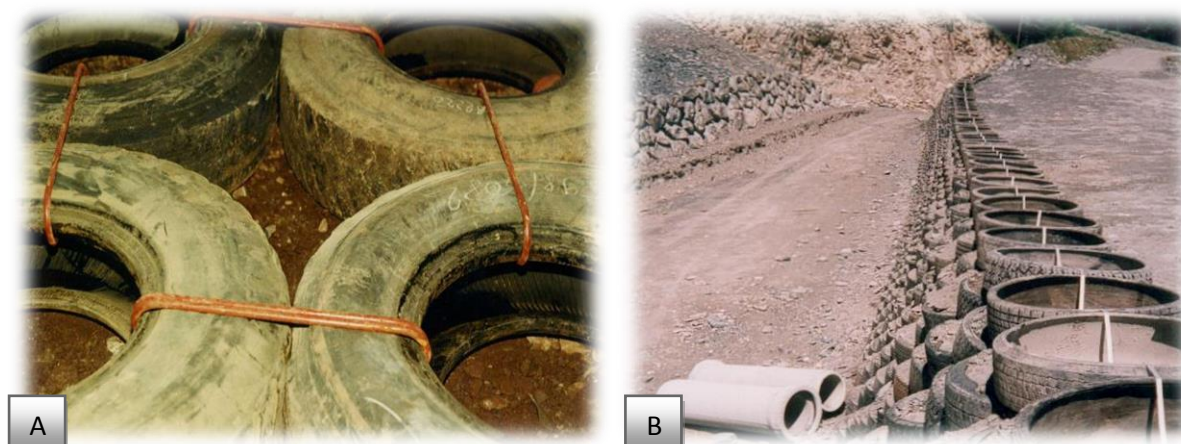


Figure III.11. (A) : Pneus entiers avec flancs, (B) : Pneus entiers sans flancs

III.9.5. Le comportement général du pneusol

Le pneusol est un matériau composite constitué de deux éléments ayant des modules de déformation différents; d'une part le pneu et d'autre part le sol.

Le comportement global d'un tel matériau résulte des caractéristiques mécaniques des deux composants de base et de leurs proportions relatives. Comme pour beaucoup de sols renforcés, la caractéristique essentielle du Pneusol est sa déformabilité et les ouvrages construits avec celui ci sont donc souples, capables de supporter sans dommage les tassements différentiels importants.

Une autre caractéristique est que la construction d'un ouvrage en Pneusol doit pouvoir s'effectuer rapidement, c'est-à-dire au même rythme qu'un remblai. De plus, on peut adapter pour le procédé une technique de réalisation par éléments préfabriqués, transportables et facilement assemblés sur place. Cela conduirait à une standardisation possible des différents éléments et par suite, à une facilité de mise en œuvre. Les pneumatiques, qui constituent en dehors du matériau de remblai l'élément essentiel du Pneusol, doivent être durables.

Selon des spécialistes du caoutchouc (MICHELIN), des pneumatiques enterrés dans le sol pendant plus de quarante ans sont retrouvés absolument intacts et ne présentent aucune dégradation et en plus ils n'affectent pas le sol.

III.9.6. Le comportement mécanique du pneusol

Les renforcements en pneumatique n'exigent avec le sol aucun critère granulométrique particulier, l'interaction du pneu et du sol ne reposant pas essentiellement sur le frottement comme pour la terre armée. Le Pneusol présente l'avantage de pouvoir améliorer les propriétés mécaniques du sol soit de manière anisotrope, c'est-à-dire uniquement dans les directions ou les matériaux est le plus sollicité (nappes, bandes, linéaires...) soit de manière isotrope dans toutes les directions (chaînes continue d'élément mélangée au sol de remblai). La principale caractéristique appréciée du procédé pneu sol est le fait qu'il procure une souplesse au sol renforcé et une stabilité aux ouvrages en supportant des grands tassements même s'ils sont différentiels.

Généralement, afin de simplifier le comportement mécanique du pneu sol, on adopte des hypothèses simplificatrices. On notera que :

- les armatures et le sol ont des comportements élastiques linéaires dans chaque nappe de matériau renforcé ;

- la liaison au niveau de l'interface entre l'armature et le sol est parfaite ;
- le comportement du sol est élastoplastique entre chaque nappe.

L'utilisation d'une méthode d'homogénéisation pour l'analyse de problèmes du pneu sol permet de déterminer un comportement équivalent du matériau. Généralement on adopte deux méthodes d'homogénéisation: l'une numérique et l'autre analytique.

III.9.7. Adhérence terre-pneumatiques

Les matériaux de remblais peuvent être soit des sols naturels soit des matériaux utilisables et doivent répondre aux critères géotechniques. Des essais en vraie grandeur de traction d'éléments pneumatiques noyés dans le remblai ont permis une bonne compréhension du phénomène d'interaction sol-pneu. D'après ces essais, l'adhérence bande aplatie dépend essentiellement de l'interaction sol-caoutchouc du pneumatique, il n'en est pas de même de celle des bandes de roulements sur chant et des flancs. En effet, l'effort de traction appliqué sur une bande de roulement sur chant est équilibré par :

- le frottement sol-caoutchouc sur la surface peut varier en fonction de l'effort exercé puisque la déformation de l'élément est importante ;
- le frottement sol-sol le long de deux surfaces de cisaillements délimités par le bord.

III.10. Valorisation de poudrette de caoutchouc

La poudrette de caoutchouc peut être utilisée en plusieurs activités, entre par exemple dans la fabrication de revêtements de sécurité et de revêtements amortissant pour les aires de jeu, les manèges et les pistes.

Le site devra disposer d'une aire d'entreposage des broyats en vrac. Cette aire devra être aménagée de sorte que les envols et migrations de fibres et poussières soient évités.

Le risque incendie, au niveau de la conception des stocks de broyats par éloignement des limites de propriétés et/ou des installations de stockage de produits combustibles seront pris en compte.

III.10.1. Application de poudrette de caoutchouc

Aires de jeu : Les propriétés élastiques des granulats de pneus en font un matériau particulièrement intéressant pour la fabrication d'aires de jeux amortissant.

Ces éléments alvéolés permettent une absorption importante des chocs et garantissent une grande sécurité pour les aires de jeux. Cette sécurité est conforme à la norme européenne EN 1177 relative aux aires de jeux et qui impose des sols sachant amortir les chutes des enfants.

Bassins de rétention : Le pneu usagé broyé est couramment utilisé pour l'aménagement de bassins de rétention. Il retient des volumes d'eau importants, tout en conservant la Solidité suffisante pour supporter une route sans déformation sous de lourdes charges.



Figure III.12. Réalisation d'un bassin de rétention

Bétons : Des études sont en cours afin d'étudier les opportunités résultant de l'incorporation de granulats issus du broyage de pneus usés dans des mortiers et bétons à base cimentaire par cette incorporation, il s'agit à la fois d'alléger le béton et d'en augmenter les performances (accroissement de la résistance à la fissuration et de la capacité de déformation de ces matériaux). Ces différentes utilisations des granulats ou de fibres textiles de pneus usés dans des matériaux à base cimentaire représentent de voies de valorisation à exploiter.

Depuis dix ans, l'industrie cimentière s'est engagée à réduire sa consommation d'énergie fossile tout en garantissant le maintien de la qualité des ciments. Avec l'utilisation de broyats de pneus ou de pneus usés entiers comme combustible de substitution, les cimenteries participent à la préservation des ressources naturelles et au recyclage des produits en fin de vie. Cette solution permet d'économiser du coke de pétrole, du charbon et du fioul lourd. Bien entendu, le recours à des pneus s'effectue dans des conditions d'utilisation particulièrement strictes et encadrées.

Drainage : Une étude de faisabilité sur la valorisation de broyats de pneus dans la fonction de drainage. Les broyats de pneumatiques usés possèdent en effet une conductivité hydraulique élevée, équivalente à celle des granulats naturels que sont les graviers. Ainsi, le

recours aux broyats pourrait être une opportunité intéressante, notamment dans les installations de stockage de déchets.

L'étude actuellement menée vise à établir des préconisations et des recommandations d'utilisation de broyats de pneus issus de poids lourds et de véhicules légers en couche drainante. Cette étude porte également sur les prescriptions techniques minimales pour assurer la pérennité technique et l'innocuité environnementale.

III.10.2. La recherche en Algérie sur l'utilisation de la poudrette de caoutchouc dans les chaussées routières

En 2007, une étude particulière a été lancée au niveau de l'ENTP sur l'utilisation de la poudrette de caoutchouc dans les chaussées routières (revêtement des chaussées). Cette recherche s'effectue au laboratoire de l'école, elle s'axe sur les procédés innovants dans le traitement de la fissuration des chaussées routières, principalement dans les zones à haute température et en parallèle avec le Ministère des Travaux Publics des planches d'expérimentation par inclusion d'un pourcentage de poudrette dans l'asphalte sont prévues au sud Algérien, ceci permettra de donner une souplesse aux enrobés afin d'éviter le phénomène de fissuration et en même temps réduire la nuisance sonore. Pour la réalisation de l'asphalta caoutchouté, les pneus sont utilisés sous forme de granulats ou de poudrette pour la fabrication des enrobés destinés aux couches de roulement des routes. Les différentes fractions granulométriques utilisées sont : 0/0,5 mm, 0,5/2 mm, 2/7 mm et 7/15 mm. La poudrette est incorporée comme granulats dans le mélange à la fabrication de l'enrobé (en moyenne 15%).

Cette application vise à améliorer les caractéristiques acoustiques de l'enrobé. Le dosage est de l'ordre de quelques pourcents. Les poudrettes rentrent également dans la fabrication des enrobés drainant...

III.10.3. Gazon synthétique

Le gazon synthétique est composé d'un tapis d'herbe synthétique dans lequel a généralement été ajouté un lit de lestage en sable recouvert d'une couche de granulats libres. Cette technologie permet une utilisation du stade par tous les temps et en toute saison, puisque ce revêtement ne craint ni le gel en hiver, ni la sécheresse en été, ni les inondations dues aux pluies.

Il exige un entretien très limité et ne requiert pas d'arrosage. Surtout, ce terrain permet des sensations de jeu très proches d'une pelouse naturelle. De nombreuses communes ont

aménagé des stades municipaux avec ce gazon synthétique. De même, plusieurs clubs se sont dotés de ce type de terrain ; c'est notamment le cas de l'un des terrains de l'équipe de France de football à Clairefontaine et d'un autre à Marcoussis pour l'équipe de France de rugby. En 2005, Aliapur a engagé un programme d'études scientifiques évaluant les risques environnementaux et sanitaires des matériaux de remplissage des gazons synthétiques. Il en ressort que ces revêtements n'ont aucun impact sur la santé des utilisateurs ou sur l'équilibre environnemental.

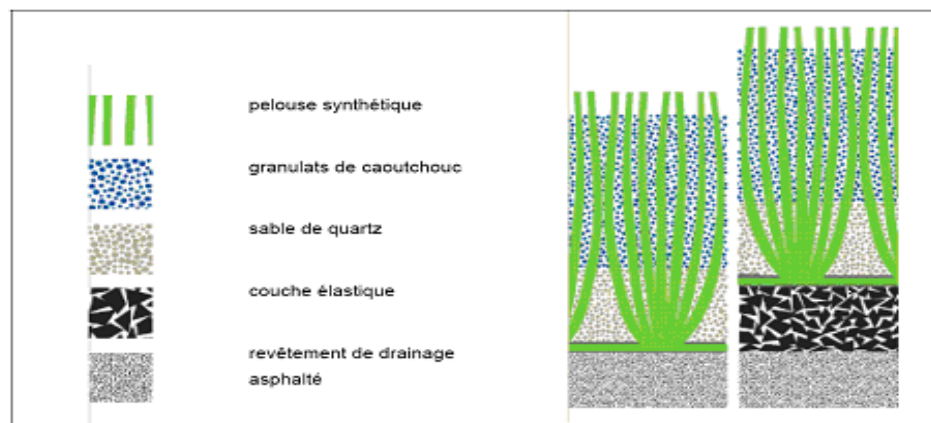


Figure III.13. Coupe schématique verticale d'un sol sportif

III.10.4. Autres domaines d'application

La poudrette de caoutchouc peut réduire les vibrations induites par les plates-formes (tramway) en utilisant les granulats comme couche antivibratile. Les premiers résultats sont prometteurs et devraient déboucher sur une expérimentation. Comme elle peut être un mode d'isolation et pour réduire les bruits pour les toitures, les granulats peuvent être mélangés à des liants ou des résines, pour l'application dans les objets moulés, en particulier dans le domaine du mobilier urbain. Ils peuvent ainsi devenir des ralentisseurs, des plots de signalisation, des accessoires d'aménagement sur voie cyclable et même la fabrication des chaussures.

III.11. Conditions et mise en œuvre

En préalable à toute utilisation en matériaux de substitution, il est indispensable de respecter les points suivants :

- identification des flux / traçabilité : Les livraisons de broyats de pneus usagés non réutilisables doivent faire l'objet de l'établissement préalable d'un document de suivi. Ce document, précisera la provenance, la destination et les quantités de broyats de pneus usagés non réutilisables ;

- réception de la marchandise : Le déchargement des broyats de pneus usagés non réutilisables doit se faire sur une zone imperméabilisée de type béton ou enrobés. Dans tous les cas, un contrôle visuel des broyats de pneus usagés non réutilisables doit être réalisé lors du déchargement du camion et lors de la mise en place des broyats afin de vérifier l'absence d'autres déchets.

III.12. L'intérêt de la poudrette de caoutchouc

L'intérêt de la poudrette de caoutchouc, réside dans :

- l'amélioration de la cohésion ;
- la diminution de la susceptibilité thermique ;
- l'augmentation des capacités d'allongement ;
- l'amélioration des caractéristiques viscoélastiques ;
- l'amélioration de l'adhésivité passive (meilleure résistance aux dés enrobage sur la chaussée).

Les propriétés physiques de la poudrette de caoutchouc qui les rendent moins susceptibles aux températures élevées et moins fragiles aux basses températures se traduisent aussi par des cohésions élevées, des retours élastiques, une bonne résistance en traction et aux essais de cisaillement.

Ces propriétés ont des effets intéressants sur les performances :

- résistance à l'orniérage est améliorée par l'utilisation des polymères qui augmentent la cohésion à haute température et élève la recouvrance élastique lorsque la contrainte disparaît, ce qui est surtout valable pour les poudrettes de caoutchouc ;
- rigidité : La réduction de la susceptibilité thermique permet d'augmenter la rigidité d'un mélange à température élevée ;
- résistance à la fatigue : L'augmentation de la rigidité aux températures élevées et la diminution de la fragilité du liant aux basses températures permettent d'améliorer la tenue en fatigue des mélanges ;
- résistance à la fissuration à basse température : La poudrette de caoutchouc permet d'obtenir un mélange plus souple qui diminuera le risque de fissuration ;
- résistance à la propagation des fissures ; Cette propriété requise pour les couches surmontant des couches d'assises traitées aux liants modifiés aux élastomères

employés à des taux relativement élevés, mais des combinaisons liants modifiés-fibres ont donné aussi des résultats positifs en laboratoire ;

- durabilité : l'adhésivité de la poudrette de caoutchouc sur le granulat est un facteur important ;
- résistance au vieillissement : La possibilité d'augmenter l'épaisseur de la poudrette du caoutchouc contribue à améliorer cette propriété.

III.13. Conclusion

La préoccupation de l'homme pour la protection de son environnement devant l'agressivité de son appareil industriel, ainsi que l'orientation de ses idées vers l'optimisation des coûts et délais de réalisation de ses projets ont poussées les chercheurs dans le domaine du Génie Civil, le lancement de plusieurs travaux de recherche visant à proposer de nouvelles technologies de réalisations. L'idée de la valorisation des pneumatiques usagés constitue actuellement la priorité principale. En effet le pneu usagé est un déchet encombrant, mais qui peut devenir très utiles, en conséquence le génie civil offre de nombreuses possibilités d'utilisation des pneumatiques usagés, en les valorisant en matériau de construction aux propriétés originales et très utiles.

Dans le chapitre suivant sont représentés les différents essais d'identification, pour mieux caractériser le matériau qui sera utilisé dans les prochains essais.



Chapitre IV

Présentation et identification des matériaux utilisés

IV.1. Introduction

Il est indispensable avant tout démarrage de travaux, d'avoir une idée sur les caractéristiques du sol, afin de collecter les informations nécessaires qui vont aider l'ingénieur en géotechnique dans : la sélection du type de sol (argile, limon, sable...) ainsi que les problèmes possibles qui peuvent avoir lieu sur le terrain (tassement, gonflement...) et d'établir des solutions nécessaires.

L'étude géotechnique est basée sur deux types d'essais :

- essais in situ ;
- essais de laboratoire.

Dans cette étude, on s'intéresse uniquement aux essais d'identification de laboratoire, qui sont :

- la teneur en eau ;
- l'analyse granulométrique (par tamisage et sédimentométrie);
- les limites d'Atterberg ;
- la valeur au bleu de méthylène ;
- les différentes masses volumiques.

IV.2. Origine du matériau utilisé

Le matériau utilisé dans ce travail a été prélevé dans la commune de FREHA à 100m de l'ancien arrêt de bus de Tizi-Ouzou. La localisation du site est indiquée sur la figure IV.1.

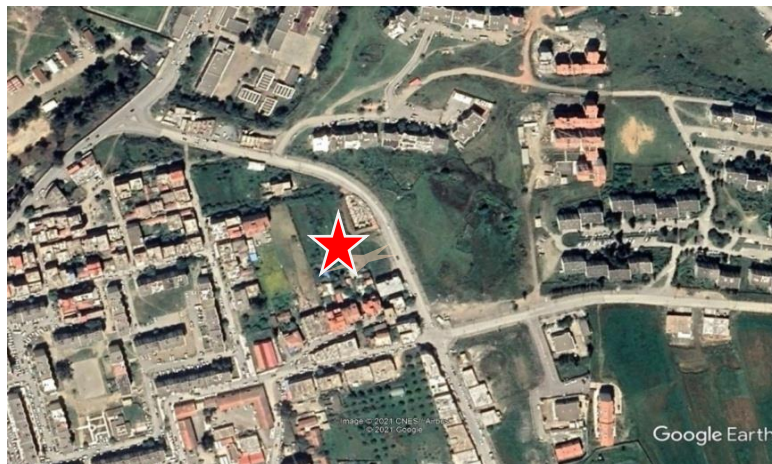


Figure IV.1. Le site du prélèvement du sol étudié

IV.3. Prélèvement des échantillons

Le sol a été extrait à une profondeur d'environ 2 à 3m par le biais d'une pelle mécanique. Après l'extraction, le sol a été placé dans des sachets en plastique et transportés au laboratoire pour préparation et exécution des essais géotechniques, d'identification et mécaniques.

IV.4. Essais d'identification

IV.4.1. La teneur en eau (NF P94-050)

La teneur en eau est déterminée selon la norme NF P94-050 (méthode par étuvage) .

IV.4.1.1. Objectif

L'essai consiste à calculer le rapport du poids d'eau que le sol contient au poids de ses éléments secs, après dessiccation à l'étuve à 105° C (50°C dans le cas des sols contenant des éléments organiques).

IV.4.1.2. Appareillage

Pour effectuer l'essai de la teneur on eau à l'état naturel, l'appareillage nécessaire est :

- une étuve (50°C, 105°C);
- des tares ;
- une balance.



Figure IV.2. Appareillage pour déterminer la teneur en eau

IV.4.1.3. Mode opératoire

L'échantillon de matériau humide est pesé puis placé dans l'étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (correspondant alors à la masse du matériau sec).

La teneur en eau est calculée comme suit :

$$W = \frac{M_w}{M_s} \times 100$$

Ou :

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

avec :

W : la teneur en eau ;

 M_w : la masse de l'eau ; M_s : la masse sèche.

Tableau IV.1. Les résultats de la teneur en eau

	$M_h + M_t$ (g)	$(M_s) + (M_t)$ (g)	(M_t) (g)	(M_w) (g)	W(%)	La teneur en eau moyenne (%)
M_1	23.4	20.6	7.3	2.8	21.05	23.22
M_2	36.8	31.2	9.7	5.6	26.04	
M_3	28.2	23.5	7.1	3.7	22.56	

avec :

- M_h : la masse humide ;
- M_s : la masse sèche ;
- M_t : la masse de la tare ;
- M_w : la masse de l'eau.

Le sol étudié présente une teneur en eau de : $W=23.22\%$.

IV.4.2. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un échantillon, donc la grosseur et les pourcentages pondéraux des différents grains qui constituent l'échantillon [DUPAIN. et al., 2000].

Il existe deux types d'analyse granulométrique:

- le tamisage à sec (pour les grains de taille supérieure à $80\mu\text{m}$) ;
- la sédimentation (pour les grains de taille inférieure à $80\mu\text{m}$).

IV.4.2.1. Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056)

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution relative des diamètres des grains supérieurs à 0,08 mm dans un sol. L'analyse granulométrique des échantillons testés selon la norme NF P 94-056.

IV.4.2.1.1. Objet de l'essai

Établir la répartition pondérale des éléments granulaires d'un matériau.

IV.4.2.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon, en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

IV.4.2.3.3. L'appareillage

Pour effectuer l'essai de l'analyse granulométrique il faut avoir :

- une série de tamis ;
- une tamiseuse ;
- un bac ;
- une truelle ;
- une étuve ;
- une balance.



Figure IV.3. Appareillage de l'analyse granulométrique par tamisage

Pour le sol étudié, les résultats obtenus sont, représentés dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2. Résultats de l'analyse granulométrique de l'argile

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisâts cumulés (%)
5	0	0	0	100
4	12.1	12.1	0.81	99.19
2.5	48.4	60.5	4.03	95.97
1.25	87.8	148.3	9.89	90.11
0.63	231.2	379.5	25.30	74.70
0.315	126.9	506.4	33.76	66.24
0.08	187.7	694.1	46.27	53.73

Les résultats sont représentés graphiquement avec « une courbe granulométrique » qui est un élément essentiel de la description géotechnique des sols.

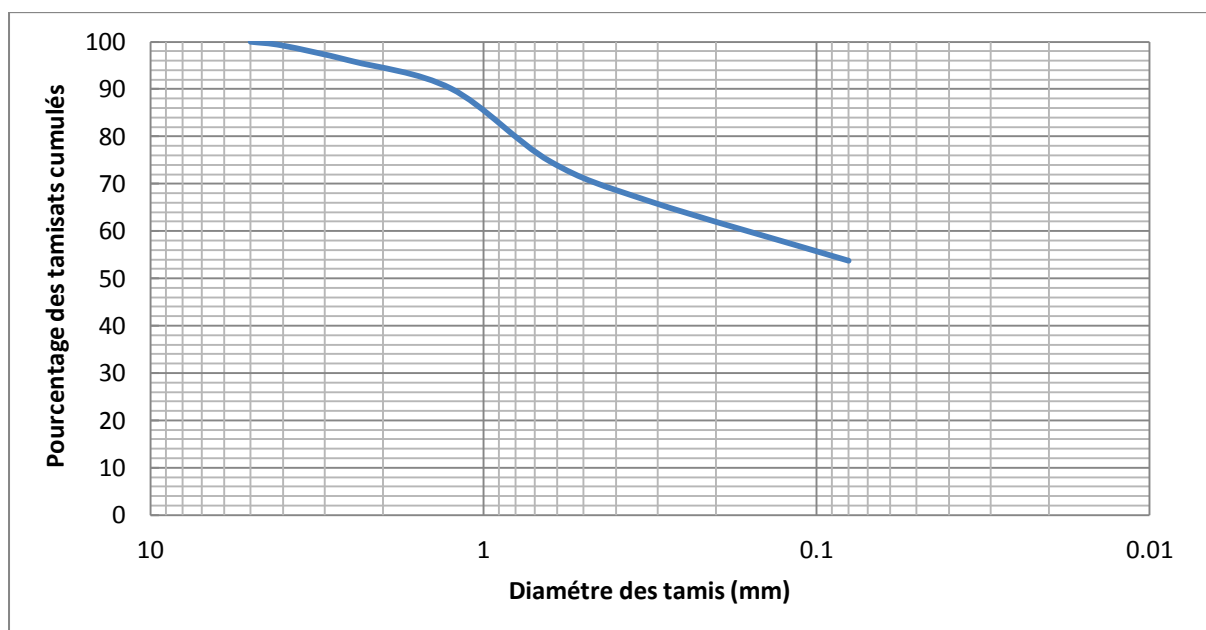


Figure IV.4. Courbe granulométrique de l'argile

Selon la classification des sols, le tamisât à 0.08 mm est supérieur à 50%, donc c'est un sol fin.

IV.4.2.2. Analyse granulométrique par sédimentation (NF P94-057)

Il est physiquement impossible d'effectuer une analyse granulométrique par tamisage dans le cas des particules dont le diamètre équivalent est inférieur à 80 μ m. Dans ce cas on fait une analyse granulométrique par sédimentation.

IV.4.2.2.1. Le but de l'essai

L'analyse granulométrique par sédimentométrie permet de déterminer la distribution en poids des particules fines (de diamètre inférieur à 80 μ m) d'un sol en fonction de leurs dimensions [DUPAIN. et al., 2000].

IV.4.2.2.2. Le matériel nécessaire

- un échantillon de 60 g ;
- une étuve ;
- une balance ;
- un agitateur mécanique ;
- l'eau distillée ;
- dé flocculant ;
- agitateur manuelle ;
- chronomètre.

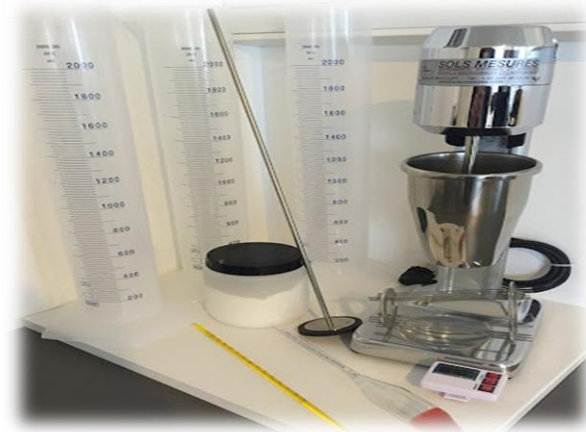


Figure IV.5. Outils de l'essai de sédimentométrie

IV.4.2.2.3. Le principe de l'essai

Le principe de l'essai se base sur le fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des grains fins à très fins est fonction de leurs dimensions.

IV.4.2.2.4. Le mode opératoire

L'analyse granulométrique par sédimentation est un essai complexe et nécessite une bonne précision lors de son exécution.

Après la préparation de l'échantillon un densimètre et un thermomètre seront plongées dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre, et des lectures seront faites aux temps suivants : 0.5min, 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 20 min, 40 min, 80 min, 240 min, 1440 min.

Tableau IV.3. Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentation

Temps	Lectures du densimètre	Température	Ht	P (%)	D Diamètre (μm)
30 sec	1.018	27	0.1230	30.19	0.0166358
1 min	1.0175	27	0.1230	30.17	0.0117632
2 min	1.017	26.5	0.1230	30.16	0.0083179
5 min	1.016	26	0.1143	30.13	0.00507124
10 min	1.015	26	0.1168	30.10	0.00362491
20 min	1.014	26	0.1168	30.07	0.0025632
40 min	1.013	26	0.1218	30.05	0.00185084
80 min	1.012	26.5	0.1243	30.02	0.00132211
240 min	1.011	27	0.1268	29.99	0.00077096
1440 min	0.998	26	0.1593	29.64	0.00035278

IV.4.3. Les limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre :

- Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique : limite de liquidité (W_l) ;
- le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limite de plasticité (W_p).

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considéré, exprimée en pourcentage du poids du matériau sec.

Pour préparer le matériau il faut laisser un échantillon du sol dans un bac remplis d'eau pendant 24 heures, cet essai est réalisé sur la partie de sol passant au tamis de $400\mu\text{m}$.

Laisser le mélange eau+sol reposer durant 24heures, à l'aide d'une seringue, l'eau filtrée sera aspirée et sera mis à l'étuve pendant quelques heures. Enfin cette pate sera utilisée pour déterminer la limite de liquidité (W_l) et la limite de plasticité (W_p).

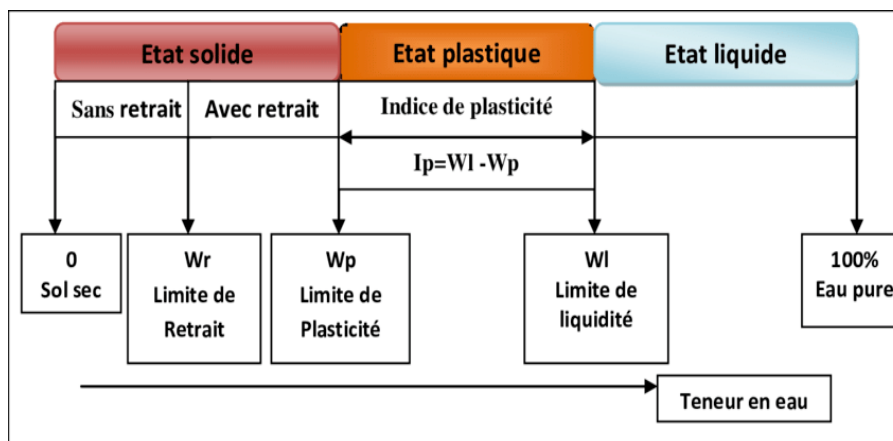


Figure IV.6. Limite d'Atterberg d'un sol

IV.4.3.1. Le but des essais

Le but des essais c'est de permettre d'établir un lien entre la teneur en eau du sol et son comportement après une interprétation.

IV.4.3.2. Préparation de l'échantillon

Prendre un échantillon représentatif du sol et l'imbiber dans un récipient plein d'eau pendant 24 heures.

Tamiser ce matériau par voie humide sur un tamis de 400 μm , l'ensemble du tamisât et des eaux de lavage étant ensuite décanté pendant 12 heures.

L'eau claire surnageante est siphonnée en prenant garde de ne pas entraîner de particules solides fines, l'eau excédentaire étant évaporée à l'étuve à 50°C jusqu'à obtenir un mortier mou.

IV.4.3.3. La limite de liquidité

La limite de liquidité est la teneur en eau du matériau qui correspond à une fermeture de 1cm de la rainure après un nombre de chocs (entre 15 et 35).

IV.4.3.3.1. Le matériel nécessaire

Le matériel nécessaire pour l'essai, est le suivant :

- l'appareil de Casagrande ;
- spatule ;
- balance de précision ;
- outil à rainure ;
- une étuve.



Figure IV.7. Matériels de limite de liquidité

IV.4.3.3.2. Le principe de l'essai

Le principe de l'essai consiste à faire tomber une coupelle d'une hauteur de 10mm sur un socle. Chaque choc entraînant la fermeture progressive d'une rainure pratiquée dans l'échantillon de sol.

IV.4.3.3.3. Le mode opératoire

La limite de liquidité se détermine à l'aide de l'appareil de Casagrande qui est constitué d'une coupelle dans laquelle l'échantillon sera placé. Une pâte d'environ 70g sera étalée dans la coupelle, puis avec l'outil à rainure un sillon sera creusé au milieu de la coupelle.

La coupelle sera soumise à un certain nombre de chocs jusqu'à ce que le sillon se referme sur 1 cm. L'essai sera arrêté à ce moment et un échantillon sera pris et en suite sera étuvé durant 24 heures.

Les résultats de limites de liquidité sont représentés dans le Tableau IV.4 :

Tableau IV.4. Les résultats de limite de liquidité

Essai	Nombre de chocs	Masse humide (M_h) (g)	Masse sèche (M_s) (g)	La masse de l'eau (M_w) (g)	Teneur en eau $W = (M_w/M_s) \cdot 100$ (%)
1	27	$M_1 = 2.5$	$M_1 = 1.6$	$M_{w1} = 0.9$	$W_1 = 56$
2	22	$M_2 = 3.0$	$M_2 = 1.8$	$M_{w2} = 1.2$	$W_2 = 66.7$
3	17	$M_3 = 3.5$	$M_3 = 2$	$M_{w3} = 1.5$	$W_3 = 75$

D'après ses résultats on trace une courbe des teneurs en eau fonction du nombre de chocs.

La limite de liquidité (W_L) est déterminée graphiquement par la projection du point correspondant à $N=25$ sur la droite tracée, le point d'intersection est ensuite projeté sur l'axe des teneurs en eau.

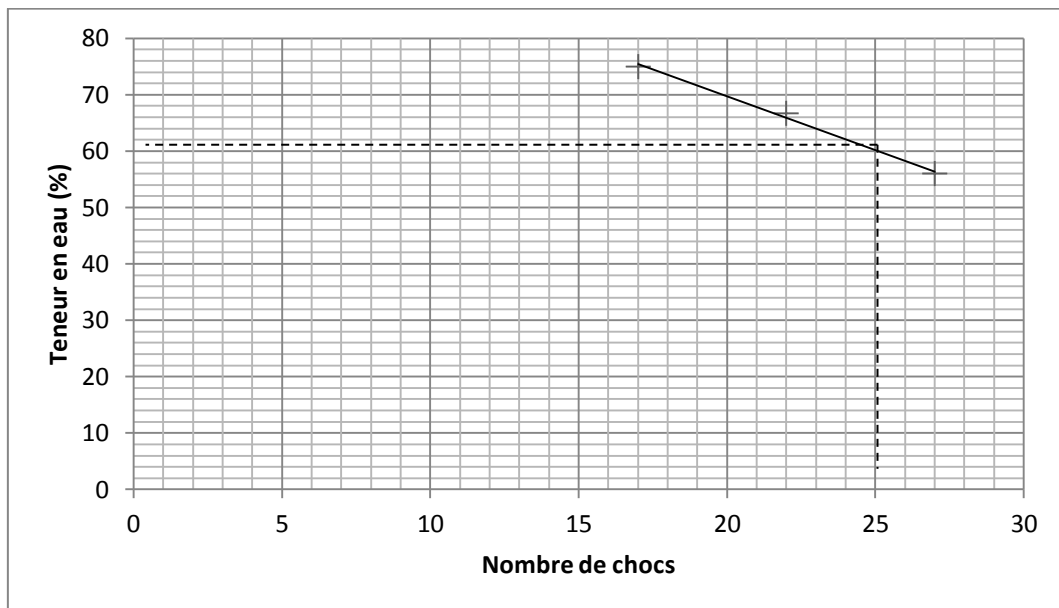


Figure IV.8. Limite de liquidité du sol

Du graph on lit : : $W_L=60\%$.

IV.4.3.4. La limite de plasticité

La limite de plasticité est définie par application de la norme NF 94-051. Le matériau est roulé sous la forme d'un petit rouleau plein (ou boudin) d'environ 3 mm de diamètre. Ce boudin est progressivement asséché en frottant le matériau entre la plaque de marbre et un patin poreux. Lorsque le rouleau n'est plus plastique, il devient alors cassant. L'essai est arrêté car la teneur en eau à ce moment correspond à la limite de plasticité.

IV.4.3.4.1. Le matériel nécessaire

Le matériel nécessaire pour l'essai, est :

- une plaque en marbre ;
- une cale ;
- une étuve ;
- des tares.

IV.4.3.4.2. Le mode opératoire

On prélève une portion d'échantillon préparée auparavant afin de former une boule. Cette boule est roulée à la main sur une plaque lisse, pour obtenir un rouleau jusqu'à ce qu'il atteigne 3 mm de diamètre. Au moment où il atteint 3 mm de diamètre, le rouleau doit mesurer environ 10 à 15 cm de long. La limite de plasticité est obtenue lorsque simultanément le rouleau se casse et que son diamètre est de $3 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$.

Une fois les fissures apparues, le central du rouleau est prélevé et placé dans une boîte et peser immédiatement et ensuite il sera introduit dans l'étuve, afin de déterminer sa teneur en eau. Effectuer un deuxième essai sur une nouvelle boulette.

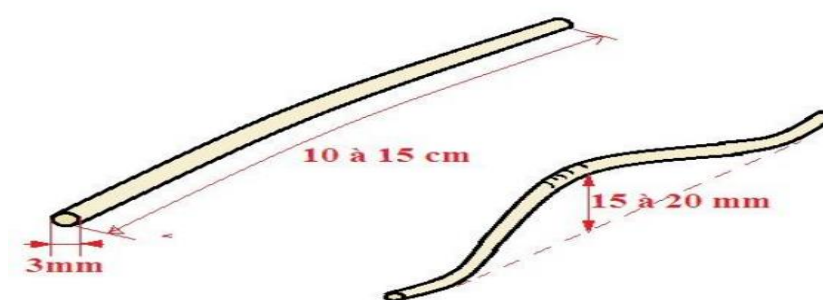


Figure IV.9. Rouleaux pour la détermination de la limite de plasticité

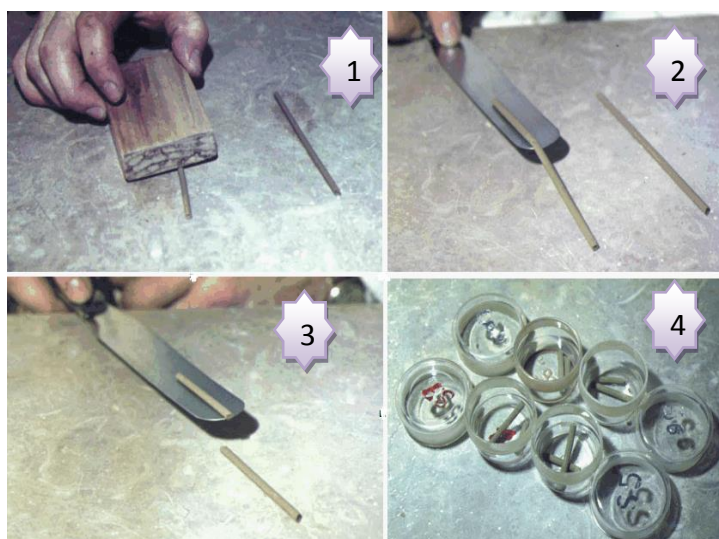


Figure IV.10. Les étapes de l'essai de limite de plasticité

Les résultats de limites de plasticité sont représentés dans le Tableau IV.5

Tableau IV.5. Les résultats de la limite de plasticité

Essai	La masse humide (M_h) (g)	La masse sèche (M_s) (g)	La masse de l'eau (g)	La teneur en eau W (%)
1	2.7	2.3	0.4	17.4
2	3	2.5	0.5	20
3	1.8	1.5	0.3	20
La teneur en eau moyenne (%)	$W_p = 19.13 \%$			

La limite de liquidité ainsi que la limite de plasticité ont été déterminées, donc l'indice de plasticité est calculé comme suit :

$$I_p = W_L - W_p$$

Donc : $I_p = 60 - 19.13$

$$I_p = 40.87 \%$$

Les limites d'Atterberg ont donné les résultats suivants :

La limite de liquidité $W_L = 60\%$.

La limite de plasticité $W_p = 19.13\%$.

L'indice de plasticité $I_p = 40.87\%$.

La plasticité d'un sol est appréciée par le couple (W_L , I_p) qui dépendent de la nature et de la quantité des minéraux argileux contenus dans le sol. C'est ainsi que Casagrande a défini un diagramme dit " Abaque de plasticité " qui permet de classer les sols fins.

La classification du sol est obtenue, par la position d'un point de coordonnées (W_L , I_p) sur le diagramme de plasticité de Casagrande.

Dans notre cas : M(60,40)

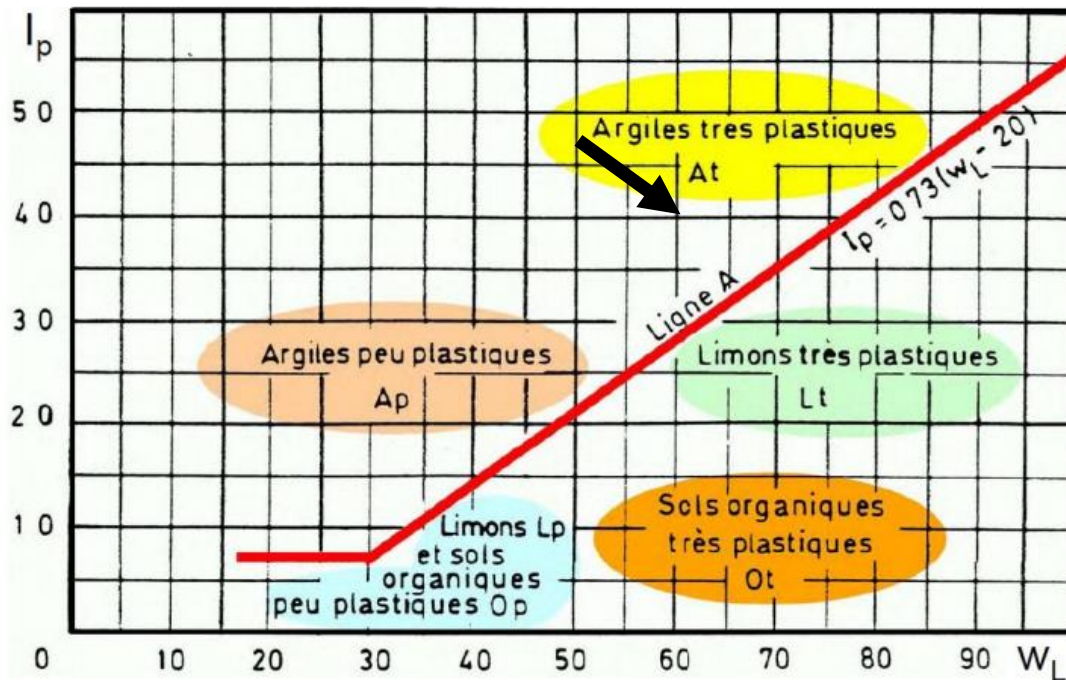


Figure IV.11. Abaque de plasticité de Casagrande

D'après l'abaque de Casagrande le sol est classé comme : une argile très plastique (A_t).

IV.4.3.4.3. Le type du sol

On détermine le type de sol étudié en utilisant le tableau IV.6 :

Tableau IV.6. Types des sols en fonction de l'indice de plasticité I_p

Indice de plasticité (I_p) %	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

D'après les résultats obtenus, la valeur de l'indice de plasticité est égale à 40.87 %, donc le sol est : très plastique.

IV.4.3.4.4. La nature du sol

La nature du sol est déterminée en utilisant le tableau IV.7 :

Tableau IV.7. Nature du sol en fonction de l'indice de plasticité I_p

	L'indice de plasticité
Argile	$I_p > 30$
Argile limoneuse	$20 < I_p < 30$
Limon	$10 < I_p < 20$
Sable argileux	$5 < I_p < 20$
Sable limoneux	$5 < I_p < 15$

On déduit que notre sol est : une argile.

IV.4.3.5. L'indice de consistance

L'indice de consistance permet d'évaluer l'état hydrique des sols fins. L'indice de consistance est déterminé avec la loi suivante :

$$I_c = (W_L - W) / I_p$$

$$\text{donc : } I_c = \frac{60 - 23.22}{40.87} = 0.90.$$

Tableau IV.8. L'état du sol en fonction de l'indice de consistance

L'indice de consistance I_c	Etat du sol
$I_c > 1$	Solide
$0 < I_c < 1$	Plastique
$I_c < 0$	liquide

En utilisant le tableau IV.8, on déduit que l'état du sol est classé comme : plastique.

IV.4.4. Détermination de la masse volumique des particules solides des sols (NF P 94-054)

Selon la norme NF P 94-054, La masse volumique des particules solides est déterminée à l'aide d'un pycnomètre, elle s'applique sur des échantillons d'éléments de dimension inférieure à 2 mm.

IV.4.4.1. Objectif et but de l'essai

L'essai permet la détermination de la masse volumique moyenne des particules et éléments solides constituant un échantillon. Cette dernière sert par la suite à déduire d'autres caractéristiques du sol telles que l'indice des vides, le degré de saturation et la porosité.

IV.4.4.2. Le matériel utilisé

Le matériel utilisé, est :

- un pycnomètre ;
- l'eau distillée ;
- une plaque chauffante ;
- une balance électronique.

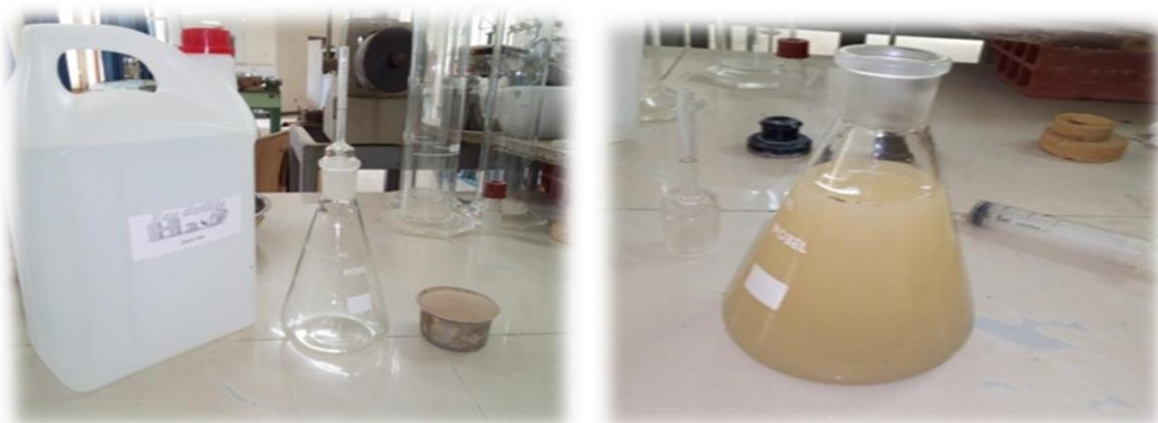


Figure IV.12. Le matériel nécessaire pour la détermination de la masse volumique des particules solides du sol

IV.4.4.3. Exécution de l'essai

Tamiser une partie du sol à étudier au tamis de 2 mm. Prendre un échantillon d'environ 50g du tamisât précédent et le mettre dans une coupelle de masse connue (M). L'ensemble est introduit dans une étuve dont la température est réglée à 50°C ou 105°C selon que le sol est sensible ou insensible à la chaleur respectivement. En cas de doute, le sol est traité comme sensible à la chaleur, le séchage peut durer 1 à 8 jours jusqu'à ce que la masse de l'échantillon

devienne constante pour deux pesées séparées de 4 à 5 heures de séchage. Les accumulations de particules (particules collées les unes aux autres) sont ensuite séparées au pilon dans le mortier.

Le pycnomètre et son bouchon secs et propres sont pesés (M_1) et ensuite l'échantillon est soigneusement introduit dans le pycnomètre. L'ensemble est ensuite pesé (M_2). Le pycnomètre est ensuite rempli d'eau distillée et sera placé sur une plaque chauffante pendant une heure.

Une fois tout est désaéré, placé le bouchon avec son tube repère sur le ballon du pycnomètre, compléter le remplissage avec de l'eau distillé jusqu'au repère, au bout de 30 min, le pycnomètre est séché superficiellement et pesé (M_3).

Vider et nettoyer le pycnomètre et le remplir avec de l'eau distillé jusqu'au repère du bouchon, au bout de 30 min, le niveau est à nouveau mis en coïncidence avec le repère, essuyer l'ensemble, et le peser (M_4)

La masse volumique des particules solides est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_s = \frac{\rho_w (m_2 - m_1)}{m_4 + m_2 - m_1 - m_3} \quad (\text{IV.1})$$

avec :

- m_1 : la masse du pycnomètre vide
- m_2 : la masse du pycnomètre + échantillon ;
- m_3 : la masse du pycnomètre + eau distillé + échantillon ;
- m_4 : la masse du pycnomètre + eau distillé ;
- ρ_w : la masse volumique de l'eau = 1000 Kg/m³.

Tableau IV.9. Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique des particules solides

m_1	m_2	m_3	m_4	ρ_w (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)
435.39	485.77	1141.29	1110.31	1	2.597

IV.4.5. Détermination de la masse volumique sèche (NF P 94-064)

La masse volumique humide est déterminée par pesée hydrostatique (avec échantillon paraffiné) selon la norme NF P94-064 (masse volumique des sols fins).

IV.4.5.1. Définition et but de l'essai

Le but de l'essai est de déterminer la compacité et la porosité d'un échantillon.

IV.4.5.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer la masse volumique sèche d'un échantillon de roche par pesée, ensuite déterminer son volume total (apparent), également par pesées à l'aire libre et dans l'eau (pesée hydrostatique).

IV.4.5.3. Appareillage

L'appareillage nécessaire, est :

- une étuve ;
- une balance de précision et son équipement pour pesées hydrostatiques ;
- un bac à paraffine avec son système de chauffage ;
- un récipient d'eau.



Figure IV.13. La pesée hydrostatique

IV.4.5.4. Exécution de l'essai

L'échantillon est brossé pour éliminer les particules facilement détachables, il est ensuite séché à l'étuve et pesé par la suite, puis paraffiné totalement sur sa surface extérieure, il sera ensuite pesé

Après avoir passé les étapes précédentes il sera pesé dans l'eau (pesé hydrostatique).



Figure IV.14. Les trois échantillons paraffinés

Pour cet essai 3 échantillons ont été pris, et les différentes masses et volumes sont déterminées avec les formules suivantes :

$$\bullet \quad V_p = \frac{(M_{ep} - M_e)}{\rho_p} \quad (IV.2)$$

$$\bullet \quad V_{ep} = \frac{M_{ep} - M'_{ep}}{\rho_w} \quad (IV.3)$$

$$\bullet \quad V = \frac{M_{ep} - M'_{ep}}{\rho_w} - \frac{(M_{ep} - M'_{ep})}{\rho_p} \quad (IV.4)$$

$$\bullet \quad \rho_d = \frac{M_e}{\frac{M_{ep} - M'_{ep}}{\rho_w} - \frac{(M_{ep} - M_e)}{\rho_p}} \quad (IV.5)$$

avec :

- V_p : le volume de la paraffine ;
- V_{ep} : le volume de l'échantillon paraffiné ;
- V : le volume total de l'échantillon ;
- ρ_d : la masse volumique sèche ;
- ρ_w : la masse volumique de l'eau (1g/cm^3) ;
- ρ_p : la masse volumique de la paraffine (0.88g/cm^3) ;
- M_{ep} : la masse de l'échantillon paraffiné ;
- M'_{ep} : la masse de l'échantillon paraffiné immergé ;
- M_e : la masse de l'échantillon.

Tableau IV.10. Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique sèche

	M ₁	M ₂	M ₃
Masse de l'échantillon (g)	199.67	138.90	176.60
Masse de l'échantillon paraffiné à l'aire (g)	223.33	148.96	185.06
Masse de l'échantillon paraffiné immergé (g)	99.7	68.2	88.3
Masse de la paraffine (g)	23.66	10.06	8.46
Volume de la paraffine (cm³)	26.85	11.43	9.61
Volume de l'échantillon paraffiné (cm³)	123.63	80.76	96.76
Volume total de l'échantillon sec (cm³)	96.78	69.33	87.15
Masse volumique sèche (ρ_d) (g/cm³)	2.06	2.00	2.03

La moyenne des masses volumiques est : 2.03 g/cm³.

IV.4.6. Essai au bleu de Méthylène (VBS) (NF P 94-068)

Il est aussi appelé essai à la tâche, C'est un essai simple et rapide. Cet essai (NF P 94-068) est une mesure indirecte de la surface spécifique des grains solides par absorption d'une solution de bleu de méthylène jusqu'à la saturation.

IV.4.6.1. Le but de l'essai

Les minéraux argileux présents dans les sols sont principalement issus de l'altération physicochimique des roches. La structure cristalline feuilletée des argiles leur confère un ensemble de propriétés de comportement lié à leur affinité pour l'eau (appelée activité), ce qui entraîne les phénomènes de gonflements, de plasticité et de cohésion constatés sur ces sols.

IV.4.6.2. Le principe de l'essai

L'essai au bleu de méthylène permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction argileuse d'un sol en mesurant la surface interne et externe des grains argileux. Pour ce faire, on fixe, sur les grains d'argile, des molécules de bleu de méthylène et par un test simple, on évalue la quantité de bleu fixé. On en déduit la valeur au bleu du sol où VBS ; qui est un indicateur essentiel dans la classification des sols concernés pour les travaux de terrassements et les sols destinés aux assises des chaussées ...

IV.4.6.3. Le matériel nécessaire

Le matériel nécessaire, est :

- une balance de précision ;
- un chronomètre ;
- bécher en plastique ou en verre ;
- un agitateur mécanique à ailettes ayant une vitesse de rotation couvrant au moins la plage de 400 tr/min à 700 tr/min ;
- un récipient cylindrique (en verre, plastique, métal inoxydable) d'une capacité minimale de 3000 cm³ et de diamètre intérieur (155 ± 10) mm ;
- burette de 50 ml, ou une burette automatique ;
- papier filtre blanc ;
- baguette de verre de 8 mm de diamètre et 300 mm environ de longueur ;
- solution de bleu de méthylène qualité médicinale à 10 g/l plus ou moins 0.01 g/l (durée d'utilisation : 1 mois maximum) ;
- eau distillé.



Figure IV.15. Exécution de l'essai VBS

IV.4.6.4. Conduite de l'essai

L'essai est effectué sur la fraction granulométrique 0/5 mm du matériau. En effet, ce sont principalement les éléments les plus fins (inférieurs à 2 μm) qui contiennent la fraction argileuse. Celle-ci donne l'essentiel de la réaction au bleu de méthylène et exprime donc de manière quantifiée la sensibilité du sol à l'eau.

L'échantillon est mis à tremper dans 500 ml d'eau déminéralisée et dispersé avec un agitateur à ailettes tournant à 700 ± 100 tr/min pendant au moins cinq minutes, et jusqu'à disparition de tout agglomérat de matériaux. Le tout est maintenu en agitation permanente, pendant toute la durée de l'essai, à une vitesse de 400 ± 100 tr/min.

Le dosage consiste à injecter successivement des doses bien déterminées de bleu de méthylène dans la suspension de sol, jusqu'à atteindre la saturation des particules d'argile. Le test de la tache permet de repérer l'instant de cette saturation. On prélève une goutte de liquide dans le bécher contenant le sol imbibé de bleu, et on dépose celle-ci sur le papier filtre maintenu horizontalement en l'air (diamètre du dépôt compris entre 8 et 12 mm).

Si la tâche centrale est entourée d'une auréole bleu 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 ;

Si la tâche est entourée d'une auréole humide incolore, le test est négatif. Dans ce cas, on ajoute du bleu de méthylène par prises de 5 cm³ jusqu'à ce que le test soit positif. On répète l'essai à l'identique, cinq fois à intervalle d'une minute pour le confirmer.



Figure IV.16. Observations de taches de l'essai VBS

La valeur du VBS est calculée avec la formule suivante :

$$\text{VBS} = \frac{M_B \times V_B}{M} \times 100 \quad (\text{IV.6})$$

Avec :

- M_B : la masse du bleu de méthylène introduite dans le bécher ;
- V_B : le volume du bleu de méthylène (0.01g) ;
- M : la masse de l'échantillon.

Donc : $\text{VBS} = 7.4$

La classification est faite en utilisant le Tableau IV.11:

Tableau IV.11. Classement de la valeur du VBS

La valeur du VBS	Commentaire
$VBS < 0.1$	Sol insensible ou peu sensible à l'eau
$0.1 < VBS < 0.2$	Apparition de la sensibilité à l'eau
$0.2 < VBS < 1.5$	Sol sablo-argileux
$1.5 < VBS < 2.5$	Sol sablo-limoneux (moyennement plastique)
$2.5 < VBS < 6$	Sol limoneux
$6 < VBS < 8$	Sol argileux
$VBS > 8$	Sol très argileux

En classant la valeur du VBS, on conclut que c'est : un sol argileux.

IV.5. Analyse granulométrique des grains de caoutchouc

Après le broyage du flanc d'un pneu, une analyse granulométrique est nécessaire pour connaître la répartition des pourcentages des tamisats des grains qui seront utilisés dans les essais du chapitre V.

Les résultats de l'analyse granulométrique, sont donnés dans le Tableau IV.12 :

Tableau IV.12. Résultats de l'analyse granulométrique des grains de caoutchouc

tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisats cumulés (%)
8	0	0	0	100
5	143	143	29.18	70.82
4	226	369	75.31	24.69
2.5	98	467	95.31	4.69
1.25	20	487	99.39	0.61

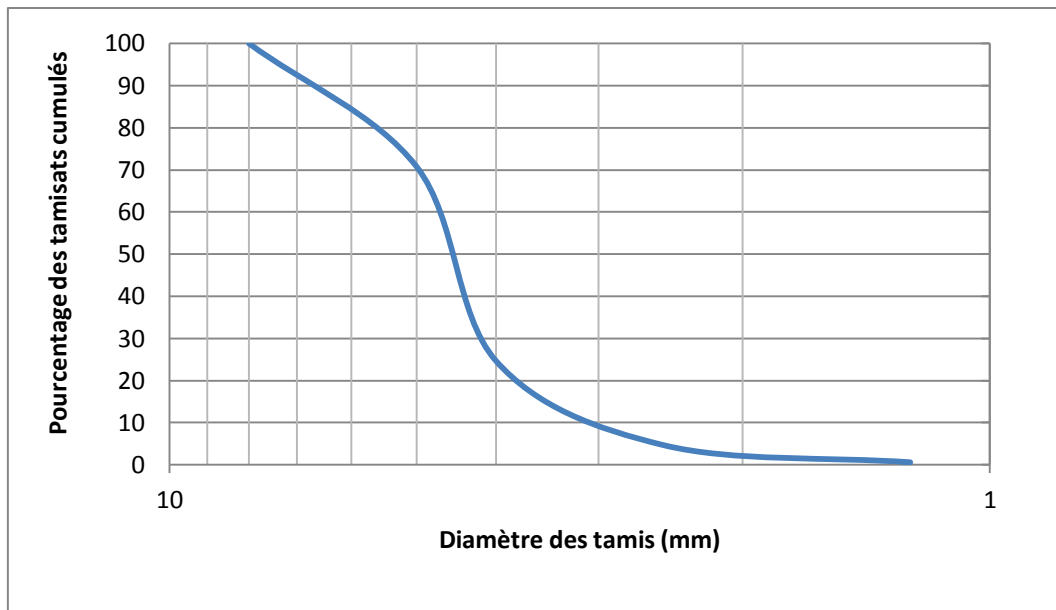


Figure IV.17. Courbe granulométrique des granulats de caoutchouc

IV.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'identification du matériau étudié. Les essais d'identification nous permettent de classer le sol en fonction de sa granulométrie, sa plasticité, ... etc.

D'après les résultats des essais réalisés au niveau du laboratoire de mécanique des sols du département du génie civil, on a conclu que le sol étudié dans ce mémoire est, une argile très plastique.

Dans le chapitre suivant, on va étudier l'influence d'ajout des granulats de caoutchouc issus des pneumatiques usagés, sur les caractéristiques mécaniques du matériau étudié, en réalisant deux types d'essais : essais Proctor et cisaillement.



Chapitre V

Les essais mécaniques réalisés

V.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, les différents essais mécaniques réalisés, dans le but d'étudier l'effet d'ajout des granulats de caoutchouc, issus du broyage de pneumatiques usagés sur les propriétés de compactage et la résistance au cisaillement du sol étudié.

L'étude expérimentale a été réalisée au niveau du laboratoire de mécanique des sols, du département de génie civil, à l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

V.2. Le compactage des matériaux

V.2.1. Définition du compactage

Le compactage est une réduction de volume du sol presque instantanée due à la réduction des vides remplis d'air. Plus les grains seront resserrés les uns contre les autres, meilleure sera la résistance du sol au cisaillement et meilleur sera le comportement des remblais et couches de chaussées ; on recherche donc l'indice des vides le plus petit possible (correspondant au pic de la courbe Proctor) [CORREA. et al., 2000].

Le compactage améliore les propriétés mécaniques du sol remanié. Il complète l'effet de stabilisation par remplissage des vides par le liant. Le liant augmente la rigidité (répartition des charges) et diminue l'attrition des gros éléments.

En général, après le compactage, le sol acquiert :

- une augmentation de la densité sèche (γ_d/γ_w) ;
- une augmentation de la capacité portante ;
- une augmentation de la résistance au cisaillement ;
- une diminution de la perméabilité ;
- une diminution de la compressibilité.

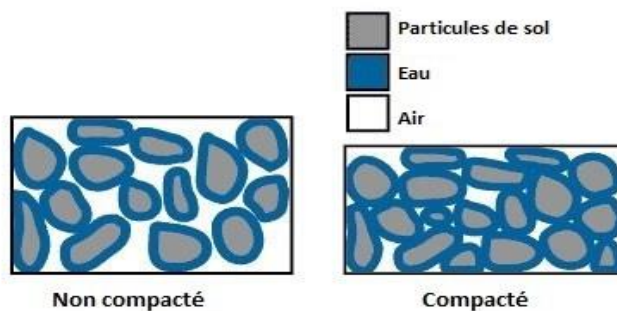


Figure V.1. Différents états d'un sol

V.2.2. Rôle du compactage sur la durée de vie des ouvrages

Le compactage met le matériau dans un état suffisamment serré de telle sorte qu'un tassement ultérieur soit impossible ou peu important. Les mouvements relatifs sont réduits ou supprimés, diminuant ainsi l'attrition. En réduisant le volume des vides, le compactage augmente la densité apparente sèche et diminue la perméabilité qui est fonction de l'indice des vides.

Le compactage entraîne une élévation des caractéristiques mécaniques. En effet, le resserrement des grains augmente le nombre de contacts entre eux et par conséquent leur frottement. L'angle de frottement interne et la cohésion en sont accrus. Il y a également augmentation considérable du module de déformation [ARQUIE. et al., 1988].

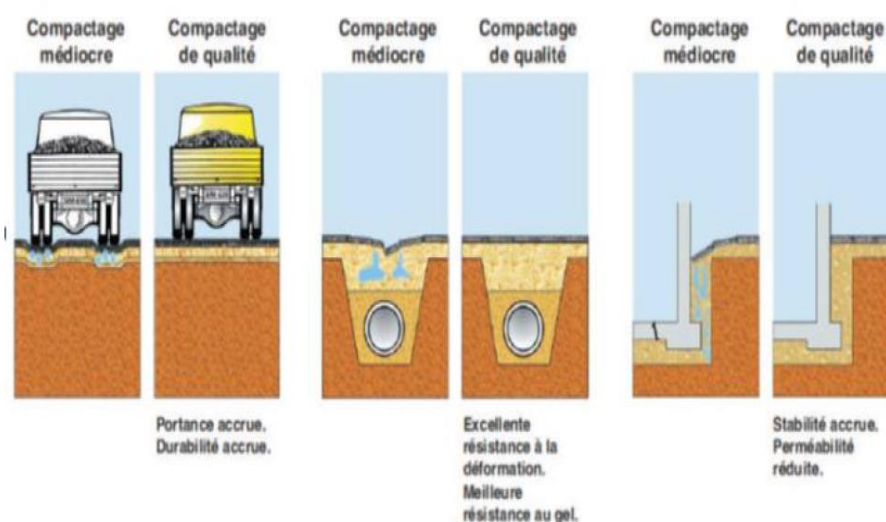


Figure V.2. Les objectifs du compactage

V.3. Les paramètres qui influent sur le compactage

Proctor a montré que le compactage est fonction de quatre paramètres : la masse volumique du sol sec, la teneur en eau, l'énergie du compactage et le type de sol (granulométrie, minéralogie, ...).

V.3.1. La teneur en eau

C'est en 1933 que l'ingénieur américain PROCTOR mit en évidence l'influence de la teneur en eau et de l'énergie de compactage sur le poids spécifique sec d'un sol grâce à l'essai qui porte son nom : Essai Proctor.

En effet pour une énergie de compactage donnée, si l'on fait varier la teneur en eau w d'un échantillon de sol et l'on représente graphiquement la variation du poids spécifique sec Q en

fonction de cette teneur en eau, on obtient une courbe en cloche qui représente un optimum appelé Optimum Proctor.

Ce phénomène s'explique aisément ; Lorsque la teneur en eau est élevée (partie droite de la courbe), l'eau absorbe une partie importante de l'énergie de compactage sans aucun profit de plus elle occupe la place des grains solides (aucun tassement possible). Par contre pour des teneurs en eau raisonnable, l'eau joue un rôle lubrifiant non négligeable et la densité sèche augmente avec la teneur en eau (partie gauche de la courbe).

V.3.2. La nature du matériau

Le comportement et les sollicitations développés par les matériaux sont plus ou moins fonction de leur nature. De façon générale, la courbe Proctor est très aplatie pour les sables et par contre présente un maximum très marqué pour les argiles plastiques.

Pour les matériaux à courbe Proctor aplatie, le compactage est peu influencé par la teneur en eau. Ces matériaux sont peu sensibles à l'eau mais il est souvent difficile d'améliorer leurs caractéristiques (énergie de compactage à fournir plus importante).

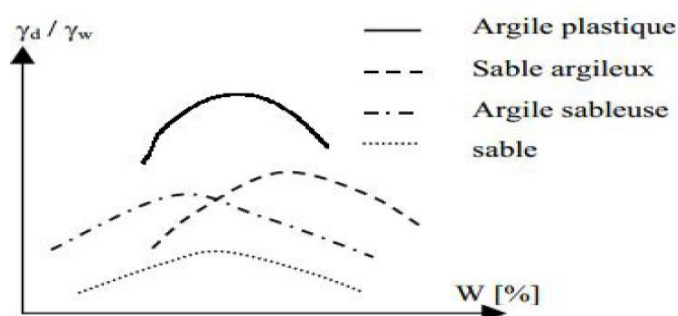


Figure V.3. Influence de la nature du matériau

V.3.3. L'énergie de compactage

Des études réalisées, montrent que la densité sèche après compactage augmente avec la charge de la roue et la pression de gonflage. D'après ses études on remarque que la réponse des matériaux granulaires aux sollicitations cycliques qui n'atteignent pas les charges de rupture peut être de trois types :

- adaptation: l'énergie dissipée et la déformation permanente sont nulles. La réponse du matériau est réversible et élastique ;

- accommodation : les déformations permanentes sont stabilisées et l'énergie dissipée n'est pas nulle (phénomène d'hystérésis). La réponse réversible est non linéaire ;
- rochet: l'énergie dissipée et les déformations permanentes augmentent avec la sollicitation jusqu'à la stabilisation ou la rupture (déformation plastique).

V.3.4. L'angularité, la forme, la granularité et le pourcentage des fines

L'Angularité, la forme, la granularité et le pourcentage des fines des matériaux très anguleux se mettent difficilement en place entraînant l'augmentation de l'énergie de compactage.

[MACHET J .M., 1980] trouve que pour une énergie de compactage donnée, l'indice des vides décroît avec le pourcentage d'éléments fins (< 80um).

V.3.5. Sol support

Pour une même épaisseur de matériau, un support plus rigide conduit à des densités plus élevées.

Les sollicitations développées par un rouleau vibrant sont considérablement influencées par les caractéristiques du sol-support.

V.4. Les essais de compactage en laboratoire

Un échantillon de sol, de teneur en eau connue, est compacté dans un moule, aux dimensions normalisées, par l'action de la chute d'une dame. Le poids et la hauteur de chute de cette dernière sont également normalisés. La teneur en eau du sol testé est maîtrisée en étuvant l'échantillon, puis par adjonctions de quantités précises d'eau. Une série d'essais est réalisée pour différents teneurs en eau, le résultat de chacun produisant un couple de valeurs

(W, γ_d) , donc un point de la courbe de compactage. Les essais peuvent être réalisés dans deux types de moules, et selon deux modalités, ce qui fait quatre types d'essais. D'autres types, moins couramment utilisés existent également.

On peut utiliser :

- Le moule Proctor 10,2cm de diamètre et 11,7 cm de hauteur (plus un collier mobile permettant de compacter jusqu'à 13 ou 14 cm). Ce moule est utilisé pour les sols de granulométrie < 5mm, on y compacte environ 3 kg de sol.
- Le moule C.B.R. (California Bearing Ration) 15,2 cm de diamètre et 15,2 cm de hauteur. Convient pour des sols contenant des éléments >5mm. Si le sol contient

des éléments >20mm, ceux-ci sont remplacés, à poids égal, par des éléments de 5 à 20mm. L'échantillon est ici de 6kg.

Dans ce chapitre les essais ont été réalisés avec l'essai Proctor normal

V.5. Essai Proctor normal (NF P 94-093)

L'essai Proctor est un essai géotechnique mis au point par l'ingénieur Américain Ralph R Proctor en 1933, qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité maximale sèche d'un sol par compactage à énergie fixe.

V.5.1. Le but de l'essai

L'essai Proctor est un essai de compactage en laboratoire. Il a pour objectif de déterminer la teneur en eau optimale (quantité d'eau adéquate) permettant d'atteindre la densité sèche maximale du matériau compacté.

V.5.2. Principe de l'essai

L'essai Proctor, consiste à prendre plusieurs échantillons du matériau à étudier. Humidifier ces échantillons à des teneurs en eau différentes augmentées (selon la sensibilité à l'eau du matériau). Compacter ensuite ces échantillons humides dans un moule, à l'aide d'une dame selon un processus bien défini. Les teneurs en eau et les masses volumiques sèches des éprouvettes compactées sont déterminées et portées sur un graphique. La courbe obtenue, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique sèche du matériau correspondant à une valeur particulière de la teneur en eau. Ces deux valeurs sont appelées caractéristiques optimales de compactage.

V.5.3. Matériel nécessaire

Le matériel nécessaire pour l'essai Proctor, est le suivant :

- moule Proctor ;
- dame Proctor ;
- un bac ;
- une truelle ;
- une balance électronique ;
- une règle à araser ;
- un cric ;
- une étuve.



Figure V.4. Matériaux de l'essai Proctor

V.5.4. Le mode opératoire

L'ensemble du matériau nécessaire à l'essai est séché à l'air ou dans une étuve à 50°C jusqu'à un état hydrique jugé suffisamment sec avant de commencer l'essai, ensuite il sera concassé par un broyeur et il sera tamisé, seul le tamisât est conservé pour l'essai.

L'échantillon sera humidifié à des teneurs en eau différentes puis homogénéisé, puis divisé par appréciation visuelle en trois échantillons. Le compactage se fait en trois couches d'épaisseurs égales. Après avoir compacté la dernière couche, et retiré la rehausse, le matériau doit dépasser le bord du moule de 1 à 2 cm au maximum. Cet excédent est arasé soigneusement au niveau du moule. Si des grains sont arrachés en laissant des vides à la surface de l'éprouvette, combler ceux-ci avec des éléments plus fins et lisser la surface de l'éprouvette.

Démouler l'éprouvette, déterminer le poids humide et la mettre à l'étuve pour déterminer le poids sec. Ces opérations sont répétées pour tous les échantillons compactés.



Figure V.5. Extraction d'une éprouvette avec un cric

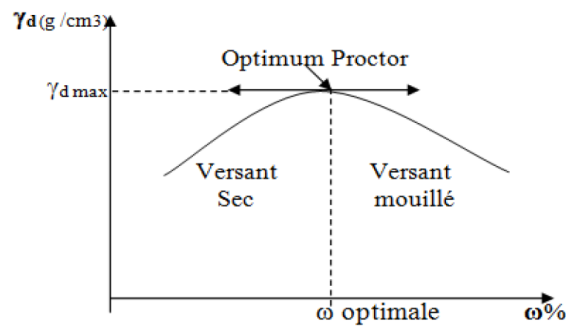


Figure V.6. Forme de la courbe Proctor

V.5.5. Les calculs

$$\bullet \quad W = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{V.1})$$

avec :

- ✓ W : la teneur en eau (%) ;
- ✓ M_h : la masse humide (g) ;
- ✓ M_s : la masse sèche (g).

$$\bullet \quad \rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (\text{V.2})$$

avec :

- ✓ ρ_d : la masse volumique sèche (g/cm^3) ;
- ✓ M_s : la masse sèche.

V.6. Essais Proctor réalisés

V.6.1. Essai Proctor sans ajout

Le tableau suivant montre la variation de la teneur en eau en fonction de la masse volumique sèche de l'argile à l'état naturel.

Tableau V.1. Les résultats de l'essai Proctor (sans ajout)

La teneur en eau W (%)	La masse humide (M_h) (g)	La masse sèche (M_s) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)
8%	1605	1507	6.50	1.596
10%	1701	1578	7.79	1.672
12%	1757	1599	9.88	1.694
14%	1812	1625	11.51	1.721
16%	1850	1629	13.57	1.726
18%	1868	1590	17.48	1.684
20%	1862	1563	19.13	1.656

V.6.2. Ajout de 2 % de caoutchouc

Le tableau suivant montre la variation de la teneur en eau en fonction de la masse volumique sèche de l'argile avec ajout de 2% de caoutchouc.

Tableau V.2. Les résultats de l'essai Proctor (avec ajout de 2% de caoutchouc)

La teneur en eau W (%)	La masse humide (M_h) (g)	La masse sèche (M_s) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)
10%	1530	1359	12.58	1.440
12%	1547	1368	13.08	1.449
14%	1557	1373	13.40	1.454
16%	1569	1360	15.37	1.441

V.6.3. Ajout de 4% de caoutchouc

Le tableau suivant montre la variation de la teneur en eau en fonction de la masse volumique sèche de l'argile avec ajout de 4% de caoutchouc.

Tableau V.3. Les résultats de l'essai Proctor (ajout de 4% de caoutchouc)

La teneur en eau W (%)	La masse humide (M_h) (g)	La masse sèche (M_s) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)
8%	1532	1410	8.65	1.494
10%	1500	1365	9.89	1.446
12%	1562	1389	12.46	1.471
14%	1565	1374	13.90	1.456
16%	1591	1375	15.71	1.457

V.6.4. Ajout de 6% de caoutchouc

Le tableau suivant montre la variation de la teneur en eau en fonction de la masse volumique sèche de l'argile avec ajout de 6% de caoutchouc.

Tableau V.4. Les résultats de l'essai Proctor (avec ajout de 6% de caoutchouc)

La teneur en eau W (%)	La masse humide (M_h)	La masse sèche (M_s)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)
8%	1503	1391	8.05	1.474
10%	1562	1414	10.47	1.498
12%	1581	1416	11.65	1.500
14%	1590	1412	12.60	1.496
16%	1603	1406	14.01	1.489

V.7. Essai de cisaillement (NF P 94- 071-1)

L'essai de cisaillement direct a pour objet de mesurer les caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol fin saturé, soumis à un cisaillement direct selon un plan imposé, à une vitesse constante [ROBITAILLE. et al., 1997].

V.7.1. But de l'essai

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 autre à déterminer la contrainte admissible par le sol dans le cas de fondations superficielles et la poussée du sol sur un mur de soutènement.

V.7.2. Principe de l'essai

L'échantillon de sol à étudier est placé entre deux demi-boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre.

Un piston permet d'exercer sur le sol une contrainte normale.

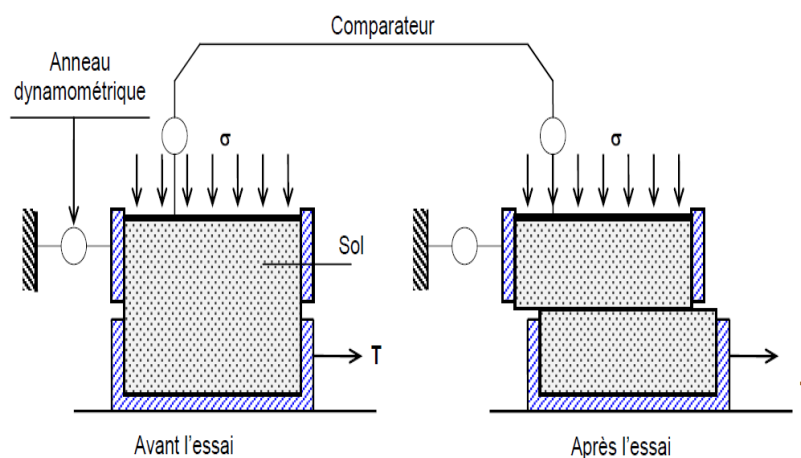


Figure V.7. Schéma de la boîte de cisaillement

La demi-boîte inférieure est entraînée horizontalement à vitesse constante. La force totale de cisaillement F est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-boîte supérieure.

Un comparateur mesure la déformation verticale de l'échantillon, ce dernier subit donc un cisaillement direct et rectiligne suivant un plan imposé sur lequel on exerce une contrainte normale déterminée [LCPC., 1987].

V.7.3. Déroulement de l'essai

V.7.3.1. Mise en place de l'échantillon dans la boîte

Les deux demi-boîtes étant verrouillées, on place successivement :

- le fond de boîte ;
- une pierre poreuse ;

- une plaque striée, les stries étant perpendiculaires au sens de cisaillement.(les plaques perforées permettent les essais drainés, les plaques pleines sont utilisées pour les essais non drainés) ;
- l'échantillon de sol ;
- une plaque striée identique à la première ;
- une pierre poreuse ;
- le piston.

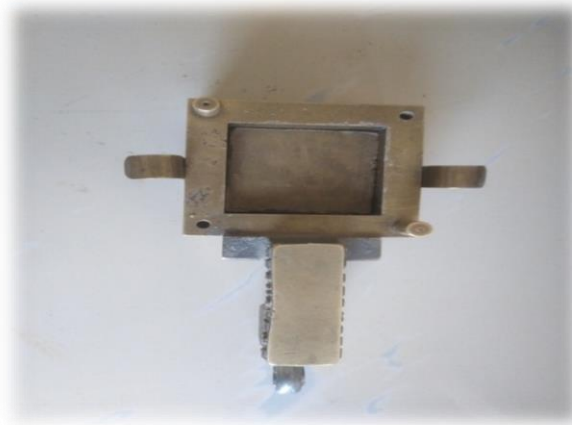


Figure V.8. Mise en place de l'échantillon dans la boîte

V.7.3.2. Mise en place de la boîte sur la machine

La procédure à suivre, est la suivante :

- 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 ;
- désolidariser les deux demi-boîtes en enlevant les goupilles ;
- mettre en route à la vitesse désirée.

V.7.3.3. Vitesse d'essai

- sols pulvérulents : 1,5 mm/min ;
- sols cohérents :
 - ✓ essais non drainés, consolidés ou non (UU ou CU) : 1,5 mm/min ;
 - ✓ essais drainé (CD) : la vitesse la plus lente.

V.7.3.4. Lectures

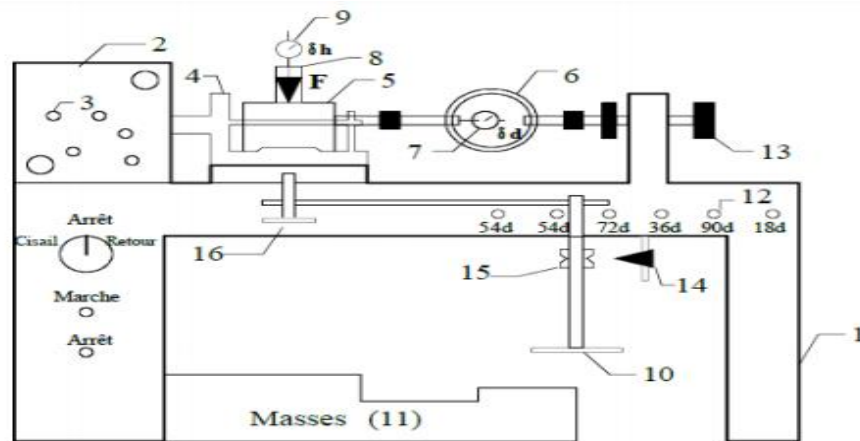
- lire, à intervalles réguliers (toutes les 15 secondes) les indications du comparateur de l'anneau, éventuellement du comparateur de déplacement horizontal et du comparateur vertical ;
- arrêter l'essai lorsque la contrainte de cisaillement est devenue constante ou lorsqu'on a une déformation horizontale de 10 % environ.

V.7.3.5. Fin de l'essai

- enlever les poids du plateau de charge ;
- débloquer l'anneau dynamométrique ;
- enlever la boîte du chariot et sortir l'éprouvette de la boîte ;
- mesurer le poids spécifique final ;
- déterminer la teneur en eau de l'échantillon ;
- nettoyer soigneusement les pierres poreuses et la boîte.



Figure V.9. L'éprouvette après cisaillement



- 1 : Bâti de la machine
 2 : Bloc moteur
 3 : Axes supports de pignons
 4 : Partie mobile du bâti, support de la boîte
 5 : Boîte de cisaillement
 6 : Anneau dynamométrique
 7 : Comparateur de déf. de l'anneau
 8 : Etrier de chargement
 9 : Mesure de δh
 10 : Plateau supportant les masses
 12 : Pignons en attente
 13 : Volant d'approche de l'anneau
 14 : Pointeau
 15 : Bague de contrôle
 16 : Volant de réglage

Figure V.10. Schéma de la machine de cisaillement

V.7.4. Les calculs

Pour trouver la contrainte tangentielle, les formules à utiliser sont :

$$T = 0.194 \times l_a \quad (V.3)$$

avec :

- 0.194 : le coefficient de la machine ;
- l_a : les lectures horizontales du comparateur.

$$S_c = L \times (L - \Delta L) \quad (V.4)$$

avec :

- L : la longueur de l'éprouvette (cm) = 6cm ;
- ΔL : le déplacement horizontal (mm).

$$\tau = \frac{T}{S_c} \times 100 = \frac{la \times 0.194}{L \times (L - \Delta L)} \times 100 \quad (\text{V.5})$$

avec :

- S_c : la section corrigée;
- T : la force nette;
- τ : la contrainte tangentielle.

V.7.5. Les caractéristiques mécaniques

Les pics obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau V.5. Les pics des différents chargements

	100 Kpa	200 Kpa	300 Kpa
Sans ajout	143.419	240.105	340.031
2%	197.309	353.836	512.521
4%	211.469	390.429	554.980
6%	220.346	415.324	610,235

V.7.5.1. Les calculs

La cohésion (C) est déterminée à partir du graphe, et l'angle de frottement est calculé comme suit :

$$\tau_{\max} = C + \sigma \tan \varphi \quad (\text{V.6})$$

$$\text{Tang} \varphi = \frac{(\tau_{2\max} - \tau_{1\max}) - C}{\sigma_1} \quad (\text{V.7})$$

avec :

- C : la cohésion ;
- σ_1 : la contrainte normale ;
- φ : l'angle de frottement ;
- τ : la contrainte tangentielle.

V.7.5.2. Présentation des résultats

Tableau V.6. Résultats du cisaillement sans ajout à 1 bar

Δ_L	l_a	T	S_c	τ
0	0	0	0	0
0,025	42	8,148	35,85	22,7280335
0,05	59	11,446	35,7	32,0616246
0,075	66	12,804	35,55	36,0168776
0,1	72	13,968	35,4	39,4576271
0,125	79	15,326	35,25	43,4780142
0,15	85	16,49	35,1	46,980057
0,175	90	17,46	34,95	49,9570815
0,2	94	18,236	34,8	52,4022989
0,225	100	19,4	34,65	55,988456
0,25	106	20,564	34,5	59,6057971
0,275	111	21,534	34,35	62,6899563
0,3	116	22,504	34,2	65,8011696
0,325	121	23,474	34,05	68,9397944
0,35	127	24,638	33,9	72,6784661
0,375	133	25,802	33,75	76,4503704
0,4	137	26,578	33,6	79,1011905
0,425	142	27,548	33,45	82,3557549
0,45	148	28,712	33,3	86,2222222
0,475	153	29,682	33,15	89,5384615
0,5	157	30,458	33	92,2969697
0,525	162	31,428	32,85	95,6712329
0,55	168	32,592	32,7	99,6697248
0,575	173	33,562	32,55	103,109063
0,6	181	35,114	32,4	108,376543
0,625	184	35,696	32,25	110,685271
0,65	186	36,084	32,1	112,411215
0,675	189	36,666	31,95	114,760563
0,7	196	38,024	31,8	119,572327
0,725	201	38,994	31,65	123,203791
0,75	207	40,158	31,5	127,485714
0,775	211	40,934	31,35	130,570973
0,8	215	41,71	31,2	133,685897
0,825	219	42,486	31,05	136,830918
0,85	222	43,068	30,9	139,378641
0,875	224	43,456	30,75	141,320325
0,9	224	43,456	30,6	142,013072

0,925	224	43,456	30,45	142,712644
0,95	224	43,456	30,3	143,419142
0,975	222	43,068	30,15	142,054856
1	218	42,292	30	140,528765
1,025	211	40,934	29,85	136,245896
1,05	206	39,964	29,7	131,387952
1,075	192	37,248	29,55	127,141569
1,1	186	36,084	29,4	125,986325
1,125	180	34,92	29,25	119,255623
1,15	172	33,368	29,1	101,215563
1,175	161	31,234	28,95	98,489525
1,2	153	29,682	28,8	93,574882
1,225	139	26,966	28,65	85,254544
1,25	120	23,28	28,5	80,558425

Tableau V.7. Résultats du cisaillement sans ajout à 2 bar

Δ_L	I_a	T	S_c	τ
0	0	0	0	0
0,025	82	15,908	35,85	44,3737796
0,05	132	25,608	35,7	71,7310924
0,075	169	32,786	35,55	92,2250352
0,1	181	35,114	35,4	99,1920904
0,125	192	37,248	35,25	105,668085
0,15	207	40,158	35,1	114,410256
0,175	219	42,486	34,95	121,562232
0,2	230	44,62	34,8	128,218391
0,225	242	46,948	34,65	135,492063
0,25	251	48,694	34,5	141,142029
0,275	258	50,052	34,35	145,71179
0,3	264	51,216	34,2	149,754386
0,325	271	52,574	34,05	154,402349
0,35	276	53,544	33,9	157,946903
0,375	288	55,872	33,75	165,546667
0,4	309	59,946	33,6	178,410714
0,425	334	64,796	33,45	193,710015
0,45	350	67,9	33,3	203,903904
0,475	362	70,228	33,15	211,84917
0,5	376	72,944	33	221,042424
0,525	388	75,272	32,85	229,138508
0,55	395	76,63	32,7	234,342508

0,575	399	77,406	32,55	237,806452
0,6	401	77,794	32,4	240,104938
0,625	394	76,436	32,25	237,010853
0,65	386	74,884	32,1	233,283489
0,675	372	72,168	31,95	225,877934
0,7	359	69,646	31,8	219,012579
0,725	333	64,602	31,65	204,113744
0,75	317	61,498	31,5	195,231746
0,775	312	60,528	31,35	193,07177
0,8	305	59,17	31,2	189,647436
0,825	297	57,618	31,05	185,565217
0,85	290	56,26	30,9	182,071197
0,875	282	54,708	30,75	177,912195
0,9	276	53,544	30,6	174,980392
0,925	267	51,798	30,45	170,108374
0,95	255	49,47	30,3	163,267327
0,975	243	47,142	30,15	156,358209
1	232	45,008	30	150,026667
1,025	228	44,232	29,85	148,180905
1,05	221	42,874	29,7	144,356902
1,075	216	41,904	29,55	141,807107
1,1	210	40,74	29,4	138,571429
1,125	201	38,994	29,25	133,312821
1,15	194	37,636	29,1	129,333333
1,175	190	36,86	28,95	127,322971
1,2	187	36,278	28,8	125,965278
1,225	185	35,89	28,65	125,270506
1,25	183	35,502	28,5	124,568421
1,275	181	35,114	28,35	123,858907
1,3	179	34,726	28,2	123,141844
1,325	177	34,338	28,05	122,417112
1,35	176	34,144	27,9	122,379928
1,375	174	33,756	27,75	121,643243
1,4	172	33,368	27,6	120,898551
1,425	169	32,786	27,45	119,43898
1,45	168	32,592	27,3	119,384615

Tableau V.8. Résultats du cisaillement sans ajout à 3 bar

Δ_L	I_a	T	S_c	τ
0	0	0	0	0
0,025	119	23,086	35,85	64,3960948
0,05	167	32,398	35,7	90,7507003
0,075	207	40,158	35,55	112,962025
0,1	246	47,724	35,4	134,813559
0,125	290	56,26	35,25	159,602837
0,15	324	62,856	35,1	179,076923
0,175	353	68,482	34,95	195,942775
0,2	381	73,914	34,8	212,396552
0,225	401	77,794	34,65	224,513709
0,25	416	80,704	34,5	233,924638
0,275	431	83,614	34,35	243,417758
0,3	444	86,136	34,2	251,859649
0,325	455	88,27	34,05	259,236417
0,35	464	90,016	33,9	265,533923
0,375	472	91,568	33,75	271,312593
0,4	475	92,15	33,6	274,255952
0,425	479	92,926	33,45	277,80568
0,45	482	93,508	33,3	280,804805
0,475	501	97,194	33,15	293,19457
0,5	524	101,656	33	308,048485
0,525	543	105,342	32,85	320,675799
0,55	556	107,864	32,7	329,859327
0,575	560	108,64	32,55	333,763441
0,6	560	108,64	32,4	335,308642
0,625	560	108,64	32,25	336,868217
0,675	560	108,64	31,95	340,031299
0,7	556	107,864	31,8	336,845215
0,725	551	106,894	31,65	332,021578
0,75	546	105,924	31,5	328,210256
0,775	540	104,76	31,35	325,965821
0,8	534	103,596	31,2	321,326589
0,825	527	102,238	31,05	318,554812
0,85	520	100,88	30,9	315,020154
0,875	509	98,746	30,75	310,547896
0,9	496	96,224	30,6	304,032659
0,925	485	94,09	30,45	295,148753
0,95	471	91,374	30,3	290,698963
0,975	459	89,046	30,15	284,010548

1	443	85,942	30	276,996593
1,025	431	83,614	29,85	267,459416
1,05	419	81,286	29,7	259,479853
1,075	406	78,764	29,55	252,47863
1,1	388	75,272	29,4	250,985235
1,125	380	73,72	29,25	247,364554
1,15	372	72,168	29,1	240,995231
1,175	366	71,004	28,95	230,578221

Tableau V.9. Résultats du cisaillement avec ajout 2% de caoutchouc à 1 bar

Δ_L	l_a	T	S_c	τ
0	0	0	0	0
0,025	30	5,82	35,85	16,2343096
0,05	57	11,058	35,7	30,9747899
0,075	80	15,52	35,55	43,6568214
0,1	104	20,176	35,4	56,9943503
0,125	133	25,802	35,25	73,1971631
0,15	160	31,04	35,1	88,4330484
0,175	180	34,92	34,95	99,9141631
0,2	202	39,188	34,8	112,609195
0,225	223	43,262	34,65	124,854257
0,25	246	47,724	34,5	138,330435
0,275	268	51,992	34,35	151,359534
0,3	283	54,902	34,2	160,532164
0,325	289	56,066	34,05	164,657856
0,35	295	57,23	33,9	168,820059
0,375	300	58,2	33,75	172,444444
0,4	306	59,364	33,6	176,678571
0,425	313	60,722	33,45	181,530643
0,45	317	61,498	33,3	184,678679
0,475	321	62,274	33,15	187,855204
0,5	324	62,856	33	190,472727
0,525	326	63,244	32,85	192,523592
0,55	328	63,632	32,7	194,593272
0,575	328	63,632	32,55	195,490015
0,6	328	63,632	32,4	196,395062
0,625	328	63,632	32,25	197,308527
0,65	326	63,244	32,1	192,523232
0,675	322	62,468	31,95	185,695636
0,7	318	61,692	31,8	184,545235

0,725	312	60,528	31,65	180,955322
0,75	305	59,17	31,5	180,646996
0,775	298	57,812	31,35	165,695423
0,8	290	56,26	31,2	162,586359
0,825	284	55,096	31,05	157,852632
0,85	276	53,544	30,9	150,695325
0,875	269	52,186	30,75	143,985232
0,9	262	50,828	30,6	142,852332
0,925	256	49,664	30,45	141,155822
0,95	249	48,306	30,3	140,892252
0,975	243	47,142	30,15	140,445232
1	233	45,202	30	138,548522
1,025	225	43,65	29,85	136,985223
1,05	215	41,71	29,7	136,582582
1,075	208	40,352	29,55	135,785233
1,1	202	39,188	29,4	134,987222
1,125	198	38,412	29,25	134,265225

Tableau V.10. Résultats du cisaillement avec ajout 2% de caoutchouc à 2 bar

Δ_L	I_a	T	S_c	τ
0	0	0	0	0
0,025	43	8,342	35,85	23,2691771
0,05	125	24,25	35,7	67,9271709
0,075	167	32,398	35,55	91,1336146
0,1	232	45,008	35,4	127,141243
0,125	280	54,32	35,25	154,099291
0,15	320	62,08	35,1	176,866097
0,175	355	68,87	34,95	197,052933
0,2	385	74,69	34,8	214,626437
0,225	414	80,316	34,65	231,792208
0,25	441	85,554	34,5	247,982609
0,275	468	90,792	34,35	264,31441
0,3	487	94,478	34,2	276,251462
0,325	498	96,612	34,05	283,735683
0,35	507	98,358	33,9	290,141593
0,375	516	100,104	33,75	296,604444
0,4	524	101,656	33,6	302,547619
0,425	532	103,208	33,45	308,544096
0,45	539	104,566	33,3	314,012012
0,475	547	106,118	33,15	320,11463

0,5	554	107,476	33	325,684848
0,525	560	108,64	32,85	330,715373
0,55	565	109,61	32,7	335,198777
0,575	571	110,774	32,55	340,319508
0,6	575	111,55	32,4	344,290123
0,625	577	111,938	32,25	347,094574
0,65	578	112,132	32,1	349,320872
0,675	579	112,326	31,95	351,568075
0,7	580	112,52	31,8	353,836478
0,725	577	111,938	31,65	353,674566
0,75	572	110,968	31,5	352,279365
0,775	567	109,998	31,35	350,870813
0,8	561	108,834	31,2	348,826923
0,825	552	107,088	31,05	344,888889
0,85	541	104,954	30,9	339,656958
0,875	526	102,044	30,75	331,850407
0,9	509	98,746	30,6	322,699346
0,925	503	97,582	30,45	320,466338
0,95	488	94,672	30,3	312,448845
0,975	477	92,538	30,15	306,925373
1	467	90,598	30	301,993333
1,025	459	89,046	29,85	298,311558
1,05	450	87,3	29,7	293,939394
1,075	443	85,942	29,55	290,835871
1,1	436	84,584	29,4	287,70068
1,125	430	83,42	29,25	285,196581
1,15	424	82,256	29,1	282,666667
1,175	419	81,286	28,95	280,780656
1,2	414	80,316	28,8	278,875
1,225	409	79,346	28,65	276,949389
1,25	404	78,376	28,5	275,003509
1,275	400	77,6	28,35	273,72134
1,3	396	76,824	28,2	272,425532
1,325	389	75,466	28,05	269,040998
1,35	385	74,69	27,9	267,706093
1,375	381	73,914	27,75	266,356757
1,4	378	73,332	27,6	265,695652
1,425	375	72,75	27,45	265,027322
1,45	373	72,362	27,3	265,062271
1,475	370	71,78	27,15	264,383057
1,5	369	71,586	27	265,133333

1,525	366	71,004	26,85	264,446927
1,55	363	70,422	26,7	263,752809
1,575	360	69,84	26,55	263,050847

Tableau V.11. Résultats du cisaillement avec ajout 2% de caoutchouc à 3 bar

Δ_L	I_a	T	S_c	τ
0	0	0	0	0
0,025	72	13,968	35,85	38,9623431
0,05	146	28,324	35,7	79,3389356
0,075	181	35,114	35,55	98,7735584
0,1	243	47,142	35,4	133,169492
0,125	295	57,23	35,25	162,35461
0,15	350	67,9	35,1	193,447293
0,175	422	81,868	34,95	234,243205
0,2	470	91,18	34,8	262,011494
0,225	546	105,924	34,65	305,69697
0,25	572	110,968	34,5	321,646377
0,275	591	114,654	34,35	333,781659
0,3	622	120,668	34,2	352,830409
0,325	645	125,13	34,05	367,488987
0,35	671	130,174	33,9	383,9941
0,375	697	135,218	33,75	400,645926
0,4	722	140,068	33,6	416,869048
0,425	749	145,306	33,45	434,397608
0,45	775	150,35	33,3	451,501502
0,475	799	155,006	33,15	467,589744
0,5	815	158,11	33	479,121212
0,525	828	160,632	32,85	488,986301
0,55	839	162,766	32,7	497,755352
0,575	846	164,124	32,55	504,221198
0,6	850	164,9	32,4	508,950617
0,625	852	165,288	32,25	512,52093
0,65	775	150,35	32,1	468,380062
0,675	755	146,47	31,95	458,435055
0,7	710	137,74	31,8	433,144654
0,725	684	132,696	31,65	419,260664
0,75	662	128,428	31,5	407,707937
0,775	648	125,712	31,35	400,995215
0,8	635	123,19	31,2	394,839744
0,825	624	121,056	31,05	389,874396

0,85	613	118,922	30,9	384,860841
0,875	602	116,788	30,75	379,798374
0,9	589	114,266	30,6	373,418301
0,925	579	112,326	30,45	368,8867
0,95	570	110,58	30,3	364,950495
0,975	559	108,446	30,15	359,688226
1	550	106,7	30	355,666667
1,025	543	105,342	29,85	352,904523
1,05	536	103,984	29,7	350,114478
1,075	530	102,82	29,55	347,952623
1,1	522	101,268	29,4	344,44898
1,125	516	100,104	29,25	342,235897
1,15	510	98,94	29,1	340
1,175	504	97,776	28,95	337,740933
1,2	497	96,418	28,8	334,784722
1,225	493	95,642	28,65	333,82897
1,25	488	94,672	28,5	332,182456
1,275	484	93,896	28,35	331,202822
1,3	479	92,926	28,2	329,524823
1,325	475	92,15	28,05	328,520499
1,35	471	91,374	27,9	327,505376
1,375	467	90,598	27,75	326,479279
1,4	464	90,016	27,6	326,144928
1,425	461	89,434	27,45	325,806922
1,45	459	89,046	27,3	326,175824

Tableau V.12. Résultats du cisaillement avec ajout 4% de caoutchouc à 1 bar

Δ_L	l_a	T	S_c	τ
0	0	0	0	0
0,025	20	3,88	35,85	10,8228731
0,05	31	6,014	35,7	16,8459384
0,075	53	10,282	35,55	28,9226442
0,1	72	13,968	35,4	39,4576271
0,125	88	17,072	35,25	48,4312057
0,15	101	19,594	35,1	55,8233618
0,175	120	23,28	34,95	66,6094421
0,2	142	27,548	34,8	79,1609195
0,225	166	32,204	34,65	92,9408369
0,25	181	35,114	34,5	101,77971
0,275	195	37,83	34,35	110,131004

0,3	209	40,546	34,2	118,555556
0,325	223	43,262	34,05	127,054332
0,35	245	47,53	33,9	140,20649
0,375	259	50,246	33,75	148,877037
0,4	271	52,574	33,6	156,470238
0,425	285	55,29	33,45	165,29148
0,45	297	57,618	33,3	173,027027
0,475	308	59,752	33,15	180,24736
0,5	319	61,886	33	187,533333
0,525	326	63,244	32,85	192,523592
0,55	333	64,602	32,7	197,559633
0,575	338	65,572	32,55	201,450077
0,6	342	66,348	32,4	204,777778
0,625	344	66,736	32,25	206,933333
0,65	345	66,93	32,1	208,504673
0,675	345	66,93	31,95	209,483568
0,7	345	66,93	31,8	210,471698
0,725	345	66,93	31,65	211,469194
0,75	343	66,542	31,5	211,244444
0,775	325	63,05	31,35	201,116427
0,8	320	62,08	31,2	198,974359
0,825	310	60,14	31,05	193,687601
0,85	298	57,812	30,9	187,093851
0,875	292	56,648	30,75	184,221138
0,9	286	55,484	30,6	181,320261
0,925	275	53,35	30,45	175,205255
0,95	273	52,962	30,3	174,792079
0,975	270	52,38	30,15	173,731343
1	269	52,186	30	173,953333
1,025	268	51,992	29,85	174,177554

Tableau V.13. Résultats du cisaillement avec ajout 4% de caoutchouc à 2 bar

Δ_L	I_a	T	S_c	τ
0	0	0	0	0
0,025	81	15,714	35,85	43,832636
0,05	112	21,728	35,7	60,8627451
0,075	152	29,488	35,55	82,9479606
0,1	186	36,084	35,4	101,932203
0,125	217	42,098	35,25	119,42695
0,15	260	50,44	35,1	143,703704

0,175	306	59,364	34,95	169,854077
0,2	333	64,602	34,8	185,637931
0,225	359	69,646	34,65	200,998557
0,25	380	73,72	34,5	213,681159
0,275	406	78,764	34,35	229,298399
0,3	439	85,166	34,2	249,023392
0,325	460	89,24	34,05	262,085169
0,35	484	93,896	33,9	276,979351
0,375	510	98,94	33,75	293,155556
0,4	532	103,208	33,6	307,166667
0,425	560	108,64	33,45	324,783259
0,45	588	114,072	33,3	342,558559
0,475	605	117,37	33,15	354,057315
0,5	615	119,31	33	361,545455
0,525	622	120,668	32,85	367,330289
0,55	629	122,026	32,7	373,168196
0,575	635	123,19	32,55	378,463902
0,6	638	123,772	32,4	382,012346
0,625	641	124,354	32,25	385,593798
0,65	642	124,548	32,1	388
0,675	643	124,742	31,95	390,428795
0,7	638	123,772	31,8	389,220126
0,725	634	122,996	31,65	388,612954
0,75	628	121,832	31,5	386,768254
0,775	622	120,668	31,35	384,905901
0,8	614	119,116	31,2	381,782051
0,825	601	116,594	31,05	375,504026
0,85	592	114,848	30,9	371,676375
0,875	575	111,55	30,75	362,764228
0,9	550	106,7	30,6	348,69281
0,925	499	96,806	30,45	317,917898
0,95	483	93,702	30,3	309,247525
0,975	465	90,21	30,15	299,20398
1	448	86,912	30	289,706667
1,025	426	82,644	29,85	276,864322
1,05	405	78,57	29,7	264,545455
1,075	391	75,854	29,55	256,697124
1,1	386	74,884	29,4	254,707483
1,125	380	73,72	29,25	252,034188
1,15	373	72,362	29,1	248,666667
1,175	368	71,392	28,95	246,604491

1,2	363	70,422	28,8	244,520833
1,225	360	69,84	28,65	243,769634

Tableau V.14. Résultats du cisaillement avec ajout 4% de caoutchouc à 3 bar

Δ_L	I_a	T	S_c	τ
0	0	0	0	0
0,025	112	21,728	35,85	60,6080893
0,05	220	42,68	35,7	119,551821
0,075	302	58,588	35,55	164,804501
0,1	386	74,884	35,4	211,536723
0,125	460	89,24	35,25	253,163121
0,15	518	100,492	35,1	286,301994
0,175	584	113,296	34,95	324,165951
0,2	609	118,146	34,8	339,5
0,225	646	125,324	34,65	361,685426
0,25	672	130,368	34,5	377,878261
0,275	699	135,606	34,35	394,777293
0,3	725	140,65	34,2	411,25731
0,325	750	145,5	34,05	427,312775
0,35	778	150,932	33,9	445,227139
0,375	796	154,424	33,75	457,552593
0,4	811	157,334	33,6	468,255952
0,425	825	160,05	33,45	478,475336
0,45	842	163,348	33,3	490,534535
0,475	858	166,452	33,15	502,117647
0,5	866	168,004	33	509,10303
0,525	895	173,63	32,85	528,554033
0,55	912	176,928	32,7	541,06422
0,575	925	179,45	32,55	551,305684
0,6	930	180,42	32,4	556,851852
0,625	930	180,42	32,25	559,44186
0,65	930	180,42	32,1	562,056075
0,675	930	180,42	31,95	564,694836
0,7	918	178,092	31,8	560,037736
0,725	898	174,212	31,65	550,432859
0,75	892	173,048	31,5	549,35873
0,775	885	171,69	31,35	547,655502
0,8	870	168,78	31,2	540,961538
0,825	861	167,034	31,05	537,951691
0,85	846	164,124	30,9	531,145631

0,875	836	162,184	30,75	527,427642
0,9	805	156,17	30,6	510,359477
0,925	775	150,35	30,45	493,760263
0,95	765	148,41	30,3	489,80198
0,975	742	143,948	30,15	477,439469
1	712	138,128	30	460,426667
1,025	690	133,86	29,85	448,442211
1,05	681	132,114	29,7	444,828283
1,075	675	130,95	29,55	443,147208
1,1	673		29,4	439,254522

Tableau V.15. Résultats du cisaillement avec ajout 6% de caoutchouc à 1 bar

Δ_L	I_a	T	S_c	τ
0	0	0	0	0
0,025	56	10,864	35,85	30,3040446
0,05	98	19,012	35,7	53,254902
0,075	135	26,19	35,55	73,6708861
0,1	168	32,592	35,4	92,0677966
0,125	189	36,666	35,25	104,017021
0,15	203	39,382	35,1	112,19943
0,175	217	42,098	34,95	120,452074
0,2	230	44,62	34,8	128,218391
0,225	241	46,754	34,65	134,932179
0,25	252	48,888	34,5	141,704348
0,275	266	51,604	34,35	150,229985
0,3	279	54,126	34,2	158,263158
0,325	291	56,454	34,05	165,797357
0,35	306	59,364	33,9	175,115044
0,375	317	61,498	33,75	182,216296
0,4	325	63,05	33,6	187,64881
0,425	332	64,408	33,45	192,550075
0,45	341	66,154	33,3	198,660661
0,475	350	67,9	33,15	204,826546
0,5	358	69,452	33	210,460606
0,525	362	70,228	32,85	213,783866
0,55	365	70,81	32,7	216,544343
0,575	367	71,198	32,55	218,734255
0,6	368	71,392	32,4	220,345679
0,625	366	71,004	32,25	220,167442
0,65	360	69,84	32,1	217,570093

0,675	349	67,706	31,95	211,912363
0,7	322	62,468	31,8	196,440252
0,725	310	60,14	31,65	190,015798
0,75	298	57,812	31,5	183,530159
0,775	295	57,23	31,35	182,551834
0,8	290	56,26	31,2	180,320513
0,825	284	55,096	31,05	177,442834
0,85	276	53,544	30,9	173,281553
0,875	271	52,574	30,75	170,972358
0,9	260	50,44	30,6	164,836601
0,925	251	48,694	30,45	159,914614
0,95	238	46,172	30,3	152,382838
0,975	218	42,292	30,15	140,271973
1	203	39,382	30	131,273333
1,025	199	38,606	29,85	129,333333
1,05	195	37,83	29,7	127,373737
1,075	192	37,248	29,55	126,050761
1,1	188	36,472	29,4	124,054422
1,125	184	35,696	29,25	122,037607
1,15	179	34,726	29,1	119,333333
1,175	173	33,562	28,95	115,930915
1,2	168	32,592	28,8	113,166667
1,225	163	31,622	28,65	110,373473
1,25	157	30,458	28,5	106,870175
1,275	150	29,1	28,35	102,645503
1,3	143	27,742	28,2	98,3758865
1,325	138	26,772	28,05	95,4438503
1,35	132	25,608	27,9	91,7849462
1,375	125	24,25	27,75	87,3873874
1,4	122	23,668	27,6	85,7536232
1,425	118	22,892	27,45	83,3952641
1,45	115	22,31	27,3	81,7216117

Tableau V.16. Résultats du cisaillement avec ajout 6% de caoutchouc à 2 bar

Δ_L	I_a	T	S_c	τ
0	0	0	0	0
0,025	52	10,088	35,85	28,13947
0,05	112	21,728	35,7	60,8627451
0,075	154	29,876	35,55	84,0393812
0,1	181	35,114	35,4	99,1920904
0,125	228	44,232	35,25	125,480851
0,15	267	51,798	35,1	147,57265
0,175	305	59,17	34,95	169,298999
0,2	338	65,572	34,8	188,425287
0,225	369	71,586	34,65	206,597403
0,25	398	77,212	34,5	223,802899
0,275	427	82,838	34,35	241,158661
0,3	453	87,882	34,2	256,964912
0,325	476	92,344	34,05	271,201175
0,35	501	97,194	33,9	286,707965
0,375	525	101,85	33,75	301,777778
0,4	548	106,312	33,6	316,404762
0,425	570	110,58	33,45	330,58296
0,45	591	114,654	33,3	344,306306
0,475	613	118,922	33,15	358,739065
0,5	629	122,026	33	369,775758
0,525	643	124,742	32,85	379,732116
0,55	655	127,07	32,7	388,593272
0,575	666	129,204	32,55	396,940092
0,6	677	131,338	32,4	405,364198
0,625	681	132,114	32,25	409,655814
0,65	683	132,502	32,1	412,778816
0,675	684	132,696	31,95	415,323944
0,7	680	131,92	31,8	414,842767
0,725	675	130,95	31,65	413,744076
0,75	662	128,428	31,5	407,707937
0,775	643	124,742	31,35	397,901116
0,8	627	121,638	31,2	389,865385
0,825	610	118,34	31,05	381,127214
0,85	584	113,296	30,9	366,653722
0,875	566	109,804	30,75	357,086179
0,9	556	107,864	30,6	352,496732
0,925	549	106,506	30,45	349,773399

0,95	544	105,536	30,3	348,30363
0,975	540	104,76	30,15	347,462687
1	534	103,596	30	345,32
1,025	529	102,626	29,85	343,805695
1,05	525	101,85	29,7	342,929293
1,075	521	101,074	29,55	342,043993
1,1	517	100,298	29,4	341,14966
1,125	514	99,716	29,25	340,909402
1,15	512	99,328	29,1	341,333333
1,175	510	98,94	28,95	341,761658
1,2	506	98,164	28,8	340,847222
1,225	501	97,194	28,65	339,246073
1,25	496	96,224	28,5	337,62807
1,275	492	95,448	28,35	336,677249
1,3	487	94,478	28,2	335,028369
1,325	484	93,896	28,05	334,745098
1,35	479	92,926	27,9	333,0681

Tableau V.17. Résultats du cisaillement avec ajout 6% de caoutchouc à 3 bar

Δ_L	I_a	T	S_c	τ
0	0	0	0	0
0,025	148	28,712	35,85	80,0892608
0,05	253	49,082	35,7	137,484594
0,075	313	60,722	35,55	170,807314
0,1	352	68,288	35,4	192,903955
0,125	400	77,6	35,25	220,141844
0,15	448	86,912	35,1	247,612536
0,175	490	95,06	34,95	271,988555
0,2	538	104,372	34,8	299,91954
0,225	582	112,908	34,65	325,852814
0,25	622	120,668	34,5	349,762319
0,275	657	127,458	34,35	371,056769
0,3	694	134,636	34,2	393,672515
0,325	725	140,65	34,05	413,069016
0,35	752	145,888	33,9	430,348083
0,375	775	150,35	33,75	445,481481
0,4	799	155,006	33,6	461,327381
0,425	833	161,602	33,45	483,115097
0,45	858	166,452	33,3	499,855856
0,475	881	170,914	33,15	515,577677

0,5	902	174,988	33	530,266667
0,525	929	180,226	32,85	548,633181
0,55	942	182,748	32,7	558,862385
0,575	955	185,27	32,55	569,185868
0,6	960	186,24	32,4	574,814815
0,625	971	188,374	32,25	584,105426
0,65	999	193,806	32,1	603,757009
0,675	1005	194,97	31,95	610,234742
0,7	990	192,06	31,8	603,962264
0,725	950	184,3	31,65	582,306477
0,75	860	166,84	31,5	529,650794
0,775	799	155,006	31,35	494,437002
0,8	770	149,38	31,2	478,782051
0,825	756	146,664	31,05	472,347826
0,85	744	144,336	30,9	467,106796
0,875	733	142,202	30,75	462,445528
0,9	720	139,68	30,6	456,470588
0,925	716	138,904	30,45	456,170772
0,95	708	137,352	30,3	453,306931
0,975	700	135,8	30,15	450,414594
1	692	134,248	30	447,493333
1,025	685	132,89	29,85	445,19263
1,05	676	131,144	29,7	441,56229
1,075	663	128,622	29,55	435,269036
1,1	655	127,07	29,4	432,210884
1,125	648	125,712	29,25	429,784615
1,15	642	124,548	29,1	428
1,175	637	123,578	28,95	426,867012
1,2	630	122,22	28,8	424,375
1,225	627	121,638	28,65	424,565445
1,25	624	121,056	28,5	424,757895
1,275	620	120,28	28,35	424,268078
1,3	617	119,698	28,2	424,460993
1,325	616	119,504	28,05	426,039216
1,35	614	119,116	27,9	426,939068
1,375	612	118,728	27,75	427,848649
1,4	611	118,534	27,6	429,471014
1,425	611	118,534	27,45	431,817851
1,45	610	118,34	27,3	433,479853
1,475	609	118,146	27,15	435,160221

V.7.5.3. La variation de la cohésion en fonction du pourcentage de caoutchouc

Tableau V.18. La variation de la cohésion en fonction du pourcentage de caoutchouc

Le pourcentage de caoutchouc (%)	La cohésion (C) (Bar)
0 %	45
2%	40
4%	36
6%	26

V.7.5.4. La variation de l'angle de frottement interne en fonction du pourcentage de caoutchouc

Tableau V.19. La variation de l'angle de frottement interne en fonction du pourcentage de caoutchouc

Le pourcentage de caoutchouc (%)	L'angle de frottement interne (φ)
0 %	27.47°
2%	49.48°
4%	54.65°
6%	59.39°

V.8. Conclusion

L'essai Proctor présenté dans ce travail, a permis de montrer l'aptitude du mélange au compactage.

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 différents ouvrages géotechniques.

Après la réalisation des essais mécaniques, dans le chapitre suivant on va présenter l'interprétation des différents résultats obtenus.



Chapitre VI

Interprétation des résultats

VI.1. Introduction

Ce chapitre comporte toutes les interprétations des essais mécaniques qui ont été réalisés, et les courbes les plus significatives, montrant le comportement d'un sol argileux en fonction de l'ajout de granulats de caoutchouc à différents pourcentages.

On commencera par l'interprétation des résultats des essais Proctor, on passera ensuite aux résultats des essais de cisaillement qui ont été réalisés à des pourcentages d'ajout de : 2%, 4% et 6% de granulats de caoutchouc, réalisés au niveau du laboratoire de la mécanique des sols de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

VI.2. Essais Proctor

VI.2.1. Essai Proctor sans ajout

La figure suivante présente la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, à l'état naturel.

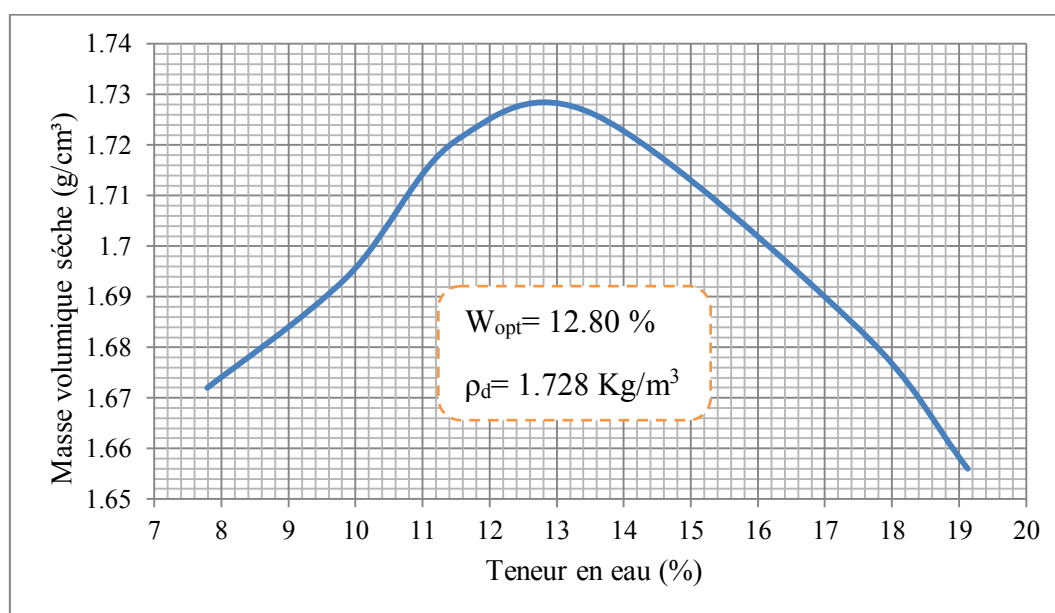


Figure VI.1. Courbe Proctor (sans ajout)

VI.2.2. Ajout de 2 % de caoutchouc

La figure suivante présente la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec ajout de 2% de caoutchouc.

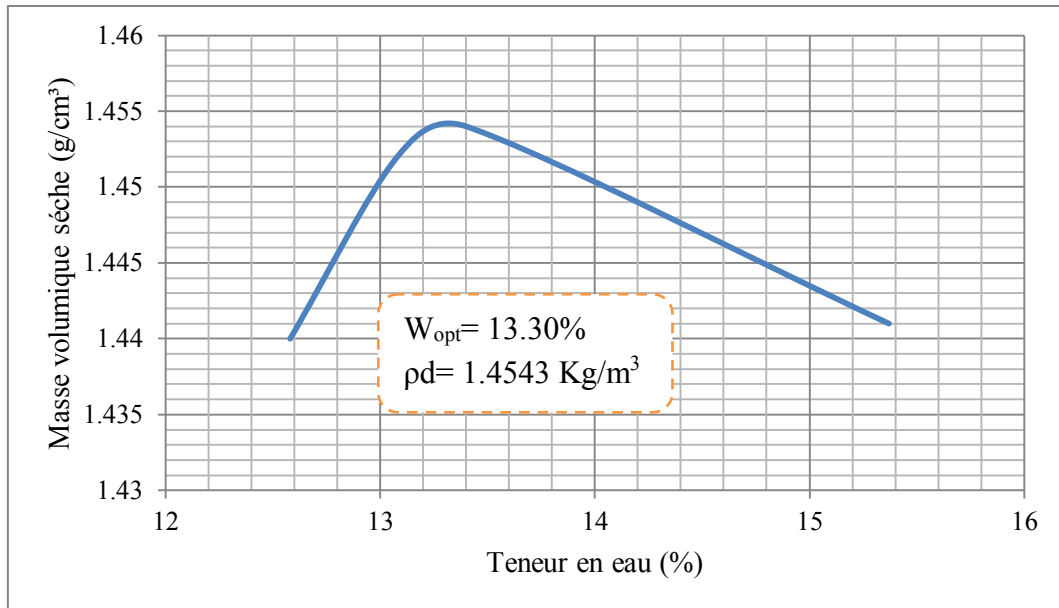


Figure VI.2. Courbe Proctor (ajout de 2% de caoutchouc)

VI.2.3. Ajout de 4 % de caoutchouc

La figure suivante présente la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec ajout de 4% de caoutchouc.

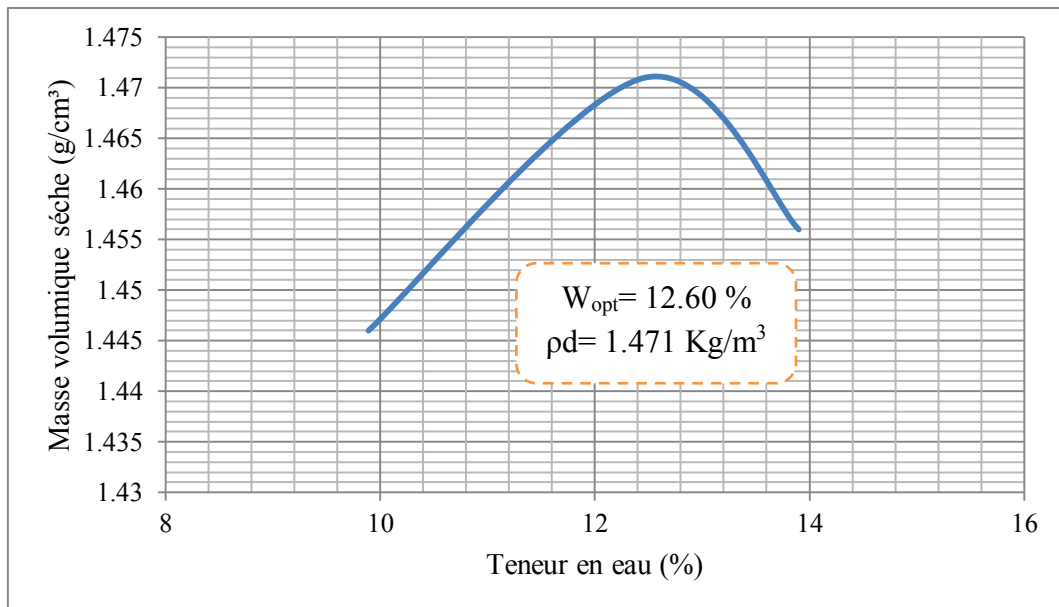


Figure VI.3. Courbe Proctor (ajout de 4% de caoutchouc)

VI.2.4. Ajout de 6 % de caoutchouc

La figure suivante présente la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec ajout de 6% de caoutchouc.

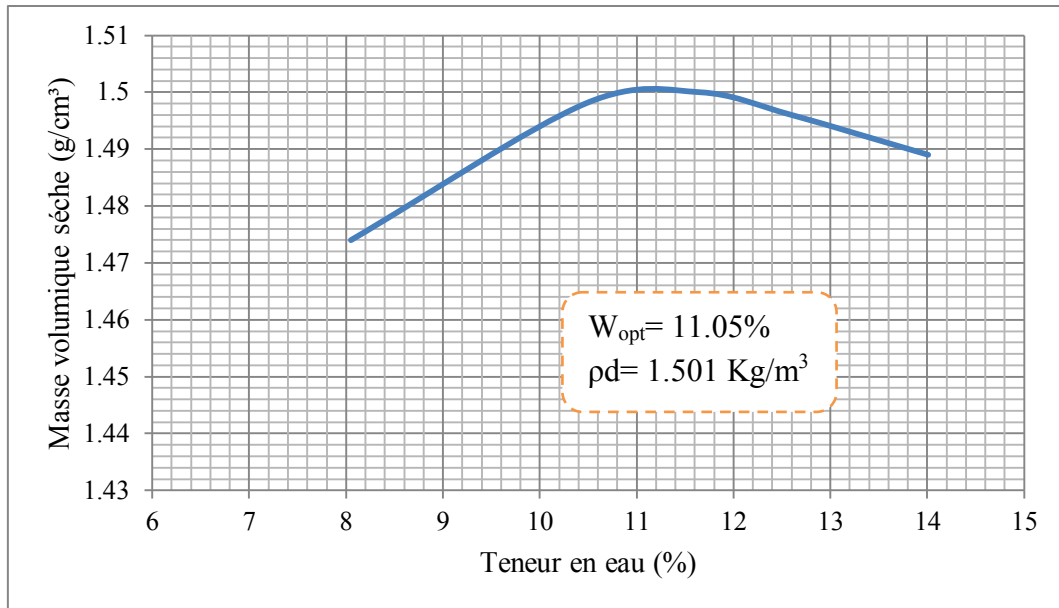


Figure VI.4. Courbe Proctor (ajout de 6% de caoutchouc)

VI.3. Interprétation des résultats

VI.3.1. La variation de la teneur en eau en fonction du pourcentage d'ajout

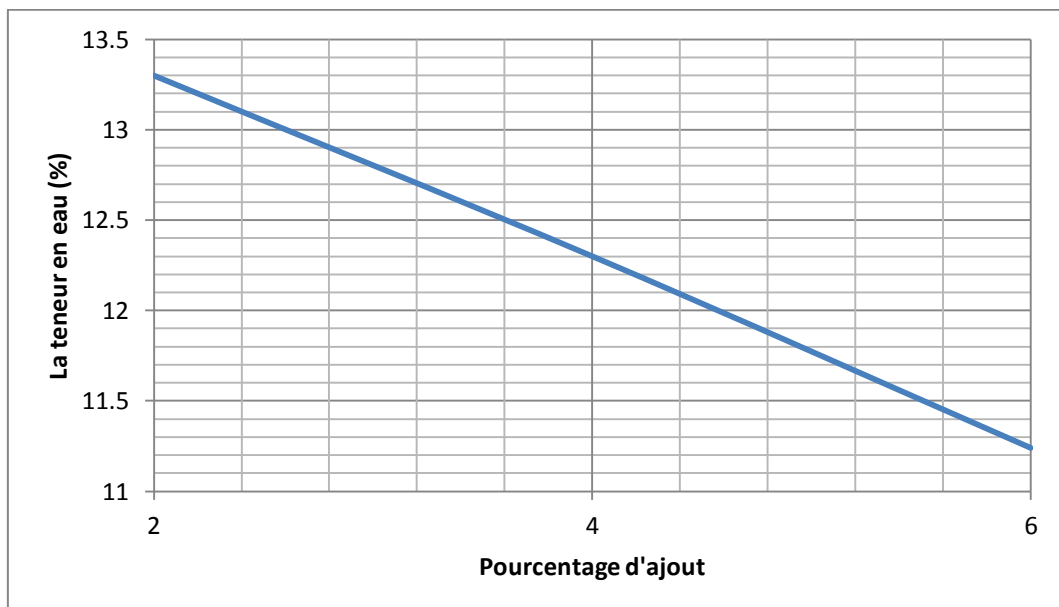


Figure VI.5. La variation de la teneur en eau en fonction du pourcentage d'ajout

D'après la Figure VI.5, dans laquelle on remarque une diminution de la teneur en eau en fonction du pourcentage d'ajout, cela peut s'expliquer par la structure des grains de caoutchouc qui est non poreuse, donc une rétention d'eau nulle.

VI.3.2. La variation de la masse volumique sèche en fonction du pourcentage d'ajout

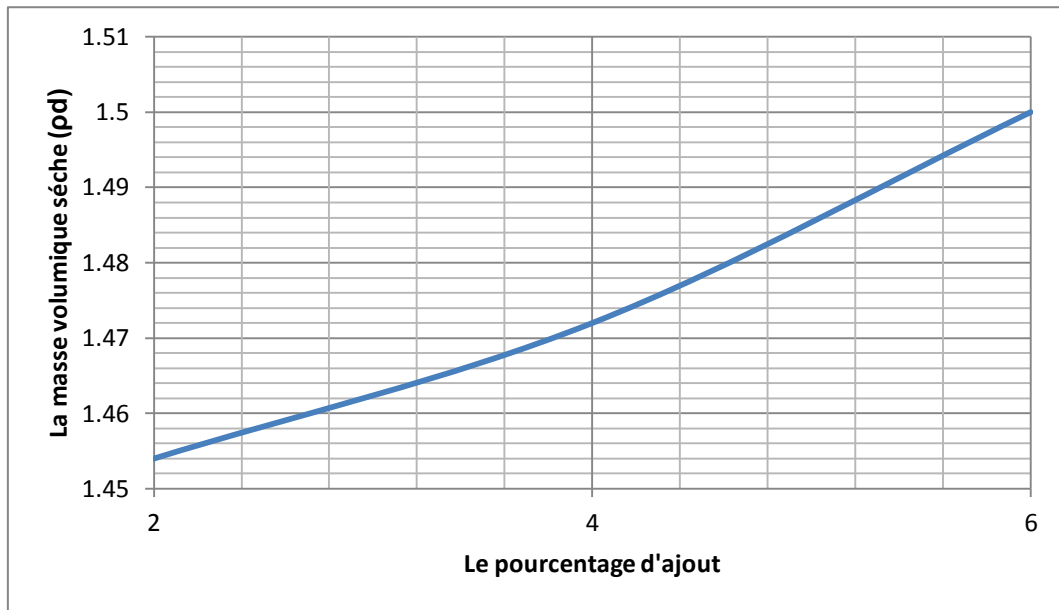


Figure VI.6. La variation de la masse volumique sèche en fonction du pourcentage d'ajout

A travers la Figure VI.6, on constate une augmentation de la masse volumique sèche en fonction de l'augmentation du pourcentage d'ajout. Cette augmentation est due à l'agglomération des grains de caoutchouc et les particules d'argile.

VI.3.3. Superposition des courbes

Les courbes Proctor obtenues, sont présentées dans la Figure VI.7:

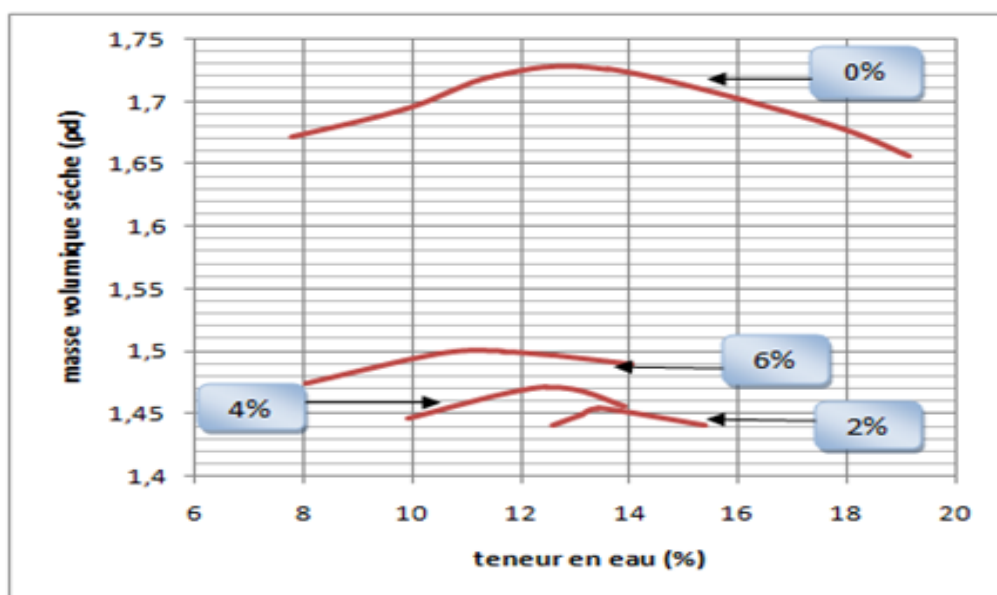


Figure VI.7. Les courbes Proctor pour les différents ajouts

A travers la Figure VI.7 ou sont représentés les différentes courbes Proctor pour les différents ajouts (2%, 4%, 6%), on constate que les valeurs des teneurs en eau optimales (W_{opt}) diminuent et que la masse volumique sèche (ρ_d) augmente avec l'augmentation du pourcentage de grains de caoutchouc ajouté.

Cela est interprété par l'agglomération des particules de caoutchouc avec les particules d'argile ce qui a permis une augmentation la masse volumique sèche.

La diminution des teneurs en eau avec l'augmentation du pourcentage d'ajout est due à l'augmentation des grains de caoutchouc contenue dans le sol, ces grains n'obtiennent pas de pores, alors elles laissent l'eau s'infiltrer facilement, donc le sol sera de plus en plus perméable.

VI.4. Essai de cisaillement et interprétation des résultats

VI.4.1. Cisaillement pour le sol sans ajout a 1, 2, 3 bar

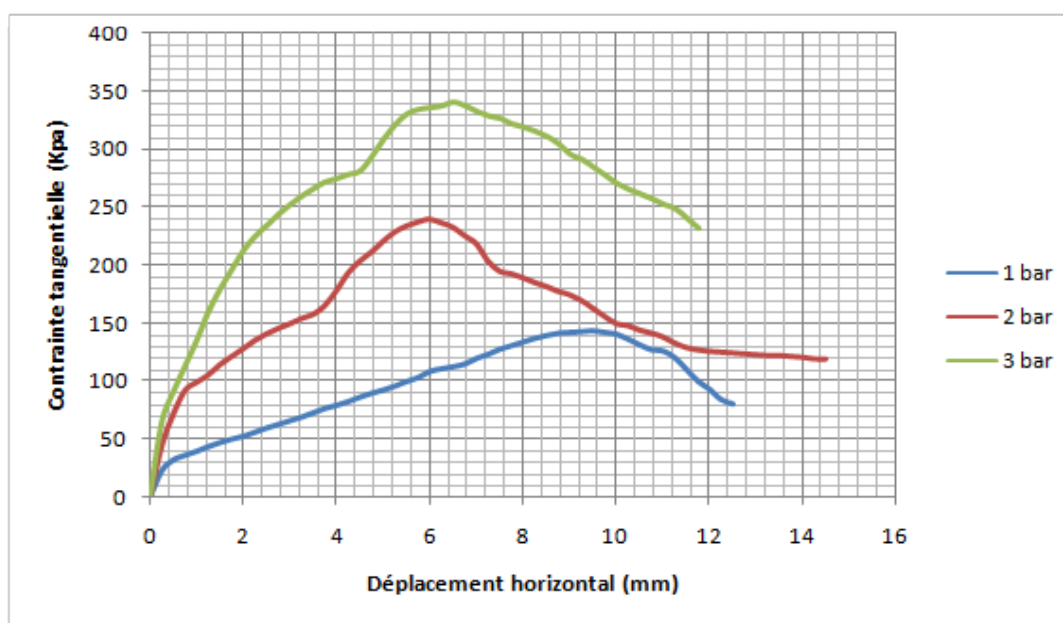


Figure VI.8. La contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal à 1, 2, et 3 bar (sans ajout)

Les résultats de l'essai de cisaillement du sol sans ajout, montrent une augmentation de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal, après chaque chargement comme représenté sur la Figure VI.8. La contrainte tangentielle maximale à 3 bar est de, 340Kpa.

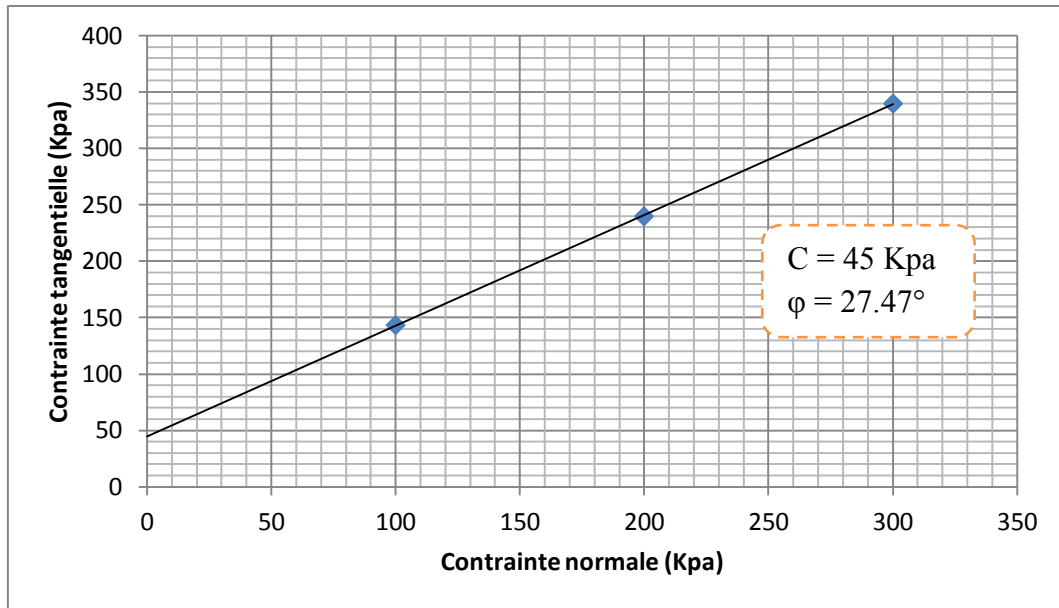


Figure VI.9. La contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale (sans ajout)

Les résultats obtenus, d'après la courbe de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale représenté sur la Figure VI.9, sont :

- la cohésion = 45 Kpa ;
- l'angle de frottement interne = 27.47°.

VI.4.2. Cisaillement pour le sol avec ajout de 2% de caoutchouc à 1, 2, 3 bar

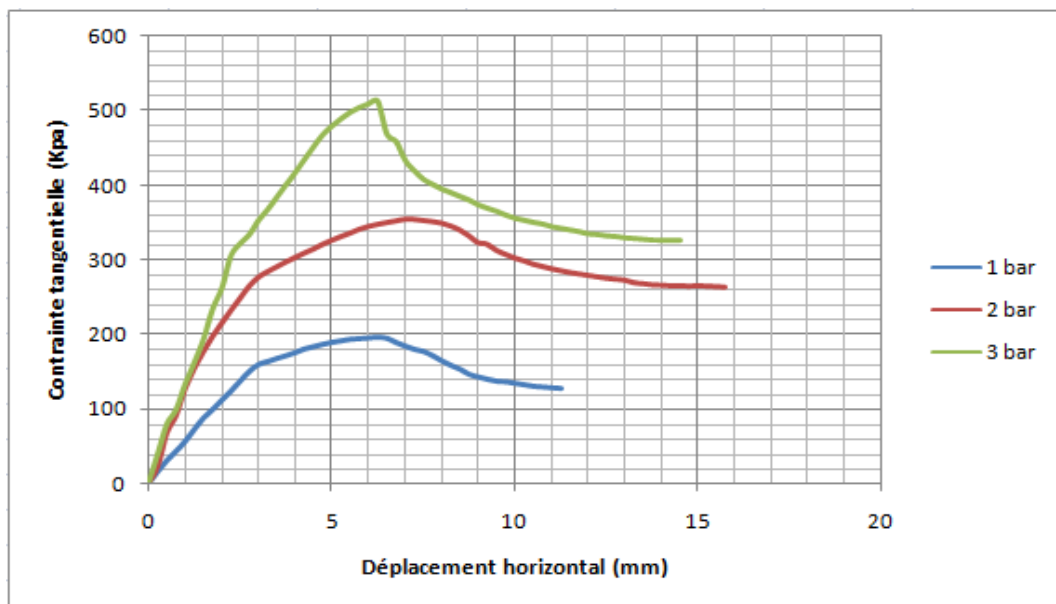


Figure VI.10. La contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal à 1, 2, et 3 bar (ajout de 2% de caoutchouc)

Les résultats de l'essai de cisaillement sur le sol avec ajout de 2%, montrent une augmentation de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal, après chaque chargement comme représenté sur la Figure VI.10. La contrainte tangentielle maximale à 3 bars est : 512 Kpa. Cette contrainte tangentielle est supérieure à celle trouvée dans le sol sans ajout.

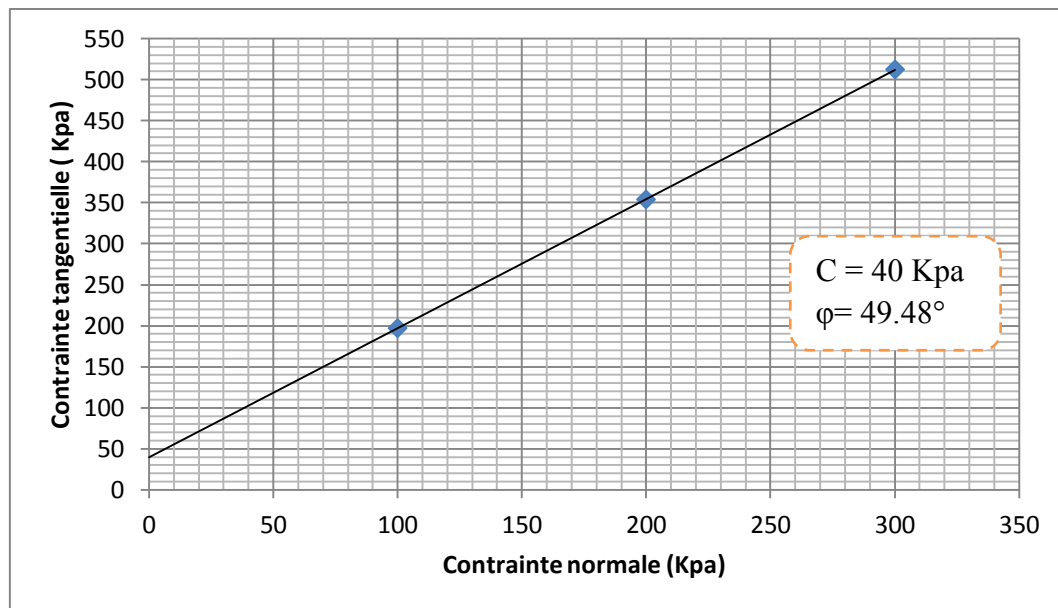


Figure VI.11. La contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale (ajout de 2% de caoutchouc)

Les résultats obtenus d'après la courbe de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale représenté sur la Figure VI.11, sont :

- la cohésion = 40 Kpa;
- l'angle de frottement interne = 49.48°.

D'après ces résultats, on remarque une diminution de la cohésion et l'augmentation de l'angle de frottement interne par rapport à l'essai précédent.

VI.4.3. Cisaillement pour le sol avec ajout de 4% de caoutchouc à 1, 2, 3 bar

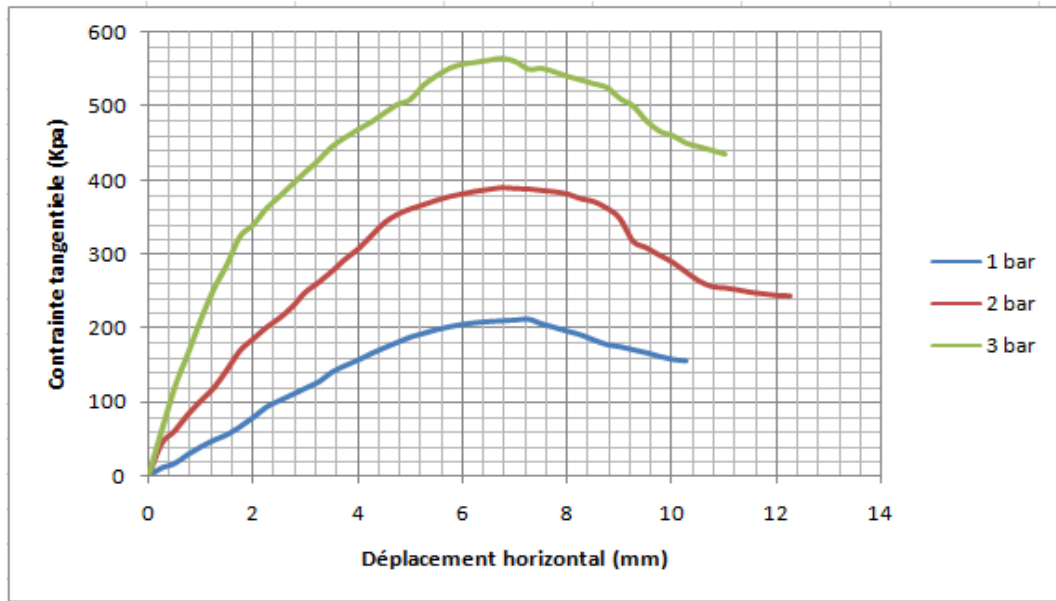


Figure VI.12. La contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal à 1, 2, et 3 bar (ajout de 4% de caoutchouc)

Les résultats de l'essai de cisaillement sur le sol avec ajout de 4%, montrent une augmentation de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal, après chaque chargement comme représenté sur la Figure VI.12. La contrainte tangentielle maximale à 3 bars est : 554 Kpa. Cette contrainte tangentielle est supérieure à celles trouvés dans le sol sans ajout et avec ajout de 2% de granulats de caoutchouc.

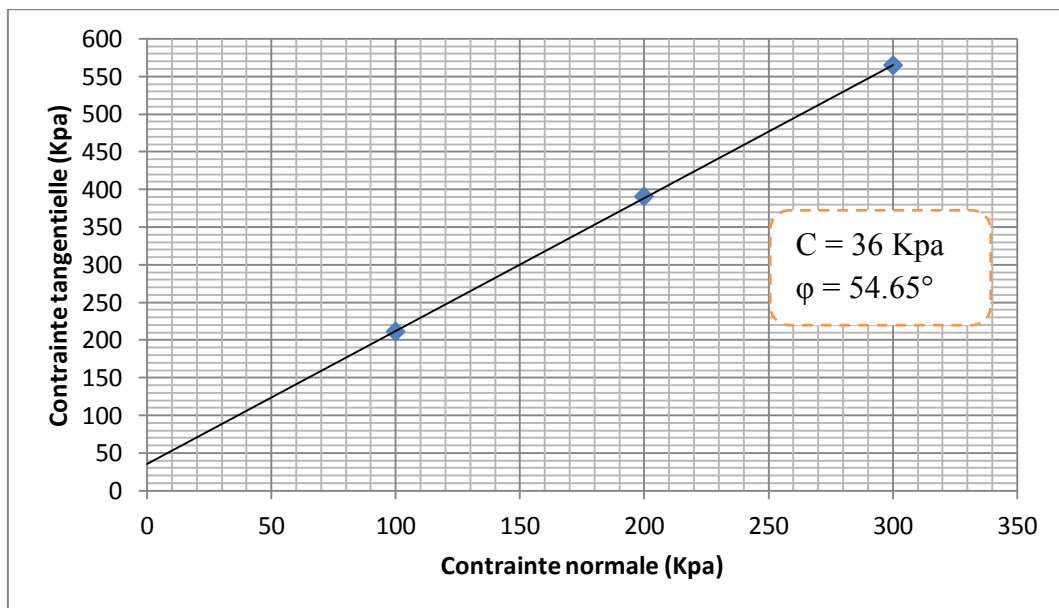


Figure VI.13. La contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale (ajout de 4% de caoutchouc)

Les résultats obtenus d'après la courbe de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale représenté sur la Figure VI.13, sont :

- la cohésion = 36 Kpa ;
- l'angle de frottement interne = 54.65°.

D'après ces résultats on remarque une diminution de la cohésion et l'augmentation de l'angle de frottement interne par rapport aux essais précédents.

VI.4.4. Cisaillement pour le sol avec ajout de 6% de caoutchouc à 1, 2, 3 bar

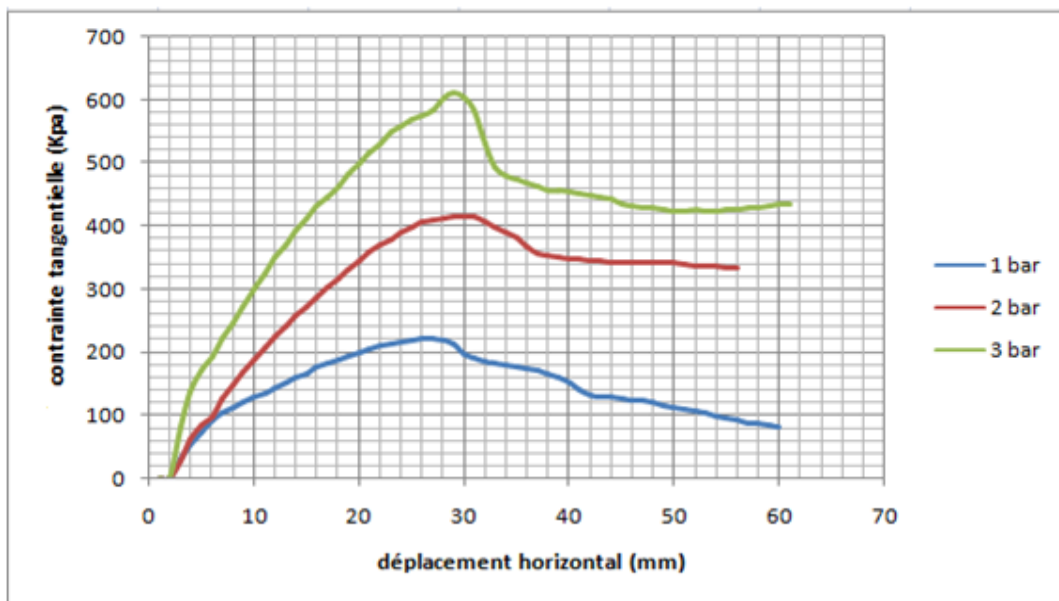


Figure VI.14. La contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal à 1, 2, et 3 bar (ajout de 6% de caoutchouc)

Les résultats de l'essai de cisaillement sur le sol avec ajout de 6%, montrent une augmentation de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement horizontal, après chaque chargement comme représenté sur la Figure VI.14. La contrainte tangentielle maximale à 3 bars est : 610 Kpa. Cette contrainte tangentielle est supérieure à celle trouvée dans le sol sans ajout, avec ajout de 2% et avec ajout de 4% de granulats de caoutchouc.

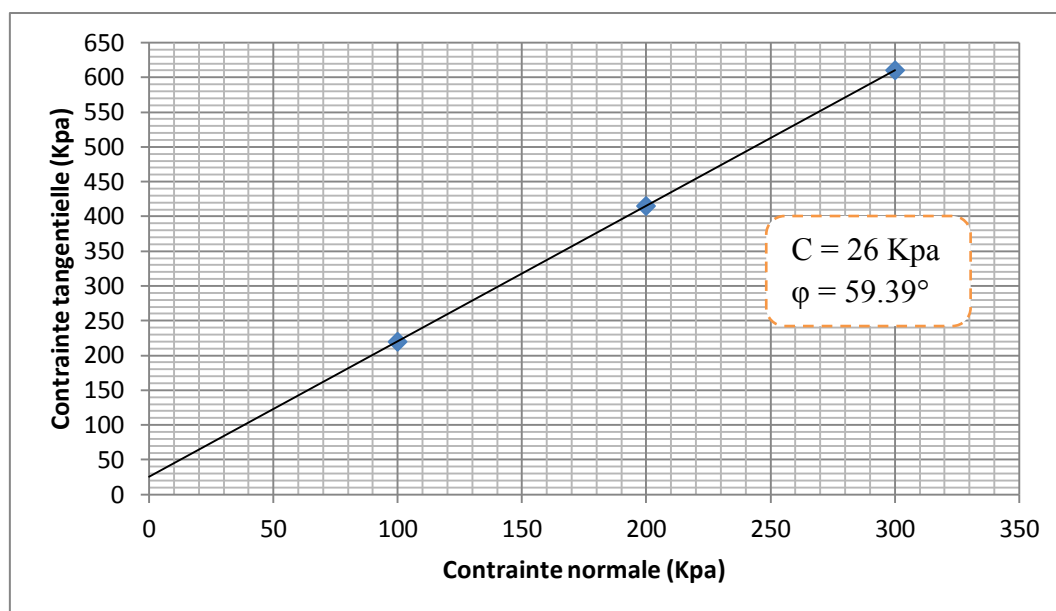


Figure VI.15. La contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale (ajout de 6% de caoutchouc)

Les résultats obtenus, d'après la courbe de la contrainte de cisaillement, en fonction de la contrainte normale représenté sur la Figure VI.15, sont :

- la cohésion = 26 Kpa;
- l'angle de frottement interne = 59.39°.

D'après ces résultats, on remarque une diminution de la cohésion et l'augmentation de l'angle de frottement interne par rapport aux essais précédents.

VI.5. Interprétation des résultats

Les résultats obtenus montrent que la résistance au cisaillement augmente de plus en plus avec l'augmentation de la contrainte normale appliquée. En effet, les granulats de caoutchouc se resserrent entre eux et avec les particules d'argile, donc le frottement va augmenter, ce qui fait accroître leur résistance au cisaillement après chaque essai.

En outre, la résistance au cisaillement est liée également à la quantité de granulats de caoutchouc ajouté au sol. En effet, sous les différentes contraintes normales, les résultats obtenus montrent une amélioration continue de la résistance au cisaillement en fonction du pourcentage d'ajout de ces granulats. Cette résistance est liée directement au frottement interne qui se manifeste entre les grains au cours du cisaillement.

Les résultats obtenus des contraintes de cisaillement en fonction des contraintes normales, montrent une augmentation progressive des angles de frottement avec l'ajout des granulats de

caoutchouc. En effet, au cours du cisaillement la présence de ces granulats génère des frottements très importants donc une meilleure résistance au cisaillement. Par contre, la diminution des cohésions est liée à la présence des particules fines argileuses humides dans le sol.

VI.6. Conclusion

Ce chapitre a permis d'étudier le comportement du sol au compactage et au cisaillement avec des pourcentages d'ajout de granulats de caoutchouc (2%, 4% et 6%).

L'ajout du caoutchouc présente des résultats très intéressants au compactage et au cisaillement direct à la boîte. En effet, avec l'augmentation du pourcentage d'ajout on constate une amélioration du sol, soit par sa résistance au cisaillement ou par sa perméabilité qui est l'objectif de notre étude.



Conclusion générale

Conclusion générale

La valorisation des déchets caoutchouteux dans les applications du génie civil, notamment dans les sols sous forme de granulats ou de renforts, est considérée comme une solution intéressante sur le plan économique et environnemental. En effet, elle permet de réduire les impacts écologiques des déchets de caoutchouc sur l'environnement et la santé de l'être humain, d'une part, et de réduire les besoins en matière première, d'autre part.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à étudier l'effet des granulats de caoutchouc issus du broyage des pneumatiques usagés, sur les propriétés mécaniques d'un sol argileux. Les granulats ont été ajoutées à l'argile en différents dosages 2,4 et 6%.

La démarche expérimentale entreprise consiste en l'étude de l'influence des granulats incorporés sur les propriétés mécaniques de l'argile selon les essais Proctor de compactage et les essais de cisaillement.

D'après les résultats obtenus les principales conclusions qu'on peut tirer de cette étude sont:

- Selon les résultats des essais Proctor, les valeurs des teneurs en eau optimales augmentent et les densités sèches maximales diminuent, avec l'augmentation du dosage en déchet de pneu. Cela est interprété par l'agglomération des particules d'argile qui provoque la visualisation des vides, donc la teneur en eau optimum augmente pour les remplir.
- Les essais Proctor ont montré une amélioration des masses volumiques sèches après chaque augmentation du pourcentage d'ajout.
- L'incorporation du caoutchouc a un effet considérable sur le comportement de l'argile.
- La résistance au cisaillement et le déplacement maximal augmente avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc.
- L'existence de la fibre dans le squelette granulaire empêche le déplacement relatif entre les grains créant ainsi un frottement supplémentaire.
- Les essais de cisaillement ont montré une augmentation de l'angle de frottement interne et une diminution de la cohésion après chaque augmentation du pourcentage d'ajout, ce qui a permis le passage d'un état cohérent vers un état granulaire, et par la suite une augmentation de la résistance. Le meilleur résultat a été obtenu à 6% d'ajout de granulats de caoutchouc avec une cohésion de 26bars et un angle de frottement interne de 59.39°.

Conclusion générale

En résumé, le traitement des argiles par des renforts d'origine caoutchouteuse, permet non seulement de créer une source supplémentaire pour absorber certaines quantités de ces déchets industriels, mais également d'améliorer les propriétés mécaniques de l'argile étudiée.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

[AMANTE E, BENELLI P, et OLIVEIRA D, 2013] - "A literature review on adding value to solid residues: egg shells", Journal on Cleaner Production Volume 46 May 2013.

[AMIROUCHE L, 2011] - "Etude du pouvoir de sorption du cuivre et du zinc et des polyphénols par les bentonites sous l'effet des irradiations micro-ondes" Mémoire Magister de l'UMMTO.

[AMU O, FAJOBI A, et OKE A, 2005] - "Effect of eggshell powder on the stabilizing potential of lime on an expansive clay soil", journal of an applied sciences ISSN 1812-5654.

[ARQUIE, et MOREL, 1988] - " Le compactage ", édition Eyrolles, 1988.

[ASROUN A, TROUZINE H, et LONG N T, 2005] - "Valorisations originales des pneumatiques usagés en génie civil", Actes des 23eme Rencontres Universitaires de Génie Civil, Risque et Environnement, Grenoble 2005.

[BELABBACI, 2014]- "Stabilisation des sols gonflants" Thèse de doctorat en génie civil (option : sols et structures), Université ABOUBEKR Belkaid, TLEMCEM, 2014.

[BEKHTI M, 2019] - "L'étude de stabilisation des argiles gonflantes par ajout de granulats de caoutchouc des pneus usagés", Thèse de doctorat en génie civil (option : Géotechnique et Matériaux), Université DJILALI Liabès, 2019.

[BOULEBNANE A, BOUTIN C, LAREAL P, et LONG N T, 1993] - "Approche théorique et expérimentale du Pneusol léger". Colloque Franco Polonais, Douai, 1993.

[CAILLERE S, HENIN S, et RAUTUREAU M, 1982] - "Minéralogie des argiles", édition Masson tome 1 et 2. P 184 ; 1982a.

[CORREA, et QUIBEL, 2000] - "Le compactage des sols et des matériaux granulaires", modélisation et propriété des matériaux compactés, gestion du compactage et contrôle en continu, Ecole nationale des ponts et chaussées, mai 2000.

[COSTET, et SANGLERAT, 1981]- "Cours pratiques de mécanique des sols", plasticité et calcul des tassements, 3^{ème} Edition, Dunod, janvier 1981.

[DEGOUTE G, et ROYET P, 2005]- "Aide mémoire de mécanique des sols", édition Engref, mai 2005.

[DUPAIN, LANCHANT et SAINT-ARROMAN, 2000]- "granulats, sols, ciments et bétons", caractérisations des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire ,2^{ème} édition, Casteilla, 2000

[EL OUAHABI M, 2013] - "Valorisation industrielle et artisanales des argiles du Maroc" Thèse Doctorat, Université de Liège.

Références bibliographiques

[FREDERIC, 2001] - "Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels" Thèse de Doctorat, Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris, 2001.

[GRIM E, 1962] - "Applied clay mineralogy" Mc Graw-Hill, New York, 422 p; 1962].

[HOTLZ, et KOVASCS, 1991]- "Introduction à la géotechnique", traduit par Jean Lafleur, Editions de L'Ecole Polytechnique de Montréal, 1991.

[HUMPHREY D, 2006] - "Civil engineering applications of tire derived aggregate". CIWMB California Integrated Waste Management Board, Waste Tire Forum. 2006.

[JOZJA N, 2003]- "Etude de matériaux argileux Albanais : Caractérisation multi-échelle d'une bentonite magnésienne, Impact de l'interaction avec le nitrate de plomb sur la perméabilité", Thèse de Doctorat de l'université d'Orléans, 2003.

[LAHCEN B, 2012]- "Fonctionnalisation des minéraux argileux d'origine Marocaine par TiO₂ en vue de l'élimination par photocatalyse de micropolluants organiques des milieux aqueux" Thèse de doctorat. L'institut national polytechnique de Toulouse, 2012.

[LCPC, 1987] : "Essai de cisaillement a la boite", Laboratoire centrale des ponts et chaussées.

[LERAU, 2006]- "Cours de géotechnique", Institut National des Sciences appliquées de Toulouse, avril 2006.

[LI B, WEI, et XU C, 2009] – "Application of wast eggshell as low-coast for biodiesel production", Bioresource Technology Volume 100, Issue 11, June 2009.

[LONG N .T, 1993] - "Le Pneusol : recherches -réalisation –perspective", Thèse de doctorat préparée au LCPC, présentée à l'INSA Lyon, 1993.

[MACHET J .M, 1980] - "Appareils de contrôle embarqués", CIC, vol II, pp. 577-581, 1980.

[MALEK A, et STEVENSON A, 1986] - "The effect of 42 years immersion in sea water on natural rubber", Journal of Materials Sciences, n° 21(1986), pp 147-154.

[MEUNIER A, 2002]- "Argiles" édition scientifique GB ; 2002.

[MICHEL M, 1981] - "Valorisations des déchets et des sous-produits industriels" Ed Massion, Paris (1981).

NF P 94-051 Norme française, détermination des limites d'Atterberg.

NF P94-056 Norme française, Analyse granulométrique par tamisage.

NF P94-057 Norme française, Analyse granulométrique par sédimentométrie.

Références bibliographiques

NF P94-068, Norme française, Valeur au bleu de méthylène.

NF P 94-093 Norme française, paramètres optimaux de compactage (Proctor).

NF P 94-050 Norme française, Teneur en eau a d'état naturel.

NF P 94-054 Norme française, détermination de la masse volumique des particules solides des sols.

[ROBITAILLE, et TREMBLAY, 1997] - "Mécanique des sols, Théorie et pratique", Modulo éditeur, 1997.

[SUKONTASUKKUL P, 2006] - "Properties of concret pedestrian block mixed with crum rubber", Construction and building materials, 2006.