

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

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



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

Présenté par : Rouabhia El Houssayne

Zedadra Hanane

Thème : Amélioration des sols

Sous la direction de :Dr . Rouaiguiua Ammar

Juin 2017

Résumé

L'objectif principal de cette étude est d'examiner l'utilisation des fibres plastiques et de la chaux aux applications géotechniques et d'évaluer les effets de ces produits sur la résistance du sol par l'exécution des essais de compactage Proctor normal et de compression simple. Les résultats obtenus sont comparés pour différents essais et des conclusions sont tirées sur l'utilisation et l'efficacité des fibres plastiques et de la chaux en remplacement de fondation profonde ou radier, comme une approche rentable.

L'amélioration des sols par l'utilisation des fibres plastiques distribuées au hasard c'est une technique qui a été utilisée avec succès pour une variété d'applications telles que la stabilisation des pentes, plate-forme de la route etc. C'est une technique relativement simple pour l'amélioration du sol et dispose d'un énorme potentiel en tant qu'une solution efficace à de nombreux problèmes géotechniques. L'amélioration des sols avec l'addition de la chaux, est une technique aisée à mettre en œuvre, économique et efficace. Elle permet surtout d'éviter de lourds travaux de terrassement destinés à rejeter les sols inadéquats et à faire appel à des matériaux d'emprunt de bonne qualité.

Dans cette étude, un nombre d'essais de compression simple sans confinement et de compactage (Proctor normal) ont été effectuées sur l'échantillon de sol sans et avec différents pourcentages de fibres plastiques et de la chaux. Les fibres plastiques sont similaires aux racines des arbres et de la végétation qui fournissent un excellent ingrédient pour améliorer les sols et la stabilité des pentes naturelles.

L'addition de la chaux et des fibres plastiques ont influencés positivement la densité sèche maximale après compactage et la résistance de compression.

Mots clés :

Chaux, fibres plastiques, compactage Proctor, résistance de compression, amélioration des sols.

Abstract

The main objective of this study is to examine the use of plastic fibers and lime in geotechnical applications and to assess the effects of these products on the resistance of the soil by carrying out Proctor compaction and unconfined simple compression tests. The obtained results are compared for different tests and conclusions can be drawn on the use and the efficiency of the plastic fibers and lime in replacement of deep foundation or raft, as a profitable approach.

The improvement of soil by randomly distributed plastic fibers has successfully been used in a variety of applications such as slope stabilization, road subgrade and sub base etc. This is a relatively simple technique for ground improvement and has tremendous potential as a cost effective solution to many geotechnical problems. The improvement of soils with the addition of lime is a technique easy to implement, economical and efficient. It avoids both the rejection of unsuitable soils during heavy earthworks and the use of good quality borrowed materials from other site.

In this study, a number of unconfined simple compression and compaction (normal Proctor) tests were performed on the soil sample without and with different percentages of plastic fibers and lime.

Plastic fibers are similar to the roots of trees and vegetation which provide an excellent ingredient to improve the soils and the stability of natural slopes.

The addition of lime and plastic fibers are significantly influenced the maximum dry density (after compaction) and the compressive strength.

Keywords: Lime, plastic fibers, Proctor compaction, compression resistance, soil improvement.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 1 : caractéristiques des sols

1-Introduction.....	4
2-Définition d'un sol grossier	6
2-1-Exemples de sols grossiers	7
2-1-1-Les formations naturelle	7
2-1-2-Matériaux provenant de l'exploitation des massifs rocheux	11
2-1-3-Sols grossiers reconstitués	11
2-2-Les principaux problèmes liés à l'étude de ces sols	11
3- les sols fins	14
3-1-Composition minéralogique des sols fins	14
3-2-Microstructure des sols fins	16
3-3-Différents types de sols fins	16
3-3-1-Les argiles	17
3-3-2-Les limons	17
3-3-3-Les marnes	18
3-3-4-La vase.....	19
3-4-Principaux problèmes des sols argileux	21
3-4-1- Phénomène de gonflement	21
3-4-2- Tassements	22
3-4-3-Glislements	22
4-Différence entre sols fins et sols grenus	22
4-1-propriétés des sols grenus (pulvérulents)	22
4-2-propriétés des sols fins	23

CHAPITRE 2 :Les Sols Problématiques

1-Introduction	25
2-Les Sols Problématiques	25
2-1-Sols Affaissables (collapsible soils).....	25
2-2-Sols gonflants	25

2-3-Les sols de dispersion (dispersive soifs)	27
2-4-Les sols organiques et les sols tourbeux(Organic soils and peaty soils)	28

CHAPITRE 3 : Techniques d'amélioration des sols

1-Introduction	30
2-Méthodes mécaniques	30
2-1-vibrocompactage	30
2-1-1-Origine et développement	30
2-1-2-Principe de la technique	31
2-1-3-Mode opératoire	31
2-1-4-Avantages.....	33
2-1-5-Exemples d'applications	33
2-2- le compactage dynamique(ou pilonnage)	34
2-2-1-Objectifs	34
2-2-1-1-Description du procédé	34
2-2-1-2-Sols pouvant être traités.....	35
2-2-1-3-amélioration obtenues	36
2-2-2-Domainses d'application	37
2-3-Colonnes ballastées	39
2-3-1-Domaine d'application	39
2-3-1-1-Procédé à haute qualité environnementale.....	39
2-3-2-Colonnes ballastées sous massifs de fondations.....	39
2-3-2-1-Avantages	40
2-3-3-Colonnes ballastées sous dallage	40
2-3-4-Principe de réalisation.....	41
3-Méthodes hydromécaniques	43
3-1-Préchargement	43
3-1-1-Principe	44
3-1-2-surcharge en terre	44
3-1-3-consolidation atmosphérique	45
3-1-4-L'inondation	46
3-1-5-Paramètre d'exécution	47
4-Méthodes chimiques	47

4-1-Injection Solide	47
4-2- Amélioration des sols par addition d'ajouts minéraux	48
4-2-1-La chaux	48
4-2-1-1-Traitement type et conditions de mise en œuvre.....	48
4-2-2- le ciment	53
4-2-3- Utilisation des ajouts cimentaires	54

CHAPITRE4 :les matériaux utilisés

1- les matériaux utilisés.....	55
1-1-les chaux.....	55
1-1-1- la chaux hydraulique naturelle	55
1-1-2-la chaux aérienne éteinte.....	55
1-2 Fibres plastiques.....	56
2- classification des sols	57
2-1- La densité de sol	57
2-1-1 définition	57
2-1-2 Calcul la densité dans laboratoire :.....	57
2-2- analyse granulométrique.....	58
2-2-1-définition	58
2-2-2 -classe granulaire.....	58
2-2-3-objectif.....	59
2-2-4-principe de l'essai.....	59
2-2-5- Domaine d'application.....	59
2-2-6- Matériel utilisé	59
2-3-Essais (Testes) d'Atterberg.....	65
2-3-1-Introduction.....	65
2-3-2-But de l'essai	66
2-3-3-Limite de liquidité wl	66
2-3-5-Limite de plasticité wp	67
2-3-6-Expression des résultats.....	68
3-Classification des sols A et B	68

CHAPITRE 5 : Résultats et interprétation des essais au laboratoire.

1-Essais de compactage (Proctor normal)	69
1-1-INTRODUCTION sur l'essai Proctor.....	69
1- 2 - But de l'essai.....	69
1-3 - Résultats de essai Proctor.....	71
1-3-1- Pour sol A.....	71
1-3-2- Pour sol B.....	82
2 - Compression simple ou uniaxiale.....	92
2-1 – Pour sol A.....	92
2-2- Pour sol B.....	95
3- interprétation des Résultats.....	99

Conclusion

Références bibliographiques



Dédicace

Dédicace Je dédie ce projet :

A ma chère mère

A mon cher père

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs

. A mes frères

A ma chère sœur , Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études. A mon cher grand-père, Qui je souhaite une bonne santé.

A ma chère binôme ZEDADRA HANANE

Pour sa entente et sa sympathie.

NABIL et KAMAL,

Pour leurs indéfectibles soutiens et leurs patiences infinies.

UNE SPECIALE DEDICACE A UNE PERSONNE QUI COMPTE DE JA ENORMEMENT POUR MOI, ET POUR QUI JE PORTE BCP DE TENDRESSE ET DE RESPECT A TOI SALSA.

A mes chères ami(e)s OUSSAMA, LARBI, FAYESL, ISSAM, TITOU, ZAKI, HAROUN, ALLA SAYEF, LMouh, YOUNES, MINOU, SAFA, WARDA, kamilia, abirext

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles. A toute ma famille, A tous mes autres ami(e)s, A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

Merci



Dédicace

Je dédie cette mémoire :

À MES CHERS PARENTS

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A MON CHER MARI RIDA

qui m'a assisté dans les moments difficiles et m'a pris doucement par la main pour traverser ensemble des épreuves pénibles...

A MES CHERS ET ADORABLE FRÈRE YAZID

, la prunelle de mes yeux, HIBA, la douce, au cœur si grand, LINDA, mon petit frère que j'adore, SAMIR, que j'aime profondément. En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

A MON FRÈRE HOUCIN, Je te souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.

A MA GRAND MÈRE CHÈRE MALIKA

Qui m'a accompagné par ses prières, sa douceur, puisse Dieu lui prêter longue vie et bcp de santé et de bonheur dans les deux vies.

A LA MÉMOIRE DE MES GRAND-PÈRES ET MA GRANDE MÈRE

surtout mamati MAALEM FADA J'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde

*À MES CHERS ONCLES, TANTES, LEURS EPOUX ET EPOUSES A
MES CHERS COUSINS COUSINES Veuillez trouver dans ce travail
l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.*

*À MES AMIS DE TOUJOURS : ILHAM, SAFA . WARDA. ABIR.
KAMILA ... En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments
agréables que nous avons passés ensemble. Veuillez trouver dans ce travail
l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.*

Introduction générale

Lorsque la construction d'un ouvrage est décidée sur un terrain fixé dont la stratigraphie peut être constituée d'un sol dit « à problèmes » deux problèmes se posent le plus souvent. En premier lieu, il faut recourir à une opération dite d'amélioration du sol pour rendre faisable la construction de l'ouvrage en question dans un délai raisonnable. En second lieu, il faut tenir compte du coût de l'opération d'amélioration en évitant qu'elle soit disproportionnée par rapport au coût d'une autre solution de fondation envisageable.

L'opération d'amélioration s'accompagne, donc, de certaines performances qui conduiront à de nouvelles propriétés et caractéristiques du sol initialement à problèmes. C'est dans cette vue qu'une technique d'amélioration d'un sol est décidée.

Lorsqu'on opte pour une technique d'amélioration donnée on est amené le plus souvent à compléter les résultats issus de la première campagne de reconnaissance géotechnique du sol. En effet, on aura à déterminer de paramètres supplémentaires soient relatifs au sol initial soient relatifs à la technique d'amélioration décidée aussi bien pour les modalités d'exécution que pour les besoins du calcul et du dimensionnement.

Par ailleurs, la technique d'amélioration nécessite au préalable une vérification de la faisabilité de son exécution dans les conditions géotechniques du projet visé, et, d'autre part, la quantification des performances prédites pour le sol amélioré. Cela implique la réalisation de plots d'essais sur une plateforme très proches de l'emplacement de l'ouvrage. Ce qui permettra de comparer entre les propriétés du sol de fondation avant et après l'opération d'amélioration. Les résultats de ces essais servent également à la validation de méthodes de calcul spécifiques à la technique d'amélioration exécutée.

Néanmoins, une dernière étape devrait s'ajouter dans un projet d'amélioration des sols, en particulier, qui est celle du suivi dans le temps du comportement de l'ouvrage construit sur le sol amélioré. Cela nécessite également l'enregistrement de mesures qu'il faudra traiter et analyser ultérieurement en vue d'une meilleure justification de la technique d'amélioration retenue.

CHAPITRE 1

Carctéristique des sols

CHAPITRE 2

LES SOLS PROBLEMATIQUES

CHAPITRE 3

Techniques d'amélioration des sols

CHAPITRE 4

les matériaux utilisés

CHAPITRE 5

Résultats et interprétation des essais au laboratoire.

Remerciement



Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu clément et le miséricordieux de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance et ma parfaite gratitude à mon encadreur

Dr. Rouaiguia Ammare

Qui nous a témoigné de sa confiance et de son aide scientifique et par son expérience et sa compétence.

Nous adressons de chaleureux remerciements à tous les enseignants et les travailleurs d'université de 8 mai 1945 'Guelma', pour les moyens qui ont été mis à notre disposition durant toute la durée de la formation.

Je tiens à remercier particulièrement tous les membres du Département de Génie Civil

Pour leurs soutiens et leurs aides

Nous remercions aussi tous nos amis pour leurs aides, leurs patiences, leurs compréhensions et leurs encouragements, particulièrement

Merci à vous tous.



Listes des *F*igures

Chapitre 1		Page
Figure 1.1	: Constituants d'un sol(www.entre-aix-fr/documents/135-geotechnique/3-classification sols/co/cours-2-caractéristique.html)	4
Figure 1.2	: Classification des particules solides d'un sol(www.entre-aix-fr/documents/135-geotechnique/3-classification sols/co/cours-2-caractéristique.html)	6
Figure 1.3	Courbes granulométriques d'éboulis (courbes du matériau complet et écrêté) (Shirdam et al., 1998)	8
Figure 1.4	: Gisement d'éboulis du Puech de l'Azé, en Dordogne (Photographie H. Laville,1975)	9
Figure 1.5	: Gisement de dépôt morainique en Dordogne (Photographie H. Laville,1975)	9
Figure 1.6	: Vue d'un sol grossier alluvionnaire (Fragaszy et al., 1990)	10
Figure 1.7	: Exécution d'un remblai routier sur la RN9	12
Figure 1.8	: Gisement d'éboulis du Puech de l'Azé, en Dordogne(Photographie H. Laville,1975)	13
Figure 1.9	: argile (forum.permaculture.fr/viewtopic.php?f=85&t=11465)	17
Figure 1.10	: limon (photos-afes.fr//picture.php ?/270)	18
Figure 1.11	:les marnes (www.karakas-francais.ch/geotechnique.html)	19
Figure 1.12	:Traversée de la vallée de la Charente par l'autoroute A10 [Scetauroute, 1986] (Cité par Serbah, 2011)	20
Figure 1.13	: Schéma de la composition simplifiée des sédiments. (Proulhac, Ker Lann 2006)	21
Figure 1.14	:Exemple d'un sable grossier (www.entre-aix-fr/documents/135-geotechnique/3-classification sols/co/cours-2-caractéristique.html)	23
Figure 1.15	:Exemple d'un argile (www.entre-aix-fr/documents/135-geotechnique/3-classification sols/co/cours-2-caractéristique.html)	24
Chapitre 2		
Figure 2.1	: Exemple des sols affaissables	26
Figure 2.2	:Fissuration longitudinale de routes due au retrait et gonflement des sols	27

Listes des Figures

Figure 2.3	: Exemple des sols de dispersion	28
Figure 2.4	: Exemple des sols tourbeux	29
Chapitre 3		
Figure 3.1	: Étapes du vibrocompactage des sables et graviers (Document Keller)	31
Figure 3.2	: vibrocompactage – mise en œuvre (DESCRIPTIFS DES PROCÉDES D'AMÉLIORATION ET RENFORCEMENT DE SOL-Jean-Marc DEBATS)	32
Figure 3.3	: vibrocompactage – mode d'action (DESCRIPTIFS DES PROCÉDES D'AMÉLIORATION ET RENFORCEMENT DE SOL-Jean-Marc DEBATS)	33
Figure 3.4	: exemples de chantiers de compactage dynamique (documents de Géopac® et Ménard et soltraitement®)	34
Figure 3.5	: Réalisation du compactage selon un maillage bien défini (documents de Ménard soltraitement®)	35
Figure 3.6	: comparaison des caractéristiques du sol avant et après consolidation dynamique (DTU.13.2)	37
Figure 3.7	: chantier de compactage dynamique (aéroport de Nice-France) (documents de Ménard soltraitement®)	38
Figure 3.8	8 : Colonnes ballastées sous dallage (www.Keller-france.com/technique/procèdes/colonnes ballastées)	40
Figure 3.9	: préparation (www.Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes ballastées)	41
Figure 3.10	: Remplissage (www.Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes ballastées)	41
Figure 3.11	: Fonçage (www.Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes ballastées)	42
Figure 3.12	12 : Compactage (www.Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes ballastées)	42
Figure 3.13	: Finition (www.Keller-france.com/technique/procèdes/colonnes ballastées)	43
Figure 3.14	: Principe du préchargement pour le contrôle des tassements (Magnan J.P. & pilot, G.1988)	44
Figure 3.15	: réseaux de drains verticaux (Magnan J.P. & pilot, G.1988)	45
Figure 3.16	: technique de préchargement (Magnan J.P. & pilot, G.1988)	46
Figure 3.17	: chargement par remblais ou par réservoir (Magnan J.P. & pilot, G.1988)	46
Figure 3.18	Injection Solide (PLATES - FORMES AMÉLIORATION DES SOLS)	47

Listes des Figures

Figure 3.19	: Vue générale d'un chantier de traitement de sol.(DOCUMENTATION TECHNIQUE Routes n°89 • Septembre 2004)	49
Figure 3.20	:Epandage du liant (DOCUMENTATION TECHNIQUE Routes n°89 • Septembre 2004)	50
Figure 3.21	:Malaxage (DOCUMENTATION TECHNIQUE Routes n°89 • Septembre 2004)	50
Figure 3.22	:Compactage partiel (DOCUMENTATION TECHNIQUE Routes n°89	51
Figure 3.23	:Compactage final (DOCUMENTATION TECHNIQUE Routes n°89 • Septembre 2004)Septembre 2004)	52
Figure 3.24	:Protection de surface de la couche traitée (DOCUMENTATION TECHNIQUE Routes n°89 • Septembre 2004)	52
Figure 3.25	: Chantier de traitement du sol au ciment [Bell,1978]	53
Chapitre 4		
Figure 4.1	: les dimensions de sol	58
Figure 4.2	Tamiseur mécanique	60
Figure 4.3	les Tamis utilisés	60
Figure 4.4	: la courbe granulométrique de sol A	62
Figure 4.5	; la courbe granulométrique de sol B	64
Figure 4.6	: différents états sont les « Limites d'Atterberg »	66
Chapitre 5		
Figure 5.1	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (sans additives).	73
Figure 5.2	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (avec 2% chaux).	74
Figure 5.3	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (avec 4% chaux).	75
Figure 5.4	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (avec 6% chaux).	76
Figure 5.5	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (sans et avec de la chaux).	76
Figure 5.6	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (avec 20 g de Plastique)	78
Figure 5.7	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (avec 40 g de fibres Plastique)	79
Figure 5.8	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (avec 60 g de fibres Plastique).	80
Figure 5.9	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (sans et avec des fibres plastiques).	80
Figure 5.10	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (sans et avec de la chaux et des fibres plastiques).	
Figure 5.11	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (sans additives).	81
Figure 5.12	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (avec 2%	84

Listes des Figures

	chaux).	
Figure 5.13	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (avec 4% chaux).	85
Figure 5.14	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (avec 6% chaux)	86
Figure 5.15	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (sans et avec de la chaux).	87
Figure 5.16	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (avec 20 g des fibres Plastiques).	88
Figure 5.17	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (avec 40 g des fibres Plastique)	89
Figure 5.18	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (avec 60 des fibres plastique)	90
Figure 5.19	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (sans et avec des fibres plastiques).	91
Figure 5.20	: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (sans et avec de la chaux et des fibres plastiques).	91

Listes des *photos*

Chapitre 4		
Photo 4.1	: limite de liquidité a laboratoire (LTPE – annaba)	67
Photo 4.2	: limite de plasticité a laboratoire (LTPE-annaba)	68
Chapitre 5		
Photo 5.1	: Essais de compactage dans labortoire (LTPE .Annaba)	71
Photo 5.2	: l’essai proctor pour sol A sans additives dans laboratoire (LTPE.Annaba)	72
Photo 5.3	: l’essai proctor pour sol A avec la chaux _ laboratoire (LTPE.Annaba)	75
Photo 5.4	: l’essai proctor pour sol A avec Plastique _ laboratoire (LTPE.Annaba)	76
Photo 5.5	: l’essai proctor pour sol B sans additives _ laboratoire (LTPE.Annaba)	82
Photo 5.6	:l’essai proctor pour sol B avec la chaux_ laboratoire (LTPE.Annaba)	83
Photo 5.7	: l’essai proctor pour sol B avec les fibres plastique_ laboratoire (LTPE.Annaba)	88
Photo 5.8	: les machines utilisai pour la Compression simple_ laboratoire (LTPE.Annaba)	92
Photo 5.9	: la déformation de Sol A avec des fibres plastique après la compression laboratoire (LTPE.Annaba)	94
Photo 5.10	: la déformation de Sol B avec plastique après la compression laboratoire (LTPE.Annaba)	96

Listes Des Tableaux

Chapitre 1		Page
Tableau 1.1	Les plus simples définitions des facies d'après Allen (Cité par Boutouil, 2000)	20
Chapitre 3		
Tableau 3.1	Composants principaux du ciment Portland [Lawton, 2004]	53
Chapitre 4		
Tableau 4.1	: Le tableau des résultats de l'analyse granulométrique pour sol A	61
Tableau 4.2	: Le tableau des résultats de l'analyse granulométrique pour sol B	63
Tableau 4.3	: la norme française NF P18-560 utilisée notamment dans le domaine	65
Tableau 4.4	: indice de plasticité pour sol A	68
Tableau 4.5	: indice de plasticité pour sol B	69
Tableau 4.6	: classification indice de plasticité et degré de plasticité	69
Tableau 4.7	: la Teneur en eau initial a les doux sol A et B	70
Chapitre 5		
Tableau 5.1	: Caractéristiques essentielles pour les deux types de compactage	70
Tableau 5.2	: Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol A (sans additives)	72
Tableau 5.3	: Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol A (avec 2% Chaux)	74
Tableau 5.4	: Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol A (avec 4% Chaux)	74
Tableau 5.5	: Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol A (avec 6% Chaux)	75
Tableau 5.6	: Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol A (avec 20 g de Plastique)	77
Tableau 5.7	: Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol A (avec 40 g de Plastique)	78
Tableau 5.8	: Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol A (avec 60 g de Plastique)	79
Tableau 5.9	: Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol B (sans additives)	82
Tableau 5.10	: Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol B (avec 2% Chaux)	84
Tableau 5.11	: Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol B (avec 4% Chaux)	85
Tableau 5.12	: Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol B (avec 6% Chaux)	86
Tableau 5.13	: Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol B (avec 20 g de Plastique)	88
Tableau 5.14	: Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol B (avec 40 g de Plastique)	89

Listes Des Tableaux

Tableau 5.15	: Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol B (avec 60 g de Plastique)	90
Tableau 5.16	: Valeurs de la résistance de compression Sol A (sans additives)	92
Tableau 5.17	: Valeurs de la résistance de compression Sol A (avec 2% chaux)	93
Tableau 5.18	: Valeurs de la résistance de compression Sol A (avec 4% chaux)	93
Tableau 5.19	: Valeurs de la résistance de compression Sol A (avec 6% chaux)	93
Tableau 5.20	: Valeurs de la résistance de compression Sol A (avec 20 g de Plastique)	94
Tableau 5.21	: Valeurs de la résistance de compression Sol A (avec 40 g de Plastique)	94
Tableau 5.22	: Valeurs de la résistance de compression Sol A (avec 60 g de Plastique)	95
Tableau 5.23	: Valeurs de la résistance de compression Sol B (sans additives)	95
Tableau 5.24	: Valeurs de la résistance de compression Sol B (avec 2% chaux)	95
Tableau 5.25	: Valeurs de la résistance de compression Sol B (avec 4% chaux)	96
Tableau 5.26	: Valeurs de la résistance de compression Sol B (avec 6% chaux)	96
Tableau 5.27	: Valeurs de la résistance de compression Sol B (avec 20 g de Plastique)	97
Tableau 5.28	: Valeurs de la résistance de compression Sol B (avec 40 g de Plastique)	97
Tableau 5.29	: Valeurs de la résistance de compression Sol B (avec 60 g de Plastique)	97
Tableau 5.30	: comparaison la masse volumique sèche maximale et la résistance de compression pour sol A	98
Tableau 5.31	: comparaison la masse volumique sèche maximale et la résistance de compression pour sol B	99

1-Introduction

Les sols sont des matériaux complexes composés de phases :

- Solides (particules minérales ou organiques)
- Liquide (eau interstitielle chargée en éléments solubles)
- Gazeuse.

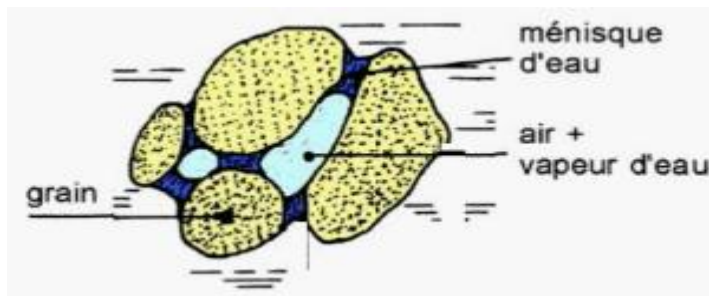


Figure 1-1: Constituants d'un sol([www.entre-aix-fr/documents/135-geotechnique/3-classification sols/co/cours-2-caractéristique.html](http://www.entre-aix-fr/documents/135-geotechnique/3-classification%20sols/co/cours-2-caract%C3%A9ristique.html)).

La géotechnique routière valorise le sol comme matériau de construction et s'intéresse au sol dans ses interactions avec les agents chimiques de traitement. L'étude géotechnique comporte une identification du sol naturel et une détermination fine des caractéristiques mécaniques du sol traité

Un sol est défini par ses propriétés, principalement sa texture et sa structure.

- Texture du sol: proportion des particules minérales de différentes tailles qui composent le sol, ex. : sables $> 63 \mu\text{m}$, limons de $63 \mu\text{m}$ à $2 \mu\text{m}$, et argiles $< 2 \mu\text{m}$.
- Structure du sol: taille et disposition des particules qui composent le sol.

Minéralogie et la chimie des sols :

Les sols sont constitués de particules de minéraux regroupées en agrégats. Ces minéraux sont stables ou en train d'évoluer dans les conditions thermo-barométriques et climatiques de la surface de la terre. Généralement y sont rencontrés :

- le quartz

Chapitre1 : caractéristiques des sols

- les argiles
- les feldspaths (potassiques et plagioclases)
- les micas
- les carbonates (calcite et dolomite)
- les oxydes et hydroxydes métalliques dont l'hématite, la goethite et la limonite pour le fer

Ces minéraux se présentent généralement dans les sols sous forme :

- de grains polygonaux plus ou moins réguliers dont la taille se situe entre quelques microns et quelques millimètres.
- de lamelles pour les argiles dont la plus grande dimension ne dépasse pas quelques microns
- d'agrégats correspondant à des fragments de roches. Leurs formes résultent de la morphologie des minéraux les constituants.

Les propriétés physiques et mécaniques du sol dépendent de la nature des assemblages minéraux. Ainsi les minéraux granulaires (quartz, carbonates) n'ont pas de cohésion propre. Seules les argiles présentent une cohésion, qui résulte d'interactions spécifiques avec l'eau.

Phase gazeuse :

- air + gaz de décomposition ou vapeur d'eau

Un sol est saturé lorsque les vides sont remplis.

Phase liquide :

- eau absorbée : constitue un film entre les grains jouant ainsi un rôle de lubrifiant.

Ne s'écoule pas, s'élimine par chauffage très intense ($>300^{\circ}$).

- eau libre : s'écoule, s'élimine par étuvage vers 100° . ([www.entre-aix-fr/documents/135-geotechnique/3-classification sols/co/cours-2-caractéristique.html](http://www.entre-aix-fr/documents/135-geotechnique/3-classification%20sols/co/cours-2-caractéristique.html)).

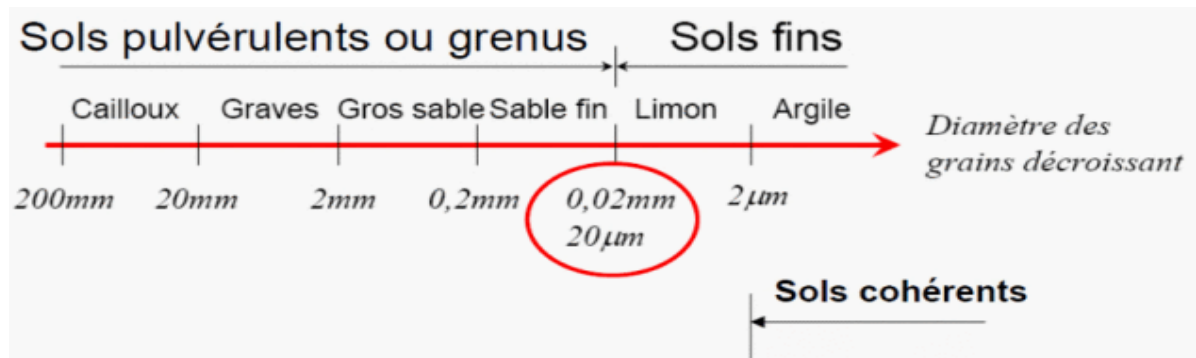


Figure 1-2 : Classification des particules solides d'un sol([www.entre-aix-fr/documents/135-geotechnique/3-classification sols/co/cours-2-caractéristique.html](http://www.entre-aix-fr/documents/135-geotechnique/3-classification%20sols/co/cours-2-caract%C3%A9ristique.html)).

2-Définition d'un sol grossier :

Le terme « sol grossier » n'est trouvé dans aucune des classifications utilisées en mécanique des sols et dans le domaine du terrassement. En fait, diverses classes de sols pourraient correspondre à un sol grossier. Ainsi, ce type de sol pourrait être considéré, selon la classification LCPC, comme une grave, un sable ou même un sol fin.

Dans la bibliographie, il existe diverses appellations pour nommer un sol grossier. Nous avons pu en répertorier trois types :

- celles faisant référence à l'origine géologique du matériau : sols alluvionnaires, matériaux superficiels des versants naturels, enrochements (les termes anglo-saxons correspondant sont : riverbed gravel, glacial till, rockll material) ;
- les appellations qui dénotent de leur caractère hétérogène : graves argileuse ou limoneuses, sols graveleux avec fines, sols comportant des fines et des gros éléments (les termes anglo-saxons correspondant sont : Gravel-Clay, Sandy-Gravel, soil with oversize particle, earth-rockmixture)
- on distingue enfin les dénominations faisant référence à la taille des constituants : sols à gros grains, matériaux granulaires non conventionnels, sols grossiers.

On peut donc concevoir qu'il est très difficile de donner une définition exacte des sols grossiers, cependant nous allons en présenter les principales caractéristiques. La première caractéristique est celle d'avoir une granulométrie étalée qui sera plus ou moins bien graduée selon le type de sol. La seconde caractéristique est celle de contenir des éléments granulaire ayant la taille d'un gravier, d'un galet ou d'un bloc rocheux

Pour définir un sol grossier, nous pensons qu'il faut s'appuyer sur ces deux caractéristiques indissociables. En effet, un sol constitué d'un mélange d'argile et de sable grossier ne peut pas être considéré comme un sol grossier même si sa granulométrie est étalée. De la même façon, les ballasts qui sont des matériaux à forte granularité ne correspondent pas à la définition qu'on se fait d'un sol grossier car la distribution granulométrique de ces matériaux est relativement serrée. De même, les sols contenant des blocs erratiques ne peuvent pas être considérés comme des sols grossiers.

2-1-Exemples de sols grossiers :

Après avoir déni les types de matériaux naturels pouvant s'apparenter, selon nous, à des sols grossiers, nous en présentons maintenant quelques exemples. On distingue les formations naturelles, les sols provenant de l'exploitation des massifs rocheux et enfin *les mélanges* qui sont des sols constitués en laboratoire, en mélangeant différents sols pour étudier l'influence d'un paramètre particulier.

2-1-1-Les formations naturelle :

a- Les éboulis :

Les fragments de roches et les blocs qui se détachent les uns après les autres des parois rocheuses soit par éclatement ou sous l'action du gel et des chocs thermiques, descendent les pentes sous l'effet de la gravité. Ces débris rocheux s'accumulent sur le versant ou au pied du versant et finissent par former des nappes, des talus, ou des cônes d'éboulis. Ces formations sont constituées d'éléments anguleux très hétérométriques, et peuvent également contenir des éléments argileux provenant du lessivage des fragments rocheux par le ruissellement des eaux de pluie (Figure 1-2). Comme le montre la figure 1-1, la distribution granulométrique des éboulis est très étalée. Ce type de sols grossiers a fait l'objet de récents travaux de recherche en France. Il s'agissait d'éboulis prélevés sur quatre sites de la région de Saint Jean de Maurienne (Shirdam et al., 1998) et d'éboulis provenant de l'érosion de massifs cristallins (Dendani, 1988).

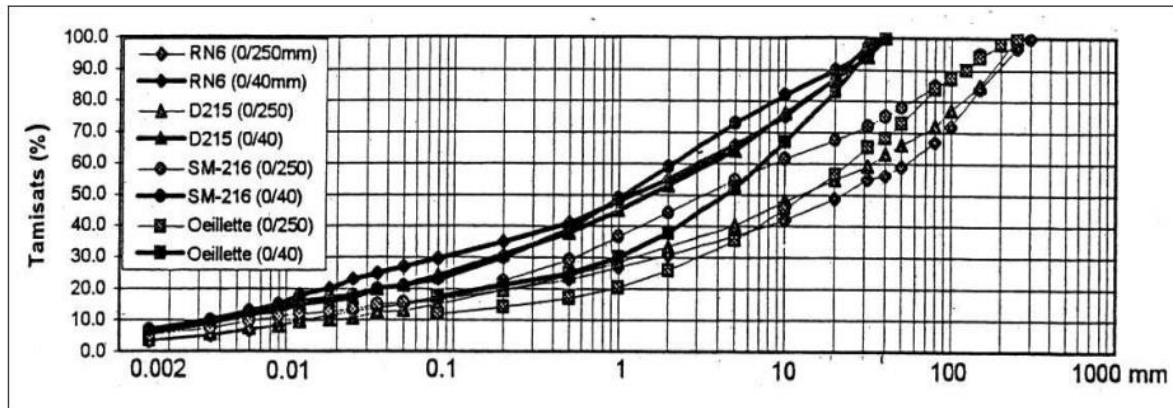


Figure 1-3 : Courbes granulométriques d'éboulis (courbes du matériau complet et écrêté)
(Shirdam et al., 1998).

b- Les moraines :

Lors des périodes glacières, l'avancée des glaciers provoque une érosion des ans des massifs rocheux. Les résidus de cette érosion sont transportés par la glace. Lors des périodes de déglaciation la fonte des glaciers laisse apparaître des formations argileuses qui contiennent des blocs rocheux généralement peu émoussés, dont la taille atteint parfois plusieurs mètres cubes (Figure1-5). Ces matériaux sont appelés argiles morainiques ou argiles à blocs (les termes anglo-saxons étant boulder-clays ou glacial till). Les blocs sont emballés dans l'argile. et les éléments appartenant à la classe granulométrique des graviers ou des sables sont absents. La distribution granulométrique de ces sols est donc très étalée et discontinue, et la proportion de fines est assez importante (30% à 40%).

Ce type de sol grossier n'a fait l'objet que de peu de travaux de recherche, nous citons les travaux de Insley (Insley & Hillis, 1965), ceux de Gens (Gens & Wight, 1979).



Figure 1-4 : Gisement d'éboulis du Puech de l'Azé, en Dordogne (Photographie H. Laville,1975)



Figure 1-5 : Gisement de dépôt morainique en Dordogne (Photographie H. Laville,1975).

c- Les alluvions :

A la différence des moraines et des éboulis, ces formations ont une granulométrie moins étalée : en effet, on note dans ces sols, une absence ou une faible proportion de fines. Les éléments constituant ces sols grossiers sont plutôt de forme arrondie (Figure 1-6).

Selon la nature minéralogique et pétrographique des bassins versants rencontrés par le cours d'eau, on distingue trois types d'alluvions. Lorsque le bassin versant est constitué de calcaire, on parle d'alluvions du même nom.

Chapitre1 : caractéristiques des sols

Les alluvions silico-calcaires constituent la deuxième famille de ce type de formation superficielle. La partie siliceuse est constituée soit de débris de roches magmatiques ou métamorphique, soit de silex.

On distingue finalement les alluvions siliceuses. Certaines d'entre elles sont constituées d'un mélange de silex qui constitue la partie grossière, et de quartz dans la partie fine. D'autres sont constituées de galets et de graviers granitiques, dioritiques ou gneissiques, et de sable quartzeux.

Les sols grossiers alluvionnaires sont ceux qui ont fait l'objet du plus grand nombre d'études (Boudreau et al., 1989; Holtz & Willard, 1967; Frigaszy).

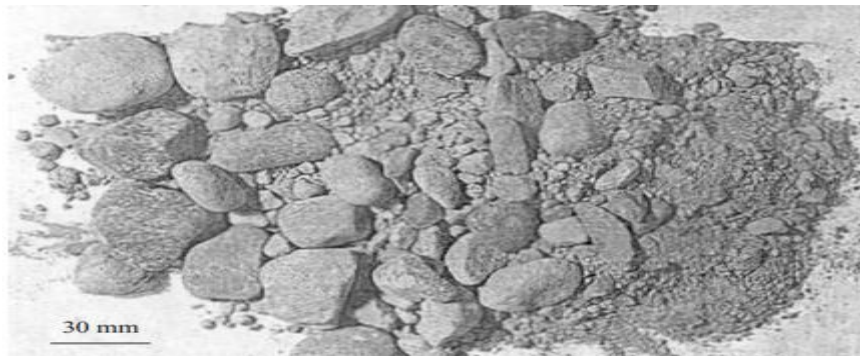


Figure 1-6 : Vue d'un sol grossier alluvionnaire (Fragaszy et al., 1990).

d- Les altérites :

Ces formations superficielles sont le résultat de l'altération mécanique et chimique des massifs rocheux fissurés. Le gel et les fortes variations de température sont les agents de la dégradation mécanique, leur action conduit à la formation d'éléments hétérométriques.

L'altération chimique par l'eau et par les éléments que celle-ci transporte (CO_2 , NO_3^- , acides organiques) conduit à la formation d'éléments de nature variée.

La première famille d'altérite est constituée par les arènes et les gores qui sont respectivement le produit de l'altération des roches magmatiques (granites, diorites...) et des roches métamorphiques (gneiss, micaschiste).

Les arènes et les gores sont formés d'îlots de roche saine en forme de boule et entourés par une matrice d'éléments ns plus ou moins argileux qui résulte d'une altération chimique.

Les argiles à silex constituent le deuxième grand groupe d'altérites. Elles sont le produit de la décarbonatation par lixiviation des roches calcaires tendres et fissurées.

Lorsque ces calcaires contiennent des accidents siliceux (silex, chert, chenailles, meulière), ces derniers se trouvent mélangés à l'argile résiduelle. Ainsi sont formées les argiles à silex du bassin de Londres, de Normandie et certaines argiles à meulière du bassin Parisien.

2-1-2-Matériaux provenant de l'exploitation des massifs

rocheux :

Il s'agit de débris rocheux obtenus par fragmentation du massif rocheux à l'aide d'explosifs ,suivi d'un concassage des blocs. Selon la fragmentabilité de la roche, on obtient un matériau contenant des éléments plus ou moins hétérométriques avec une production plus ou moins importante de fines non plastiques.

Le comportement mécanique de ce type de sols grossiers a été largement étudié (Holtz & Willard, 1967)

2-1-3-Sols grossiers reconstitués :

Il s'agit de matériaux grossiers obtenus en mélangeant des éléments de tailles et de natures diverses. Ces sols grossiers sont ainsi reconstitués an d'étudier l'influence de paramètres spécifiques comme la proportion et la taille des graviers ou la nature de la fraction granulaire plus fine.

Nous citons, à titre d'illustration, les travaux de Donaghe (Donaghe & Torrey, 1979), Holtz (Holtz & Willard, 1967).

2-2-Les principaux problèmes liés à l'étude de ces sols :

Les sols grossiers sont utilisés comme matériaux de construction d'ouvrages tels que les barrages, les remblais ou les couches de forme (Figure1-7). Ils peuvent également constituer le support d'ouvrages tels que les voies de circulation se trouvant sur des versants naturels (Figure 1-8).

Pour caractériser le comportement mécanique de ces sols, on se trouve confronté à deux types de difficultés intrinsèques à leur étalement granulométrique et leur hétérogénéité de nature.



Figure 1-7 : Exécution d'un remblai routier sur la RN9.

2-2-1- Choix des dimensions des dispositifs expérimentaux :

Pour caractériser le comportement mécanique des sols en laboratoire, on utilise des dispositifs expérimentaux dont les dimensions contraignent à effectuer les essais de caractérisation sur un volume de sol bien défini. Ainsi, pour étudier, par exemple, le comportement en rupture sous un chargement triaxial de révolution, on fabrique des éprouvettes cylindriques dont les diamètres courants sont 37, 50, 70 ou 100 mm. Exceptionnellement, les échantillons de sol peuvent avoir des diamètres allant jusqu'à 300 mm ou 500 mm.

Afin de pouvoir caractériser le comportement du sol à partir d'essai mécanique sur des éprouvettes en laboratoire, il est nécessaire que le volume des éprouvettes soit suffisamment grand pour être un volume représentatif du sol sur site. Pour que le volume des éprouvettes soit un volume représentatif, il faut que le rapport entre la taille des plus gros constituants contenus dans l'éprouvette et la dimension caractéristique de celle-ci inférieure à 1/10 ou 1/5.

L'une des caractéristiques des sols grossiers est qu'ils peuvent être constitués d'éléments dont la taille peut aller jusqu'à un mètre. Dans ces conditions, pour tester un volume de sol représentatif, il faudrait effectuer des essais sur des éprouvettes de très grande taille en utilisant des dispositifs de grandes dimensions.

L'utilisation de dispositifs d'une telle taille poserait des problèmes pratiques évidents (manutention des pièces du dispositif, fabrication des éprouvettes ...) et induirait des coûts financiers élevés.

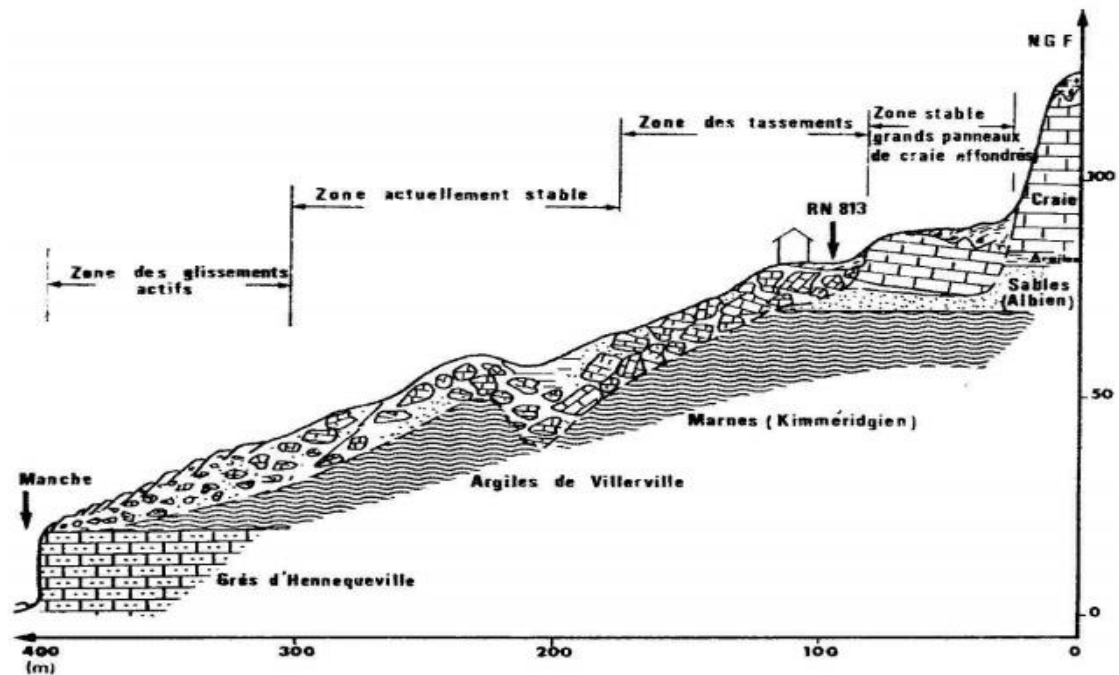


Figure 1-8 : Gisement d'éboulis du Puech de l'Azé, en Dordogne (Photographie H. Laville, 1975)

Ainsi, le premier problème posé par l'étude du comportement mécanique des sols grossiers est le choix d'une éprouvette dont la taille soit adéquate : il s'agit de choisir les dimensions de l'éprouvette qui réalise un bon compromis entre un dispositif de taille raisonnables et la nécessité de pouvoir tester un volume de sol suffisamment grande pour être représentatif du sol sur site.

Pour pallier cette difficulté inhérente à la taille souvent très élevées des constituants des sols grossiers, les géotechniciens ne testent en laboratoire que la fraction granulaire dont le diamètre des éléments les plus gros, est acceptable compte tenu des dimensions des éprouvettes. Ils déduisent ensuite les caractéristiques mécaniques du sol grossier réel à partir de celles de la fraction granulaire testée en laboratoire. Malgré des recherches effectuées dans ce sens, il n'existe encore pas de règle fiable permettant de faire cette extrapolation.

2-2-2- Présence de particules argileuses et d'éléments granulaires

Les moraines ou les argiles à silex sont des exemples de sols grossiers qui contiennent une

Chapitre1 : caractéristiques des sols

quantité non négligeable d'argile à laquelle se trouvent mélangés des éléments granulaires inertes vis-à-vis de l'eau (sable, graviers, galets ou blocs). Lorsqu'on mène une étude sur ces sols ou une campagne de reconnaissance, on se pose naturellement la question suivante : ‘‘doit-on considérer ces sols grossiers comme des sols argileux ou pas?’’ .

Il est tout à fait légitime de se poser cette question car depuis une vingtaine d'années, les travaux de recherche en mécanique des sols portent surtout sur des matériaux de composition uniforme c'est-à-dire soit sur des mélanges argilo-limoneux, soit sur des sols granulaires relativement propres .

Le problème qui se pose dans le cas des sols grossiers à matrice argileuse est celui de comprendre puis de prévoir comment chacun des deux éléments (argileux et non argileux) contribue au comportement du mélange.

Ceci constitue un problème supplémentaire posé par l'étude du comportement mécanique des sols grossiers. C'est une question très importante car l'argilosité des ces sols hétérogènes est un paramètre qui permet de définir les conditions de leur utilisation pour les travaux de terrassement.(HAL Id: pastel-00001295 Submitted on 10 Sep 2010).

3- les sols fins :

Comme tous les autres types de sols fins sont des matériaux meubles issus de la dégradation et de la décomposition des roches par des agents atmosphériques et des activités biologiques. Ils sont caractérisés par une forme en feuillet (le rapport de la longueur sur l'épaisseur est supérieur à 10). Ce qui donne aux particules une apparence semblable à celle d'une feuille de papier. En général , ces particules sont plus flexibles que les particules volumineuses. Les sols qui en sont constitués sont donc plus compressibles et ils se déforment facilement sous l'effet d'une charge statique, par contre, ils peuvent présenter une meilleure stabilité face aux vibrations et aux chocs.

3-1-Composition minéralogique des sols fins :

Les sols sont généralement le résidu de l'altération de différents types de substrats rocheux ou meubles, leur composition minéralogique dépend donc directement de celle de la roche mère.

Chapitre1 : caractéristiques des sols

Cependant, l'altération peut modifier cette composition. Les particules solides des sols sont composées de divers minéraux. Ils sont souvent classés en quatre catégories (minéraux primaires, minéraux secondaires, sels et matières organiques) suivant leur composition, leur mode de formation et leur cause de formation,(xiang-lingLI,1999).

3-1-1-Les minéraux primaires :

Ce sont les minéraux résiduels qui échappé à l'altération, ils sont stables (ils conservent alors la signature minéralogique et géochimique des matériaux source), ou instables (n'ayant pas subi suffisamment les effets de l'altération). Le quartz, les feldspaths et les micas qui se retrouvent dans diverses fractions granulométriques sont les minéraux primaires les plus abondants dans les sols. Ils peuvent résulter d'une simple érosion des substrats avec tris granulométriques au cours de la sédimentation. Cette catégorie de minéraux se retrouve souvent dans les sols grenus (sables grossier, graviers, etc.).

3-1-2-Les minéraux secondaires

Ils résultent de la transformation (ou dégradation) géochimique des minéraux primaires, ce qui impliquent donc un changement de statut minéralogique accompagné d'une réduction de taille. Ils comprennent divers types de minéraux argileux (simples ou inter stratifiés), ainsi que des hydroxydes ou oxydes généralement de Fe, parfois de Mn ou d'Al. Les minéraux argileux se cantonnent dans une gamme granulométrique comprise entre le micron et quatre microns.

3-1-3-Les sels solubles :

Les solutions qui résultent de l'altération par hydrolyse, transportent des éléments chimiques actifs tels que K, Na, Ca, Mg. Soit ces éléments quittent définitivement les sites de l'altération, soit ils y demeurent en constituant des phases minérales neuves (carbonates, sulfates, sels). Les carbonates peuvent jouer un rôle de ciment temporaire ou définitif scellant les minéraux argileux. Par conséquent, ces sels peuvent influencer fortement le comportement hydromécanique des sols.

3-1-4-Les matières organiques :

Elles résultent de la transformation hydrolytique ou biologique des résidus végétaux à la surface des sols. La matière organique, à raison de quelques pour-cent, peut être présente dans

Chapitre1 : caractéristiques des sols

les sédiments. Elle se caractérise par une forte capacité de rétention d'eau, ainsi, agit sensiblement sur le comportement géomécanique d'un matériau argileux.

3-2-Microstructure des sols fins :

Dans les sols fins, les forces de surface sont très importantes. Les forces d'attraction et de répulsion jouent donc un rôle prépondérant dans la mise en place des particules élémentaires (plaquettes). Ce sont des phénomènes extrêmement complexes.

Les plaquettes peuvent être arrangées dans une gamme de configurations de sédimentation, les plaquettes d'argile peuvent se combiner et former des agrégats sous des formes diverses et se comportent comme des unités individuelles.

Selon Collins et al (1974), la microstructure d'un sol fin résulte essentiellement des conditions suivantes :

- Acidité ;
- Vitesse de dépôt ;
- Minéralogie des sols ;
- Etat d'agitation de l'eau ;
- Quantité de matière organique ;
- Dimension et forme des particules .
- Caractéristiques et charge électrochimiques de l'électrolyte au moment de dépôt du sol (concentration, etc.) .

Cependant, Collins et McGown (1974), ainsi que Collins (1984), suggèrent de décrire la microstructure d'un sol à l'aide des trois types d'unités de base suivantes :

- Les espaces vides.
- L'assemblage des particules .
- L'arrangement des particules élémentaires(plaquettes) .

3-3-Différents types de sols fins :

les sols fins sont les matériaux dans lesquels les particules de nature argileuse occupent une place prédominante. Cependant, lorsque les particules argileuses sont supérieures à 30%, et les particules grossières sont inférieures à 10%, le matériau est classé comme étant un sol fin.

Chapitre1 : caractéristiques des sols

Les sols à grains fins regroupent évidemment tous les sols dont les particules sont invisibles à l'œil nu, suivant la classification des sols par granulométrie, le vocable sols fins désigne en général les argiles, les limons, les marnes...

3-3-1-Les argiles :

Les argiles sont des roches sédimentaires à grains fins, de taille inférieure à 5 μm , composée pour une large part de minéraux spécifiques, silicates en général, d'aluminiums plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée qui explique leur plasticité, ou bien une structure fibreuse qui explique leurs qualités d'absorption. Elles absorbent l'eau et forment une pâte imperméable (perméabilité inférieure à 0,2 mm/h), appelée couramment terre glaise, colorée par des oxydes de fer en ocre, rouge, vert.

Les argiles peuvent être gonflantes, notamment celles de la famille des Montmorillonites lorsqu'elles absorbent l'eau et, au contraire, diminuer de volume sous l'effet de la sécheresse, allant jusqu'à fissurer en surface et même sur une profondeur de 2 m à 4 m. Par ailleurs, sous l'effet d'une charge, par exemple celle d'une construction, une partie de l'eau absorbée contenue entre les grains d'argile est chassée, ce qui a pour conséquence de provoquer un tassement sensible du sol.



Figure 1-9 : argile (forum.permaculture.fr/viewtopic.php?f=85&t=11465)

Les argiles représentent en général une assise acceptable à médiocre lorsqu'elles sont recouvertes par d'autres couches de terrain. En revanche, elles sont dangereuses lorsqu'elles affleurent au niveau du sol, du fait de leur instabilité, se traduisant par des variations de volume et un fluage dans les terrains en pente.

D'autres types de sédiments à grains fins contiennent des argiles telles que les marnes et le loess.

3-3-2-Les limons :

Chapitre1 : caractéristiques des sols

Les limons constitués de silt, de lœss, possèdent un squelette siliceux à silicocalcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles, la teneur en argile est variable. Ils sont peu perméables et constituent des terres de culture fertiles. Leur assise est médiocre et sont donc à éviter pour les fondations.



Figure 1-10 : limon (photos-afes.fr//picture.php ?/270)

3-3-3-Les marnes :

Les marnes sont à la fois argileuses et calcaires. On considère, selon leur composition, trois grandes catégories:

- les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35 % de carbonate de calcium;
- les marnes proprement dites;
- les calcaires marneux avec des taux respectivement de 35 à 65 % et 65 à 95 %

Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de fissurer sur une certaine profondeur en cas de sécheresse. Les marnes ont souvent fait l'objet d'exploitation en carrières à ciel ouvert ou en souterrain pour donner respectivement: de la chaux avec les marnes argileuses, de la chaux hydraulique avec les marnes proprement dites et du ciment avec les marnes calcaires ou calcaires marneux. Elles ont également été utilisées pour amender les terres des exploitations agricoles. D'une façon générale, les marnes sont une assise de fondations bonne à moyenne en l'absence de gypse. En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse, avec risque de formation de fontis.

Les marnes sont des roches relativement tendres, elles subissent une géodynamique très active à leur surface et leur fragilité les rend très vulnérables aux aléas de la nature et des hommes.

Une combinaison de facteurs naturels et anthropiques a provoqué une érosion hydrique intense qui s'est manifestée par une dégradation des sols et une diminution importante de leur

productivité.



Figure 1-11 :les marnes (www.karakas-francais.ch/geotechnique.html)

On peut conclure que l'évolution des sols fins est due à la présence des minéraux argileux dans les sols tels que: les marnes, les argiles....etc., qui manifestent une grande sensibilité à l'air (retrait, fissuration désagrégation progressive des couche de sol) et une forte affinité pour l'eau (avec les conséquences classiques de l'humidification : gonflement, déconsolidation, perte des caractéristiques mécaniques).

3-3-4-La vase :

Le nom de vase (mot emprunté aux Néerlandais) est la désignation d'une large famille de sédiments fins, argileux, plus ou moins organiques, pouvant atteindre des teneurs en eau importantes. Elles contiennent une phase minérale dont la granulométrie s'étend des sables, aux argiles et aux colloïdes, une phase organique et une phase liquide. La vase peut se présenter aussi bien à l'état de suspension (crème de vase) que de sol cohérent (sédiment cohésif) présentant alors un caractère plastique, compressible et thixotropique. Elle contient souvent l'habitat d'une faune riche et diversifiée (vers, mollusques, bactéries). [Delphine, H., Michel A., (2002)].

Les vases sont des sols contenant plus de 90% de particules inférieures à 0,2mm, dont la matière organique (M.O) est comprise entre 2% et 10%. Elles sont composées de sable, limon, argile et de colloïdes organiques (Tableau 1-2). Elles sont en particulier très abondantes dans les estuaires. Elles sont fréquemment thixotropes. La Figure (1-12) donne un exemple de passage de remblai de l'autoroute A10 sur une épaisseur importante de la vase.

Chapitre1 : caractéristiques des sols

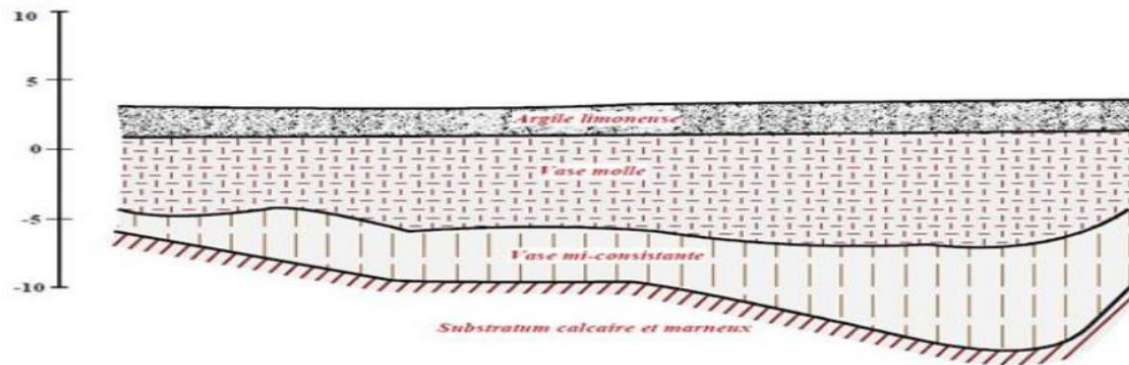


Figure 1-12 : Traversée de la vallée de la Charente par l'autoroute A10 [Scetauroute, 1986] (Cité par Serbah, 2011)

Tableau 1-2 : Les plus simples définitions des faciès d'après Allen (Cité par Boutouil, 2000)

Dénomination	Caractéristiques
Sable	Plus de 80% d'éléments supérieurs à 50 μm
Sable vaseux	De 20 à 80% d'éléments supérieurs à 50 μm
Vase	Plus de 80% d'éléments inférieurs à 50 μm

Les sédiments se composent d'une fraction solide et d'une fraction liquide (eau) qui est intimement liées les unes aux autres. Les proportions respectives de chacune de ces fractions sont variables d'un milieu à un autre mais demeurent dans une fourchette, qui par expérience, peut être estimée si l'on considère des matériaux de type vases. (Delphine, H., Michel A., (2002)). Il y a quatre éléments principaux constitutifs les vases:

1. la matrice minérale (quartz, feldspaths ou carbonates),
2. La fraction argileuse (kaolinite, illite ou smectite),
3. la fraction organique (débris végétaux, micro-organismes, acide fulvique et humiques),
4. une certaine quantité d'eau, présente sous différentes formes.

La distribution granulométrique d'un sédiment constitue son empreinte physique, elle caractérise la taille des particules, constituant la phase solide du matériau. Pour l'obtenir, il est procédé à un tamisage mécanique. En dessous d'une taille de 20 μm , il est nécessaire de recourir à des mesures au laser, qui utilisent le principe de la diffraction de la lumière

Chapitre1 : caractéristiques des sols

cohérente sur un écoulement d'une suspension très diluée de fines. Il est communément considéré que les "Vases" correspondent à la fraction inférieure à 63 µm.

Le schéma ci-dessous retrace les grands ensembles de la composition des sédiments portuaires vis-à-vis notamment de leur siccité ou de leur granulométrie (Fig1-13) (Proulhac, Ker Lann 2006)

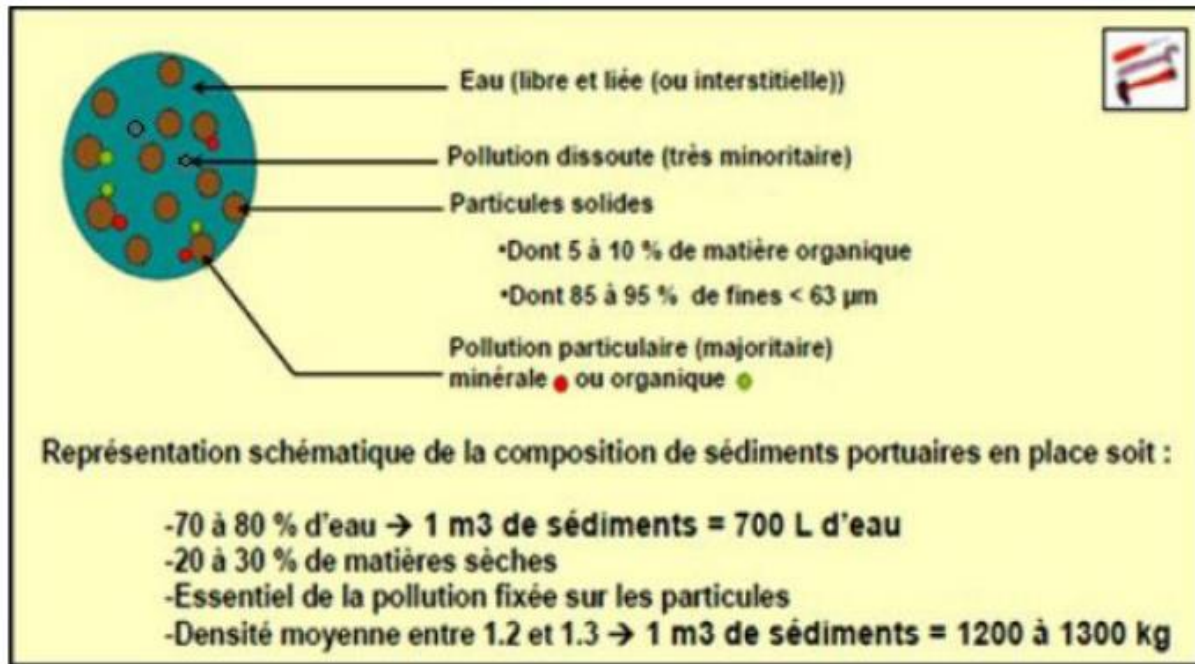


Figure 1-13 : Schéma de la composition simplifiée des sédiments. (Proulhac, Ker Lann 2006)

3-4-Principaux problèmes des sols argileux :

Dans de nombreux pays du monde, le gonflement est à l'origine de fréquents désordres des ouvrages légers. Aux Etats-Unis d'Amérique les dommages provoqués par le gonflement des sols présentent un coût supérieur à celui de toutes les catastrophes naturelles. En Algérie, l'urbanisation de certains quartiers des villes et la construction des routes se heurtent aux problèmes que posent les phénomènes de gonflement, de tassement et de glissement.

3-4-1- Phénomène de gonflement :

Ce phénomène est lié au changement d'humidité de certains sols très argileux (Montmorillonites, saponites et autres nontronites) ou tourbeux qui sont capables de fixer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse.

Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes et varient en fonction de leur teneur en eau), la variation de volume d'un terrain est consécutive à l'alternance des périodes de sécheresse

Chapitre1 : caractéristiques des sols

(déshydratation superficielle) et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'élément jointifs).

3-4-2- Tassements :

Il s'agit de la diminution de volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes, argiles) sous l'effet de charges appliquées et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation.

3-4-3-Glissements :

Ces mouvements, au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins continu d'un versant instable de montagne ou de colline. Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites. La masse de matériaux meubles ou rocheux fracturés se détache suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes, visibles ou non, et de formes diverses.

4-Différence entre sols fins et sols grenus :

Les forces d'attractions intergranulaires (force électrique, force de Van Der Waals , etc.) influencent le comportement des sols pour les grains de dimension très petite. Dans ce cas, le sol présente de la cohésion.

On distingue deux catégories de sols :

les sols fins (ou sols cohérents) $d < 20 \mu\text{m}$ avec cohésion (argile, limon) :

comportement très différent en fonction des teneurs en eau (état solide, plastique ou liquide)

les sols grenus $d > 20 \mu\text{m}$ sans cohésion (sable, gravier, etc.) :

comportement régi par les propriétés du squelette solide (peu influencé par l'eau)

Dans la réalité, les sols sont constitués d'un mélange de particules de différentes dimensions, soit un état intermédiaire entre les sols grenus et les sols fins.

4-1-propriétés des sols grenus (pulvérulents) :

- forces de frottement entre les grains sont :
 - dépendants de la forme, l'angularité et la compacité des grains
 - indépendants de la teneur en eau
- résistance au cisaillement
- aucune résistance à la traction
- perméables



Figure 1-14 :Exemple d'un sable grossier ([www.entre-aix-fr/documents/135-geotechnique/3-classification sols/co/cours-2-caractéristique.html](http://www.entre-aix-fr/documents/135-geotechnique/3-classification%20sols/co/cours-2-caract%C3%A9ristique.html)).

4-2-propriétés des sols fins :

- cohésion assurée par frottements et forces d'attraction entre les grains
 - dépendants de la forme, l'angularité, la compacité et de l'effet de surface des grains
 - dépendants de la teneur en eau
- résistance au cisaillement et à la traction
- imperméables et gélifs
- sensibles à l'eau (gonflements ou retraits)



Figure 1-15 :Exemple d'un argile (www.entre-aix-fr/documents/135-geotechnique/3-

Chapitre1 : caractéristiques des sols

[classification_sols/co/cours-2-caractéristique.html](http://www.entre-aix.fr/documents/135-geotechnique/3-classification_sols/co/cours-2-caractéristique.html)).

Pour conclure ...

Un sol est un assemblage hétérogène de particules ou de cristaux aux propriétés très variables : dimensions, formes, propriétés physico-chimiques, etc...

Un sol contenant de l'argile sera influencé par la teneur en eau, c'est une question centrale en géotechnique. (www.entre-aix.fr/documents/135-geotechnique/3-classification_sols/co/cours-2-caractéristique.html).

1-Introduction :

La croûte terrestre est composée de sol et de la roche. La roche est souvent considérée comme un matériau bien consolidé mais le sol est de sédiment, meubles et les dépôts de particules solides qui ont résulté de l'éclatement de la roche. Les sols peuvent être regroupés en deux catégories selon la méthode de déposition. Les sols résiduels ont formé à partir de l'altération des roches et de rester à l'endroit de leur origine. Les sols résiduels peuvent inclure les particules ayant une vaste gamme de tailles, de formes et de compositions selon la quantité et le type d'altération et les minéraux de parent roche. Les sols transportés sont les substances qui ont été déplacés de leur lieu d'origine.

2-Les Sols Problématiques :

De nombreux sols peuvent se révéler comme problématique en géotechnique, parce qu'ils se dispersent, développer, réduire, subir tassement excessif, ont un manque force ou sont solubles. Ces caractéristiques peuvent être attribuables à leur composition, la nature de leurs fluides interstitiels, leur minéralogie ou leur tissu. Il y a beaucoup de types de sols problématiques, certains de la plus notable étant le gonfement de l'argile, les sols et les sols souples dispersive.

2-1-Sols Affaissables (collapsible soils):

La construction des ouvrages de bâtiment sur les sols affaissables constitue un problème immense compte tenu des sinistres qu'ils causent aux ouvrages. Les sols affaissables sont définies comme étant des structure partiellement saturés qui subissent un réarrangement radical de leurs particules suivis d'une grande diminution de volume après inondation à l'eau avec ou sans chargement. Ces sols sont caractérisés par une grande résistance lorsqu'ils sont secs et présentent l'inconvénient de subir des affaissements importants s'ils sont humidifiés pendant les travaux de construction et ces mouvements peuvent souvent faire perdre leur stabilité aux fondations.

Les ingénieurs géotechniques et géologiques savons d'expérience que le vent et d'alluvions dépôts dans les régions arides sont susceptibles d'afficher certains potentiel d'effondrement

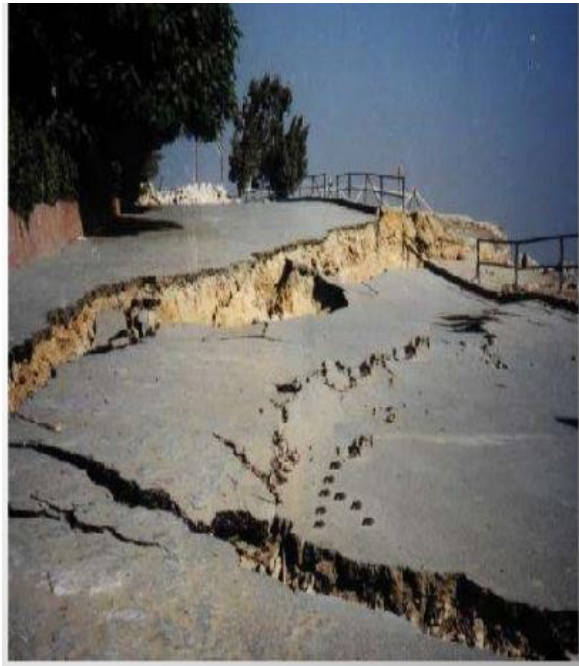


Figure2-1 : Exemple des sols affaissables

2-2-Sols gonflants :

Les sols gonflants posent des problèmes aux constructions sur tous les continents. Pour ces sols, les variations de volume sont liées à la présence de particules argileuses, mais il existe aussi des roches gonflantes, telles l'anhydrite. Le gonflement est le terme utilisé pour dire que le volume du sol augmente lorsqu'il absorbe de l'eau. Ce phénomène est au moins partiellement réversible et un sol gonflant subit un retrait (une diminution de volume) quand sa teneur en eau diminue.

L'échelle de la géotechnique est d'abord celle des ouvrages. Le gonflement des sols interfère avec toutes les constructions et ouvrages du génie civil : les fondations, profondes et superficielles, des bâtiments et ouvrages d'art, les ouvrages de soutènement, les remblais à usage routier ou ferroviaire. Les questions sont celles de l'existence de sols gonflants, de l'amplitude de leurs déformations et de l'énergie associée, du fonctionnement des ouvrages sous l'effet du gonflement et du retrait de tout ou partie du sol, de la façon dont on peut lutter contre le gonflement ou contre ses effets.

CHAPITRE 2 : LES SOLS PROBLEMATIQUES

Les structures comme les bâtiments résidentiels, centres commerciaux, routes etc sont gravement endommagés en raison de l'expansion et le rétrécissement des argiles gonflantes. Elles provoquent des fissures, soulèvements et dissolutions des liaisons structurelles.

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.



Figure 2-2 : Fissuration longitudinale de routes due au retrait et gonflement des sols.

2-3-Les sols de dispersion (dispersive soils) :

La dispersion se produit dans les sols quand les forces répulsives entre les particules d'argile dépassent les forces d'attraction, ce qui provoque la défloculation, de sorte que la présence de l'eau relativement pure encourage les particules se repoussent mutuellement pour former des suspensions colloïdales.

La surface du sol se brise et s'étend de l'autre. Cela est dû à la faiblesse de l'adhérence entre les particules du sol et de l'argile etc. Cette condition se produit en raison de la hausse du

pourcentage de sodium échangeable dans le sol. Le sodium est un cation et il affaiblira le lien entre les particules du sol.



Figure 2-3 : Exemple des sols de dispersion

2-4-Les sols organiques et les sols tourbeux(Organic soils and peaty soils) :

La tourbe et les sols organiques se produisent couramment comme extrêmement doux, humide, des dépôts de surface non consolidés qui sont partie intégrante de systèmes de zones humides. Ces types de sols peuvent donner lieu à des problèmes géotechniques dans le domaine de l'échantillonnage, la colonisation, la stabilité, essais in situ, la stabilisation et la construction.

Les sols tourbeux sont gorgés d'eau (90 %) et riches en matière organique (10 %). Ils se trouvent là où l'eau circule peu et où la matière organique s'accumule mais aussi et surtout dans les tourbières.



Figure 2-4 : Exemple des sols tourbeux

1-Introduction :

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20ème siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains, et, sont jugées efficaces. Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation. Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années, un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets.

Les techniques d'amélioration des sols consistent à modifier les caractéristiques d'un sol par une action physique (vibrations par exemple) ou par l'inclusion dans le sol ou le mélange au sol d'un matériau plus résistant, dans le but de :

- o augmenter la capacité portante et/ou la résistance au cisaillement
- o diminuer les tassements, tant absolus que différentiels, et le cas échéant les accélérer,
- o diminuer ou éliminer le risque de liquéfaction en cas de tremblement de terre ou de vibrations importantes.

Les champs d'application des différentes techniques dépendent essentiellement de la nature et de la granulométrie des terrains que l'on désire améliorer.

2-Méthodes mécaniques :

2-1-vibrocompactage :

2-1-1-Origine et développement :

Le procédé de vibrocompactage, développé à la fin des années 30, 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. est une technique d'amélioration de sol des sols pulvérulents de type sablo-graveleux permettant de les densifier dans la masse sous l'effet de la vibration.

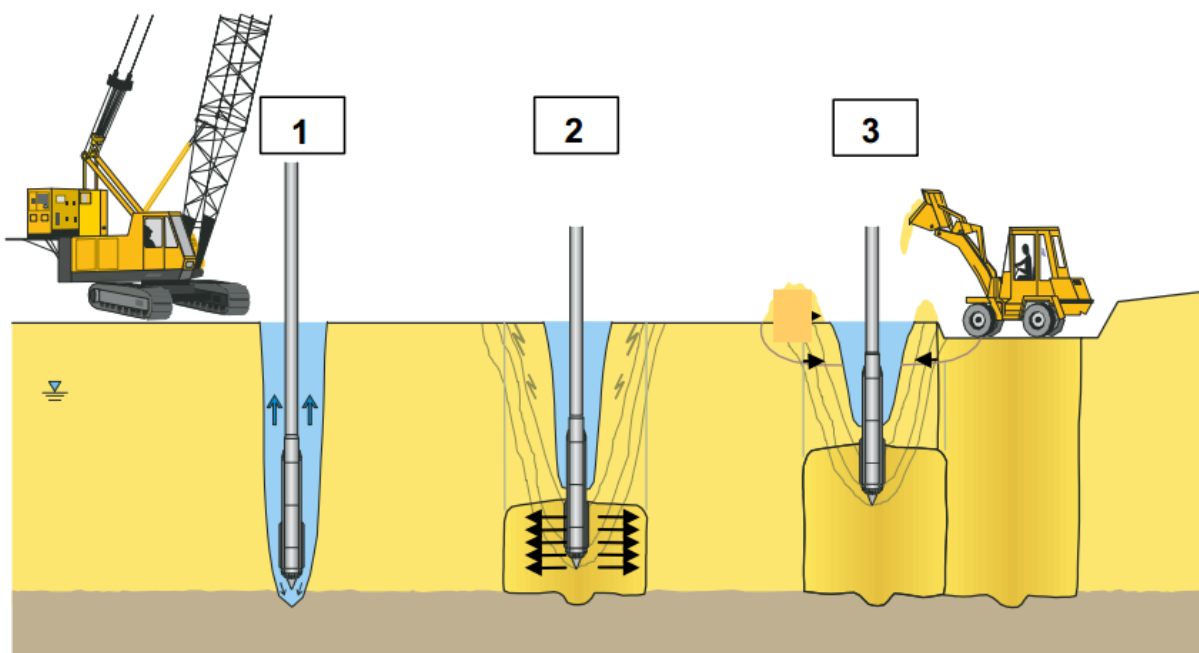
Ces vibrations, émises par l'outil, se propagent de grains en grains et provoquent un réarrangement optimal du volume initial occupé. La réduction de la porosité du matériau

Chapitre 3 : Technique d'amélioration des sols

permet aussi d'augmenter sa capacité portante de manière significative. Il est courant d'obtenir des contraintes de sols améliorés de l'ordre de 0,5 à 0,8 MPa ELS après ce type de traitement.

2-1-2-Principe de la technique :

La technique de vibrocompactage (appelée aussi « vibroflottation ») consiste à foncer dans le sol un vibreur relativement puissant, qui densifie l'empilement des particules du sol, et à procéder à un apport de matériaux pour atteindre le niveau final de la plate-forme (figure 3-1)



1 : Fonçage du vibreur

2 : Compactage des sols

3 : Apport des matériaux
et finition

Figure 3-1 : Étapes du vibrocompactage des sables et graviers (Document Keller)

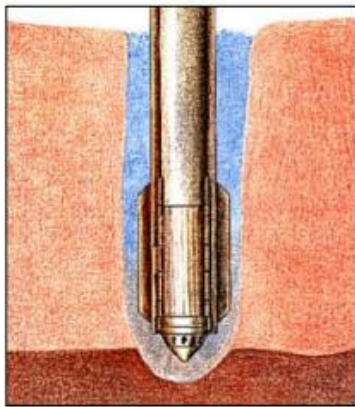
La densification du sol crée autour du vibreur un cône d'affaissement (figure 3-1), qui l'on remplit de matériau granulaire de granularité comparable. L'application du procédé de vibrocompactage nécessite généralement deux caractérisations principales : une analyse granulométrique et des mesures mécaniques.

2-1-3-Mode opératoire :

Le mode opératoire est le suivant :

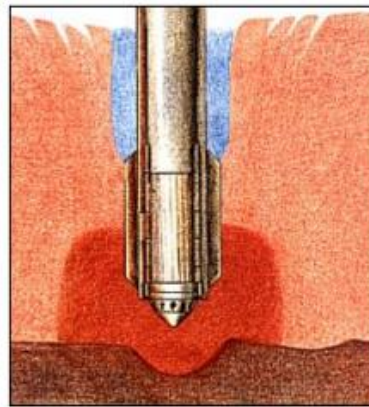
Chapitre 3 : Technique d'amélioration des sols

- Fonçage de l'outil jusqu'à la cote de traitement ; le vibreur est descendu par deux actions : la vibration et un fluide de lançage (généralement de l'eau).
- Lorsque la profondeur est atteinte, le vibreur est légèrement remonté de quelques décimètres et un cône d'affaissement va se créer. Ce dernier sera comblé soit par des matériaux d'apport ou en décapant progressivement les matériaux du site.
- Le vibrocompactage est exécuté ainsi par passes successives jusqu'à la plateforme d'intervention.



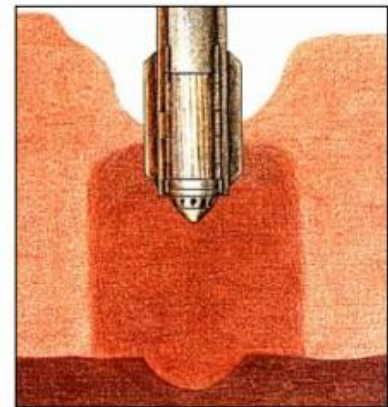
Pénétration

Le vibreur pénètre dans le sol jusqu'à la profondeur souhaitée sous l'effet des vibrations et du lançage à l'eau ou à l'air



Compactage

L'aiguille vibrante est remontée par passes de 50cm à 1m. Le sable ou le gravier en place descend vers la pointe du vibreur



Remblaiement

Le compactage s'effectue avec remblaiement depuis la surface, ou simplement en laissant s'abaisser le niveau du sol en place

Figure 3-2 : vibrocompactage – mise en œuvre (DESCRIPTIFS DES PROCÉDES D'AMÉLIORATION ET RENFORCEMENT DE SOL-Jean-Marc DEBATS)

Au démarrage du chantier, une planche d'essais est réalisée avec pour objectif de valider le maillage des points de vibrocompactage en fonction des performances à obtenir.

À chaque phase de la production, des points de contrôles (enregistrement de paramètres, sondages...) assurent les caractéristiques et l'intégrité du traitement.

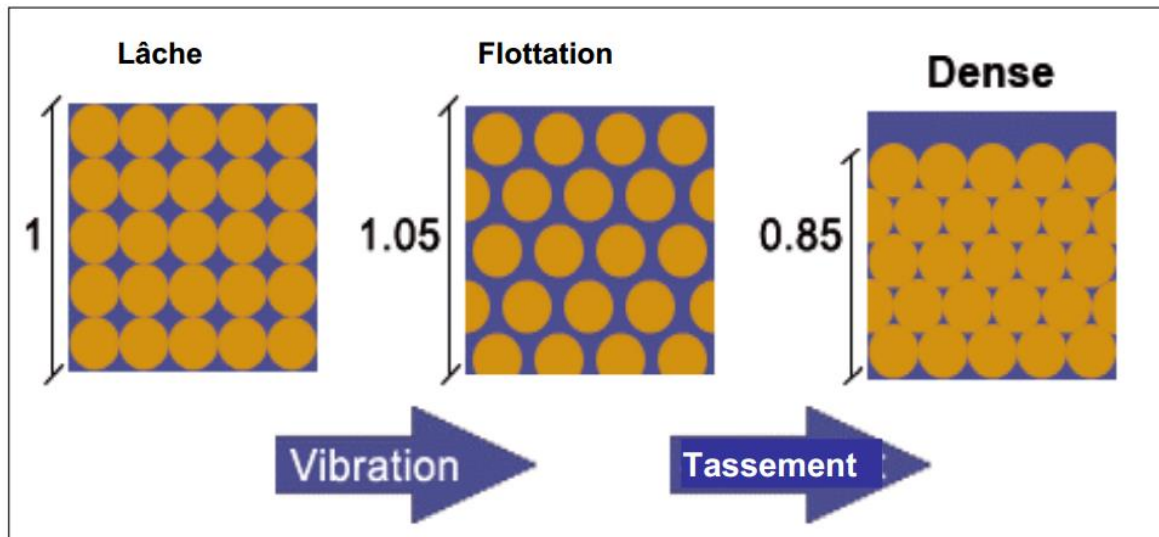


Figure 3-3 : vibrocompactage – mode d'action (DESCRIPTIFS DES PROCÉDES D'AMÉLIORATION ET RENFORCEMENT DE SOL-Jean-Marc DEBATS)

2-1-4-Avantages :

Le vibrocompactage apporte bien des avantages par rapport à d'autres solutions de fondations, entre autres :

- Amélioration de sol en place sans matériau d'apport (solution très économique),
- Grande souplesse aussi bien dans la mise en œuvre des fondations (pas de recépage) qu'en dimensionnement (sol homogène sans points durs),
- Délai de production rapide,
- Co-activité avec les autres lots de la construction (gros-œuvre, terrassement),
- Impact environnemental faible (peu de transport de matériaux, peu de bruits, propagation des vibrations limitées par l'utilisation de vibreurs spécifiques),
- Bilan carbone beaucoup plus faible que n'importe quelle technique utilisant du ciment,

Procédé connu pour être le plus efficace dans la réduction du potentiel de liquéfaction des sols. (www.keller-france.com/techniques/procedes/vibrocompactage).

2-1-5-Exemples d'applications :

La technique de vibrocompactage trouve son application pour tous types d'ouvrages :

- Le vibrocompactage permet de réaliser des semelles isolées ou filantes avec des capacités portantes élevées de l'ordre de 0,5 à 0,8 MPa aux ELS (immeubles R+8 voire plus, centres commerciaux, hôpitaux, etc.).
- Le vibrocompactage du sol graveleux en place garantit des tassements d'ordre millimétrique sous des ouvrages dits sensibles (sites nucléaires, turbines, machines vibrantes, éoliennes).

Chapitre 3 : Technique d'amélioration des sols

• Le vibrocompactage est reconnu comme étant le procédé le plus efficace dans la limitation du risque potentiel de liquéfaction des sols.(www.keller-france.com/techniques/brochures/le%20vibrocompactage).

2-2- le compactage dynamique(ou pilonnage) :

2-2-1-Objectifs :

Le compactage dynamique vise l' amélioration des propriétés géotechniques de sols lâches sur de grandes profondeurs par l'application d'impacts de très fort intensité.



Figure 3-4 : exemples de chantiers de compactage dynamique (documents de Géopac® et Ménard et soltraitement®)

2-2-1-1-Description du procédé :

Le procédé consiste à faire chuter de façon méthodique et répétée à la cadence de une à trois fois par minute et selon un maillage orthogonal défini par rapport à la nature des terrains de lourds pilons d'acier sur la surface du sol à traiter. Les impacts qui en résultent créent de puissantes ondes de choc qui se propagent en profondeur provoquent le resserrement des sols traités et l'amélioration de leurs caractéristiques géotechniques .A l'aide de puissantes grus sur chenilles adaptées. Les pilons sont levés pour ensuite retomber en chute quasi-libre. La masse de ces pilons varie généralement entre 10 et 18 tonnes métriques, mais avec un système de levage spécial elle peut être portée à 30 tonnes ou davantage pour augmenter la

Chapitre 3 : Technique d'amélioration des sols

profondeur de traitement. La hauteur de chute varie habituellement entre 10 et 30 mètres au dessus de la travail.

L'énergie d'un impact appliquée au sol se mesure en tonnes-mètres (t-m) et la magnitude de cette énergie par chute constitue un facteur déterminant dans la mesure et la profondeur de l'amélioration obtenue. Les autres facteurs qui affectent de façon significative la profondeur maximum et le degré d'amélioration sont la conception du programme d'application d'énergie. La séquence. Le bon nombre d'impacts par empreinte, et monitoring attentif de la réponse du sol tout au long des travaux. L'augmentation et le rythme de dissipation des pressions interstitielles, le tassement provoqué suite à l'application de chaque phase d'énergie et le gonflement sont autant d'éléments additionnels qui doivent être constamment suivis et pris en compte tout au long du traitement.

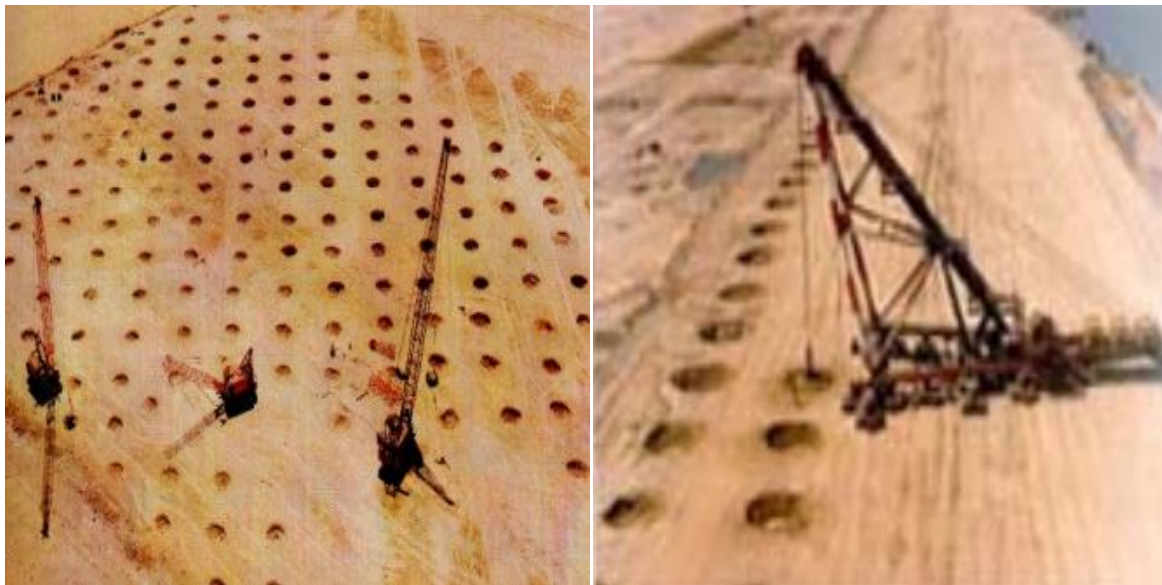


Figure 3-5 : Réalisation du compactage selon un maillage bien défini (documents de Ménard soltraitement®)

2-2-1-2-Sols pouvant être traités :

De toutes les techniques d'amélioration de sol . seul le compactage dynamique permet de traiter le plus large éventail de dépôts naturels ou de remblais . Cette méthode permet de traiter en profondeur par des actions de surface des sols sablo- graveleux , et des matériaux argilo-limoneux saturés à condition qu'il y ait présence d'air occlus (1 à 4%) (Cas des tourbes ou des remblais récents avec matières organiques). Son emploi peut être intéressant pour consolider des couches sous l'eau .

Chapitre 3 : Technique d'amélioration des sols

Seuls les sols présentant des caractéristiques de consolidation à long terme sous l'application de charges, tels que les argiles et sols organiques, ne répondront pas favorablement au traitement. Des remblais d'argile ont toutefois été traités pour en réduire les vides importants. Par ailleurs, certains dépôts ne pourront être améliorés que par compactage dynamique comme par exemple les sols d'origine morainiques, les débris de construction et remblais d'énrochements renfermant de gros éléments.

Le compactage dynamique s'est révélé particulièrement efficace pour développer des sites jadis considérés comme impropres à la construction en raison des difficultés techniques ou des couts élevés que représentaient les méthodes de fondation conventionnelles. C'est le cas notamment des sites ou des remblais hétérogènes ont été déversés à tout hasard et que l'on retrouve en fortes concentrations à la périphérie de grands centres urbains, dans les carrières abandonnées, dans les zones portuaires ou pour des édifices résidentiels de prestige construits sur des terrains gagnés sur* les rivières ou la mer.

2-2-1-3-amélioration obtenues :

D'une façon générale, les caractéristiques géotechniques des sols granulaires traités par compactage dynamique augmenteront par un facteur variant de 2 à 4 et la profondeur d'amélioration se situera entre 10 et 6 mètres. Dans des sols fins, des silts aux sables siteux, une partie non partie non négligeable de cette amélioration ne surviendra que deux ou trois mois après la fin du traitement. Ce phénomène de vieillissement doit être anticipé lors des essais plutôt que de reterder la construction, une solution rarement acceptable.

La portance admissible après traitement sera de l'ordre de 100 à 200 KPa dans le cas de sols ou de remblais siteux, et de 200 à 400 Kpa, parfois plus, dans les sols ou remblais granulaires ayant une bonne perméabilité. Des capacités portantes de 800 KPa et des exigences sévères de tassement total et différentiel ont été obtenus dans des sols granulaires.

Ces chiffres ne représentent qu'un ordre de grandeur. Les résultats du traitement, qu'il s'agisse de la portance obtenue ou de la profondeur d'amélioration, dépendent d'un grand nombre de facteurs, les uns intrinsèques aux sols mêmes, tels leur nature, leur composition et leur perméabilité, les autres extrinsèques, dont les variables du programme de compactage. L'analyse de ces facteurs et le choix des moyens à mettre en œuvre pour optimiser les

Chapitre 3 : Technique d'amélioration des sols

résultats du traitement, il faut bien le rappeler, ne relèvent pas de la science, mais plutôt de l'art donc de l'expérience et de la compétence du spécialiste.

Le diagramme ci-dessous donne un aperçu des capacités portantes qui peuvent être obtenues dans différents types de sols celui-ci compare les valeurs pressiométriques, la pression limite et le module de déformation, mesurées avant et après le compactage dynamique effectué pour l'Aluminerie de grande-Baie (ALCAN) à Saguenay. ((DTU.13.2) (1992) «fondation profondes pour le bâtiment-Chap.VIII : Colonnes ballastées »).

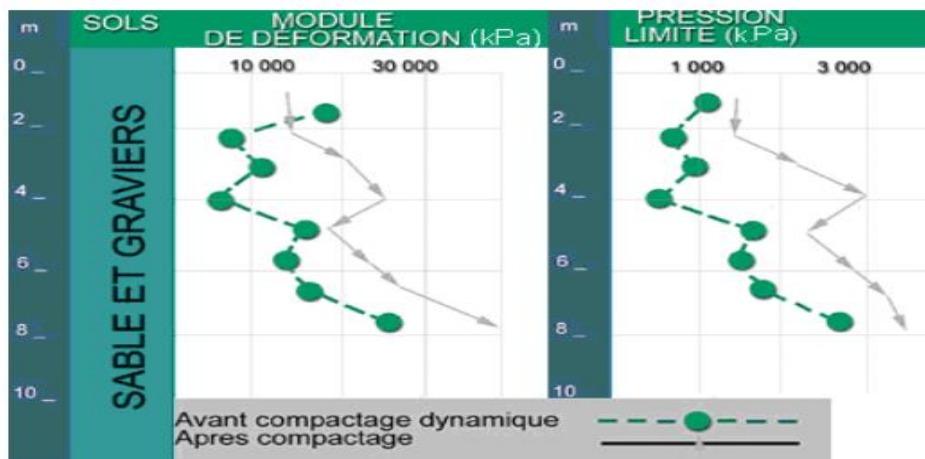


Figure 3-6 : comparaison des caractéristiques du sol avant et après consolidation dynamique (DTU.13.2).

2-2-2-Domains d'application :

L'utilisation la plus fréquente du compactage dynamique, et celle susceptible de générer les plus importantes économies de temps et de coûts, concerne l'amélioration des sols pour la construction d'un dallage sur sol et de fondation superficielles pour bâtiments ou autres ouvrages de génie civil. Le compactage dynamique remplace souvent l'excavation et le remplacement des sols en place ainsi que les fondations profondes avec des inclusions rigides.

Cette technique est un moyen efficace pour densifier profondément les terrains compressibles, et permettant de gagner sur la mer (exemple : piste de l'aérodrome de Nice) ou de réaliser des sous-couches convenant à des dallages de bâtiments industriels ou de centres commerciaux.

La consolidation est associée à des systèmes de drainage, en particulier pour les sols fins, permettant ainsi de réduire les temps de dissipation des pressions interstitielles.



Figure 3-7 : chantier de compactage dynamique (aéroport de Nice-France)
(documents de Ménard soltraitement®)

Le compactage dynamique est également utiliser pour :

- Support faible pour fondations superficielles de tous de structures par l'amélioration des caractéristiques de portance et la satisfaction des critères de tassement total et différentiel sévères ;
- Assurer la bonne tenue de revêtement dans les aires de stockage ou de manutention de matériaux hautement chargées, telles celles des entrepôts, pistes d'aéroport, terminaux de conteneurs, etc. ;
- Réduire le potentiel de liquéfaction des sols dans les zones à haute sensibilité sismique ;
- Stabiliser des pentes, barrages, digues, ...etc. ;
- Réduire les vides dans les dépotoirs(décharges) ;
- Défoncer cavernes et mines abandonnées ;
- Densifier des sols marins et remblais placés sous

Par contre, cette technique reste peu courante du fait de l'encombrement qu'occasionnent les appareils et le bruit engendré par les impacts, et s'utilisera surtout sur des surfaces importantes à l'écart d'habitations.

2-3-Colonnes ballastées :

Les sols cohésifs ont souvent une portance insuffisante. Lorsqu'ils comportent plus de 10 à 15 % de limons et argiles, ils peuvent être améliorés par un réseau de colonnes ballastées. Ce procédé est également utilisable dans les remblais non évolutifs, tels que déblais de constructions, scories ou remblais hétérogènes. À noter que dans le cas de passages évolutifs, le gravier de la colonne peut être remplacé par du béton prêt à l'emploi.

2-3-1-Domaine d'application :

En augmentant la capacité portante du sol et en réduisant sa compressibilité, la colonne ballastée permet l'économie de pieux et de planchers portés en rendant possible la réalisation de dallages sur terre-plein. Ce renforcement de sol trouve une application dans tous les domaines de la construction (bâtiments de logements, industriels et commerciaux, ouvrages génie civil, remblais routiers et ferroviaires, plateformes portuaires). Il est une alternative, souvent très rentable, aux substitutions, puits béton et pieux. Toute extraction de déblais est évitée. Les colonnes ballastées permettent aussi de lutter contre la liquéfaction des sols et les argiles gonflantes.

2-3-1-1-Procédé à haute qualité environnementale :

technique entrant dans le cadre du développement durable et à faible incidence sur la pollution (mise en œuvre de matériaux naturels roulés et concassés dont la production engendre de faibles rejets en CO²).

2-3-2-Colonnes ballastées sous massifs de fondations :

Le renforcement par colonnes ballastées permet d'augmenter la capacité portante du sol, en général jusqu'à 0,2 à 0,3 MPa ELS. Aucun recépage n'est à prévoir, et la semelle ou le radier sont coulés directement sur les colonnes. La forte résistance au cisaillement de la colonne ballastée permet de reprendre les efforts horizontaux et les moments. En zone sismique, elle permet de jouer le rôle de rotule plastique, de manière à pouvoir dissocier les effets inertiels des effets cinématiques. Le dimensionnement des semelles superficielles filantes ou isolées se fait de manière conventionnelle.

2-3-2-1-Avantages :

du procédé Les colonnes ballastées apportent bien des avantages par rapport à d'autres solutions. Comme elles sont réalisées avec un matériau naturel dépourvu de liant, les lois de comportement mécanique sont les mêmes que pour le sol en place ; il en résulte une grande souplesse dans le fonctionnement mécanique, qui va permettre de réaliser les travaux de gros-œuvre aussi simplement que pour un bon sol : pas de problématique de recépage, reprise aisée des sollicitations horizontales et des moments fléchissant, aucune création de point dur donc pas d'adaptation de ferrailage par rapport à un chantier réalisé traditionnellement avec des fondations superficielles. En phase chantier, le risque de cisaillement accidentel de la tête de la colonne, dû à la circulation d'engins ou au creusement de tranchées, est supprimé avec la colonne ballastée. Aucune précaution particulière n'est à envisager pour les traitements aux liants : la colonne ballastée est malaxée sans aucune difficulté avec le sol et le liant.

2-3-3-Colonnes ballastées sous dallage :

En supprimant tout effet de point dur, avec les colonnes ballastées, le dallage peut être dimensionné de manière classique selon le DTU 13.3 Dallages, à partir des sollicitations définies par son utilisateur (charges uniformément réparties, ponctuelles, dynamiques) et d'un module de sol amélioré homogénéisé ES, sans moment complémentaire significatif.



Figure 3-8 : Colonnes ballastées

sousdallage ([www.Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes ballastées](http://www.Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes%20ballastées)).

2-3-4-Principe de réalisation :

* Préparation :

La machine est mise en station au-dessus du point de fonçage, et stabilisée sur ses vérins. Un chargeur à godet assure l'approvisionnement en agrégats.

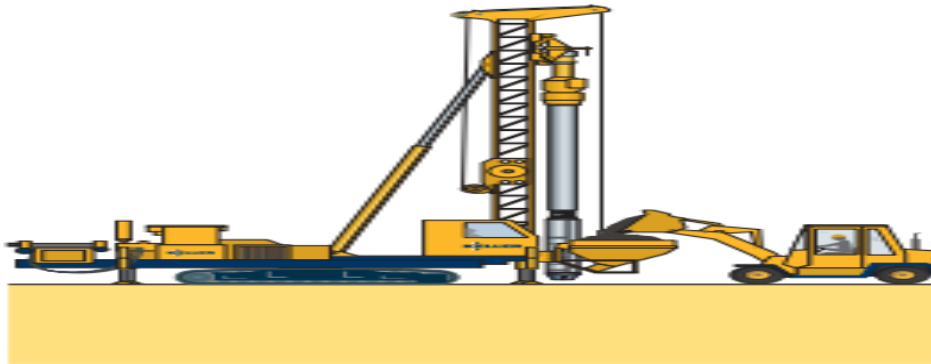


Figure3-9 : préparation ([www. Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes ballastées](http://www.Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes-ballastées)).

* Remplissage :

Le contenu de la benne est vidé dans le sas. Après sa fermeture, l'air comprimé permet de maintenir un flux continu de matériau jusqu'à l'orifice de sortie.

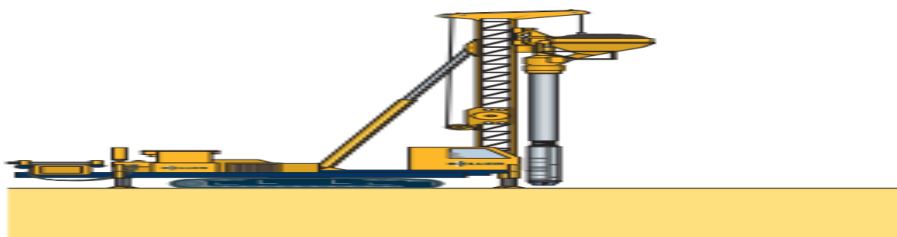


Figure3-10 : Remplissage ([www. Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes ballastées](http://www.Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes-ballastées)).

* Fonçage :

Le vibreur descend, en refoulant latéralement le sol, jusqu'à la profondeur prévue, grâce à l'insufflation d'air comprimé et à la poussée sur l'outil.

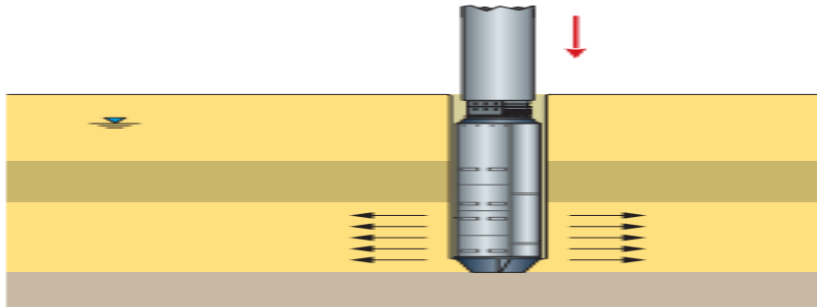


Figure3-11: Fonçage ([www. Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes ballastées](http://www.Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes-ballastées)).

* Compactage :

Lorsque la profondeur finale est atteinte, le vibreur est légèrement remonté et le matériau d'apport se met en place dans l'espace ainsi formé. Puis le vibreur est redescendu pour expanser le matériau latéralement dans le sol et le compacter.



Figure 3-12 : Compactage ([www. Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes ballastées](http://www.Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes-ballastées)).

* Finition :

La colonne est exécutée ainsi, par passes successives, jusqu'au niveau prévu. Les semelles de fondations sont alors réalisées de manière traditionnelle. ([www. Keller-france.com/technique/procèdes/colonnes ballastées](http://www.Keller-france.com/technique/procèdes/colonnes%20ballastées)).



Figure3-13: Finition([www. Keller-france.com/technique/procèdes/colonnes ballastées](http://www.Keller-france.com/technique/procèdes/colonnes%20ballastées)).

3-Méthodes hydromécaniques :

3-1-Préchargement :

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 fin et surtout argileux. Préchargement, en essayant d'obtenir par avance une partie au moins des déformations de fluage

3-1-1-Principe :

Cette technique consiste à placer sur le terrain une charge égale à la charge définitive p_f augmentée éventuellement d'une surcharge p_s qui assure tout ou partie des effets suivants

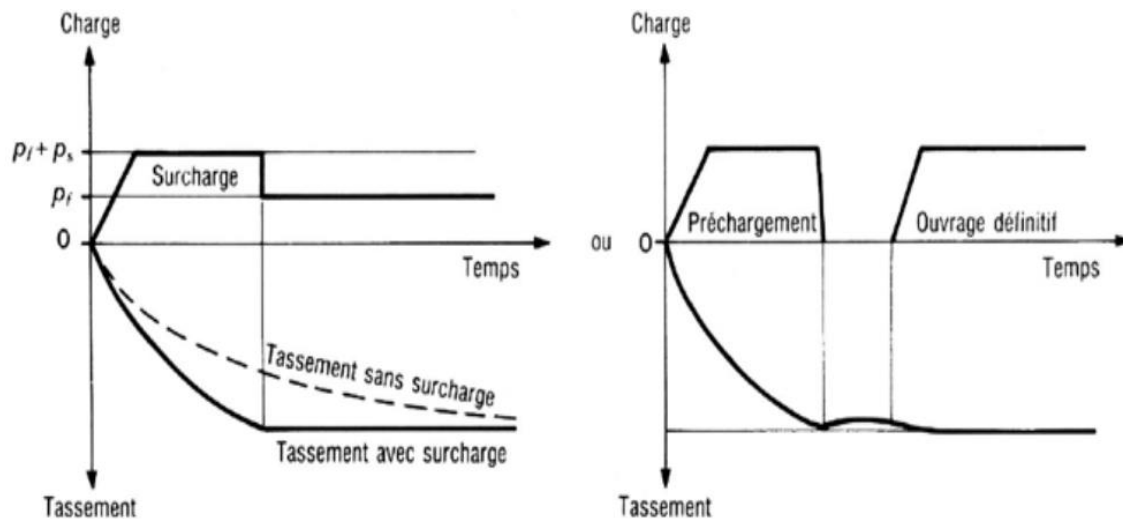


Figure3-14 : Principe du préchargement pour le contrôle des tassements(Magnan J.P.& pilot, G.1988).

- Produire un développement rapide des tassements de consolidation primaire et accélérer l'apparition et le développement des tassements de compression secondaire ; on peut rendre ainsi le sol traité plus rapidement constructible, sans redouter à moyen ou à long terme des tassements absolus ou différentiels importants ;
- augmenter la résistance au cisaillement et la capacité portante du massif de sol, ce qui peut être utilisé pour une construction par étapes.

3-1-2-surcharge en terre :

Lorsqu'un projet est déterminé, on met en place sur le terrain un volume de remblai correspondant à la future charge de l'ouvrage. Sur des sols saturés à très faible perméabilité, ce procédé va permettre l'évacuation de l'eau interstitielle du terrain. La qualité du tassement

Chapitre 3 : Technique d'amélioration des sols

est directement proportionnelle à la durée du préchargement. De plus, la lenteur des phénomènes permet le déchargement du terrain pendant la construction sans risque de gonflement et de retour à l'état initial du terrain (phénomènes élastiques). Lors de la mise en place de ce procédé, une couche de sable est préalablement installée pour épouser les déformations du sol sous jacent et contribue à l'évacuation de l'eau qui peut arriver à la surface. Sur des sols très peu perméables, on peut associer le préchargement à un réseau de drains verticaux afin de faciliter l'évacuation de l'eau. Avec un repère préalablement fixé, on mesure régulièrement le tassement du sol et, lorsqu'il a atteint une valeur considérée acceptable, on peut décharger et exécuter la construction des fondations superficielles. En général, si la hauteur du mauvais terrain dépasse 5 mètres, on prévoit après le chargement un système de fondation en radier car il reste des risques de tassement différentiels.

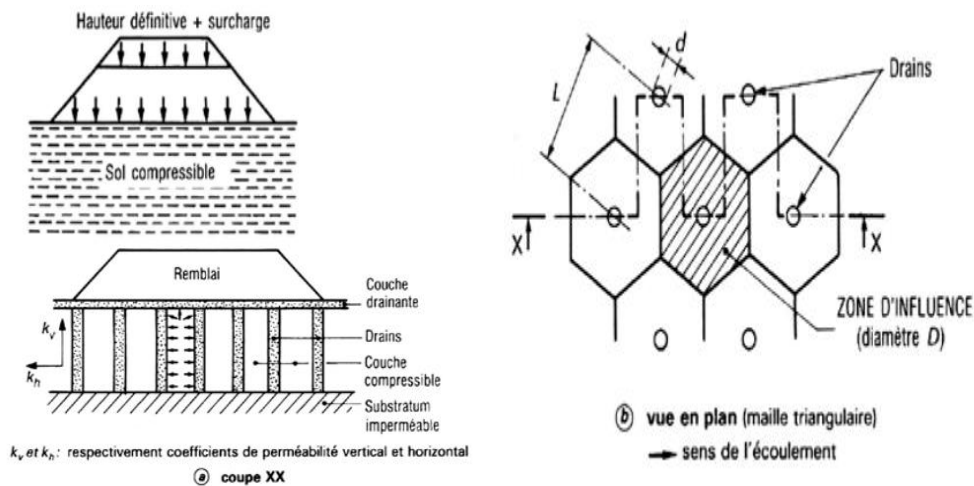


Figure 3-15 : réseaux de drains verticaux(Magnan J.P.& pilot, G.1988).

3-1-3-consolidation atmosphérique :

C'est une variante du préchargement par du remblai. Cette méthode est de type isotrope. Elle permet une amélioration des caractéristiques du sol et la rupture et le fluage latéral sont impossibles. Le terrain est recouvert par une membrane étanche sous laquelle on fait le vide : le sol est ainsi chargé par la pression atmosphérique. Ce système est toujours couplé à un réseau de drainage vertical et parfois horizontal.

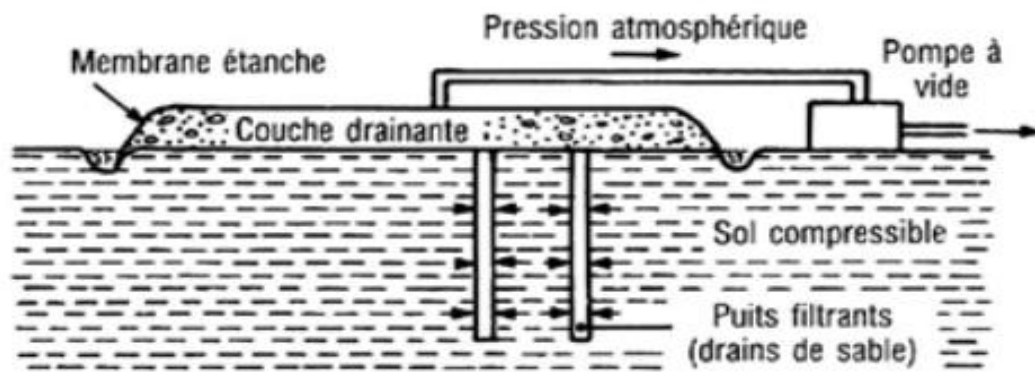


Figure 3-16: technique de préchargement (Magnan J.P.& pilot, G.1988).

3-1-4-L'inondation :

Une digue en terre est édifée autour de la zone a surcharger et le bassin ainsi créé est étanché par une membrane souple (élastomère ou plastique armé) puis rempli d'eau. Ce système nécessite une hauteur d'eau deux fois supérieure a la hauteur de remblai qui aurait été nécessaire, c'est pourquoi cette méthode est intéressante que si l'eau est gratuite et a faible distance (eau de mer par exemple)

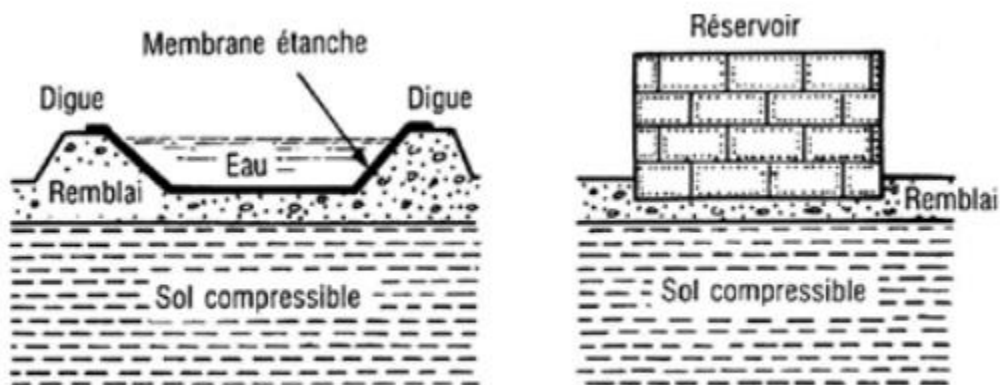


Figure 3-17 : chargement par remblais ou par réservoir (Magnan J.P.& pilot, G.1988).

3-1-5-Paramètre d'exécution :

Lors de l'exécution du projet après un préchargement, il faut tenir compte de la décompression des terrains entre les points d'appuis de l'édifice en intégrant, par exemple, des petits vides sanitaires (hauteur décimétrique). Pour tous les travaux de chargement dont la durée est mensuelle, il faut prendre des précautions avec le mouvement annuel des nappes. La qualité du tassement sera différente en fonction de la hauteur du niveau piézométrique. Le contrôle de l'amélioration du sol est réalisé en général au moyen d'essais au pénétromètre ou au pressiomètre régulièrement répartis sur le site, et comparés à des essais réalisés avant traitement dans les mêmes zones. On peut aussi contrôler l'augmentation de la densité du sol en réalisant des diagraphies. (Jean. Charles Bourdeau : amélioration des sols p : 6-9).

4-Méthodes chimiques :

4-1-Injection Solide :

Utilisée pour le traitement des terrains sableux, limoneux ou argileux, humides ou saturés, la technique d'injection solide consiste à injecter sous pression un mortier très visqueux, suivant un maillage spécifique établi en fonction de la nature du terrain et des objectifs recherchés, de manière à réaliser une densification statique horizontale. Technique éprouvée, économique et souple, elle permet en outre de réduire le potentiel de liquéfaction en cas de séisme. Contrairement à d'autres, elle peut être utilisée sous des constructions existantes. (PLATES - FORMES AMÉLIORATION DES SOLS).

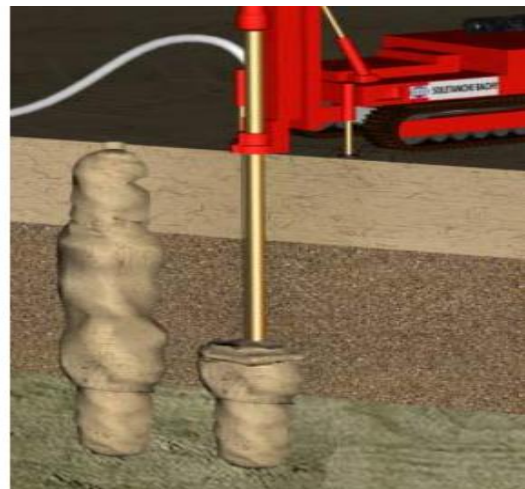


Figure3-18 : Injection Solide (PLATES - FORMES AMÉLIORATION DES SOLS)

4-2- Amélioration des sols par addition d'ajouts minéraux :

Traiter un sol consiste à mélanger intimement ses éléments à une certaine quantité d'addition. Cette opération provoque une modification physico-chimique qui intervient dans la stabilisation du sol tel que, les réactions d'échange de base avec les particules d'argile (cation) et les réactions pouzzolaniques (cimentation), qui corrige ses défauts de perméabilité et améliore ses qualités de résistance (capacité portante) et de durabilité. Pratiquement tous les sols peuvent être traités. La stabilisation peut être utilisée, avant compactage, in situ ou avec des sols excavés ou amenés d'ailleurs. Cependant une analyse préalable de leur nature est nécessaire avant chaque traitement. Elle détermine la technique et les moyens les plus appropriés à mettre en œuvre, en fonction des spécificités du terrain:

- utilisation d'addition (chaux, ciment, ajouts minéraux.....);
- dosages à respecter;
- épaisseur du sol à traiter.

Le traitement des sols en place ou rapportés est aujourd'hui très largement employé sur tout le territoire. Il est par ailleurs d'une grande simplicité de mise en œuvre. Les ajouts minéraux les plus utilisés:

- La chaux
- Le ciment
- Les ajouts cimentaires (laitier , pouzzolane naturelle , cendres volantes et fumée de silice...etc.).(

4-2-1-La chaux :

4-2-1-1-Traitement type et conditions de mise en œuvre :

Les conditions de mise en œuvre doivent être conformes aux recommandations du Guide Technique "Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme" (Sétra / LCPC - 2000) (plus communément nommé GTS). L'exécution type des travaux de traitement des sols suit, en règle générale, le processus suivant :

*** Préparation du sol à traiter :**

Chapitre 3 : Technique d'amélioration des sols

Cette opération, visant à faciliter le malaxage ultérieur, consiste à procéder à l'ouverture du sol au scarificateur ou au ripper.



Figure 3-19 : Vue générale d'un chantier de traitement de sol.(DOCUMENTATION TECHNIQUE Routes n°89 • Septembre 2004)

* Ajustement de l'état hydrique du sol :

Une teneur en eau optimale est indispensable pour obtenir, après compactage du mélange sol-liant, une densité maximale. Ainsi, il est possible soit d'assécher le sol par brassage mécanique, soit de l'humidifier avec une arroseuse avec rampes à eau, gicleurs ou systèmes enfouisseurs.

*Épandage du liant :

Pour réduire et maîtriser la dispersion du liant, il est préférable de retenir – dans le cas de chantiers moyens ou importants – un épandeur à dosage pondéral, asservi à la vitesse d'avancement. Le contrôle de la régularité de l'épandage et de la quantité des liants est réalisé par la méthode dite "à la bêche".



Figure 3-20 :Epannage du liant (DOCUMENTATION TECHNIQUE Routes n°89 • Septembre 2004)

* Malaxage :

Pour assurer une bonne homogénéité du matériau et une profondeur importante du malaxage, il est judicieux de retenir un malaxeur ou un pulvimixer à rotor horizontal. D'autre part, le malaxage foisonnant énormément les matériaux, il faut veiller – lorsqu'on traite par bandes jointives – à mordre suffisamment (20 cm) dans la partie déjà foisonnée, pour ne pas laisser de matériau non malaxé en bordures de bandes.



Figure 3-21 :Malaxage (DOCUMENTATION TECHNIQUE Routes n°89 • Septembre 2004)

* Compactage partiel :

La qualité du compactage est, en général, déterminée par un objectif de densification. Ainsi,

Chapitre 3 : Technique d'amélioration des sols

pour le compactage des remblais, l'objectif de densification est une énergie de compactage q_4 , qui correspond succinctement à 95 % de la densité optimale de l'essai Proctor Normal et pour le compactage des couches de forme, il est une énergie de compactage q_3 qui correspond succinctement à 98,5 % de la densité optimale de l'essai Proctor Normal. Le guide technique Sétra / LCPC sur la "Réalisation des remblais et des couches de forme" (GTR) de septembre 1992 donne une détermination pratique des conditions de compactage, sur la base du paramètre Q/S , "épaisseur unitaire de compactage" (Q étant le volume de sol compacté pendant un temps donné et S la surface balayée par le compacteur pendant le même temps). L'atelier de compactage, ainsi que le nombre de passes nécessaires, seront définis sur une planche d'essais de compactage,



Figure 3-22 : Compactage partiel (DOCUMENTATION TECHNIQUE Routes n°89 • Septembre 2004)

en respectant les épaisseurs de couches à compacter et en appliquant un plan de balayage répartissant l'énergie de compactage sur toute la surface de la couche. Le compactage partiel doit suivre sans tarder la fin du malaxage pour ne pas laisser un matériau foisonné exposé aux intempéries et doit apporter 70 à 80 % de l'énergie exigée pour obtenir la qualité de compactage recherchée suivant la couche considérée.

* 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'écrtage 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 3 cm).

* Compactage final :

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



Figure3-23 :Compactage final (DOCUMENTATION TECHNIQUE Routes n°89 • Septembre 2004)

* 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.



Figure3-24 :Protection de surface de la couche traitée (DOCUMENTATION TECHNIQUE Routes n°89 • Septembre 2004)

4-2-2- le ciment :

Le ciment Portland est un autre produit envisageable pour la stabilisation de certaines catégories de sols utilisés pour les routes et les revêtements de pistes d'aéroports. Alors qu'il existe plusieurs similarités entre la chaux et le ciment Portland comme stabilisants, le ciment Portland fournit en plus la chaux et la source de silice. Le ciment Portland est un matériau fin formé à partir d'un mélange de clinker et de gypse. Le clinker est composé principalement de quatre phases d'oxydes ; deux phases de silice calcique et deux phases d'alumine calcique. Les deux phases de silice calcique sont les plus importantes dans le processus de stabilisation. Lors de l'hydratation ces deux phases produisent l'hydroxyde de calcium et l'hydrate de silice calcique. Le premier composant fournit l'apport en calcium nécessaire à l'échange cationique, à la floculation de l'argile et à son agglomération tandis que le deuxième composant quant à lui apporte la résistance ainsi que la structure au sol traité (Tableau 3.1).

Tableau 3-1 : Composants principaux du ciment Portland [Lawton, 2004].

Nom des composants	Formule chimique	Abréviation
Silicate tri calcium	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C3S
Silicate di calcium	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C2S
Aluminate tricalcium	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C3A
Terra-calcium aluminoferrite	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}_3$	C4AF

Lorsque le ciment Portland est mélangé à l'eau, l'initiation de l'hydratation occasionne une augmentation rapide de la concentration de calcium dans le sol. A mesure que les ions de calcium sont libérés, ils deviennent disponibles pour stabiliser l'argile (Fig 3-26)



Figure 3-25 : Chantier de traitement du sol au ciment [Bell,1978].

Comme indiqué ci-dessus, le processus de stabilisation initié par l'ajout du ciment Portland à l'argile engendre quatre étapes distinctes à savoir l'échange cationique, la floculation et

l'agglomération de l'argile, l'hydratation par cimentation et les réactions pouzzolaniques. Le ciment Portland possède donc des propriétés lui permettant d'initier une étape de plus que la chaux soit celle de l'hydratation par cimentation. Les sols possédant un faible pourcentage d'argile, donc moins de silice et d'alumine ont besoin d'un apport de ciment si les réactions pouzzolaniques sont désirées. Par conséquent, le ciment Portland peut généralement être utilisé dans les mêmes types de sols que la chaux.

4-2-3- Utilisation des ajouts cimentaires :

Parmi les ajouts cimentaires les plus utilisés il y a les cendres volantes, le laitier, la fumée de silice, les cendres volcaniques, et le calcaire. Les coûts élevés de la chaux et du ciment ont poussé les chercheurs à trouver d'autres types de liants dans le but d'améliorer les sols instables à faible coût tout en respectant l'environnement. Les cendres volantes sont intimement liées quant à leur processus de stabilisation. Elles sont souvent utilisées conjointement avec la chaux dans les travaux de stabilisation.

Deux types de cendres volantes sont produits par la combustion du charbon à savoir la cendre volante et la cendre basse. Les cendres basses relativement grossières se récupèrent en bas de la fournaise tandis que les cendres volantes sont séparées des gaz d'échappement par un dépoussiéreur électrostatique. Les cendres volantes ont une composition très semblable à celle du ciment.

1 les matériaux utilisés

1-1.LES CHAUX :

1-1-2 la chaux hydraulique naturelle :

a-fabrication :

la chaux hydraulique naturelle provient de la cuisson de calcaires siliceux avec réduction en poudre par extinction.

b- prise :

sa prise se décompose en deux parties :

- Une prise initiale du type hydraulique.
- Une prise secondaire dit aérienne.

c- avantages :

- Très bonne résistance
- Souple et onctueuse
- Economique
- Teinte régulière
- Bonne accroche aux support

d-utilisation :

Travaux routiers tels que l'assainissement et la stabilisation du sols, l'accès aux lotissements aux maisons individuelle, traitement des couches de chaussées intermédiaires, filialisation des enrobés bitumeux.

1-1-3-la chaux aérienne éteinte :

a- Fabrication :

Produit résultant de la cuisson d'un calcaire très pur à une température comprise entre 900 et 1000°C ; la chaux vive obtenue est hydratée par addition d'eau : c'est la chaux appelée couramment fleur

Chapitre 4 : les matériaux utilisés

de chaux, chaux éteinte, chaux grasse. Dans le domaine concerné l'appellation correcte est : chaux aérienne éteinte.

b- Prise :

Les chaux aériennes durcissent en se « décarbonatant » au contact du gaz carbonique de l'air. Le durcissement reconstitue en quelque sorte le calcaire d'origine.

c- Avantage :

- Une élasticité et une faculté d'adaptation supérieure aux autres liants
- Un bon comportement au gel
- Une bonne adhérence au support
- Un aspect homogène qui ne se fissure pas
- Une protection correcte contre les intempéries
- Une bonne imperméabilité à l'eau de ruissellement du fait que cet enduit est peu sensible à la fissuration et que sa résistance augmente au fur et à mesure de la carbonatation
- Imperméable à l'air
- Absence de retrait
- Bonne perméabilité à la vapeur d'eau, permettant un séchage rapide
- Un prix de revient très intéressant à l'heure actuelle
- La chaux donne des mortiers gras, onctueux, que l'on peut préparer en grande quantité car les risques de ségrégation, et la vitesse de prise est diminuée.

d-Conseils de mise en œuvre :

- Par temps de chaleur et de vent, humidifier le support et maintenir le mélange humide après le début du durcissement,
- A utiliser entre +5°et +30° C ambiance et support,

1-2 Fibres plastiques

La bouteille plastique d'eau est la plus forte croissance de l'industrie des boissons dans le monde. Au cours de la dernière décennie 1,5 millions de tonnes de plastique sont utilisées pour la mise en bouteille de l'eau chaque année.

Chapitre 4 : les matériaux utilisés

Les études montrent que 1500 bouteilles sont sous-évaluées comme déchets chaque seconde. D'autre part, le nombre de bouteilles recyclées ou retourné est très faible.

La fibre plastique, est un mélange contenant une matière de base (un polymère) qui est susceptible d'être moulé, façonné, en général à chaud et sous pression, afin de conduire à un semi-produit ou à un objet. La matière de base (la résine) est un polymère. Les résines des matières plastiques sont issues de produits intermédiaires (éthylène, propylène, acétylène, benzène, etc.) dont les matières premières sont le pétrole.

Le type de ce matériel est en polyéthylène, les fibres plastiques sont coupées en morceaux formes 1mm de diamètre et 20 mm d'épaisseur.

2- CLASSIFICATION DES SOLS

2-1- La densité de sol

2-1-1 DEFINITION

La masse volumique, aussi appelée densité volumique de masse, est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume.

Elle est généralement notée par les lettres grecques ρ (*rhô*) ou μ (*mu*). On utilise ces deux notations en fonction des habitudes du domaine de travail. Toutefois, le Bureau international des poids et mesures (BIPM) recommande d'utiliser la notation ρ .

Elle est déterminée par le rapport

$$\rho = \frac{m}{V}$$

où m est la masse de la substance homogène occupant un volume V .

La masse volumique est le synonyme moderne des expressions désuètes « densité absolue » et « densité propre », ou encore « masse spécifique ».

La masse volumique est l'inverse du volume massique.

2-1-2 Calcul la densité dans laboratoire :

- La masse de la moule : $m_{moule} = 180$ g
- La masse de sol A avec la moule : $m_{At} = 301$ g
- La masse de sol B avec la moule : $m_{Bt} = 301$ g

Chapitre 4 : les matériaux utilisés

- Le volume de la moule : $\frac{\pi d^2}{4} * h = 84 \text{ cm}^3$
- Les masse volumiques des sols A et B(ρ_A , ρ_B) :

- $\rho_A = \frac{M_A}{V} = 1.44 \text{ g/cm}^3$

- $\rho_B = \frac{M_B}{V} = 1.35 \text{ g/cm}^3$

2-2- ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

2-2-1DEFINITIONS :

On appelle granulat un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, de provenance naturelle ou artificielle, destinés à la confection :

- des mortiers, des bétons,
- des couches de fondation, des couches de base et de roulement des chaussées,
- et des assises et des ballasts de voies ferrées.

Les granulats sont appelés fillers, sablons, sables, gravillons, graves ou ballast suivant leurs dimensions.

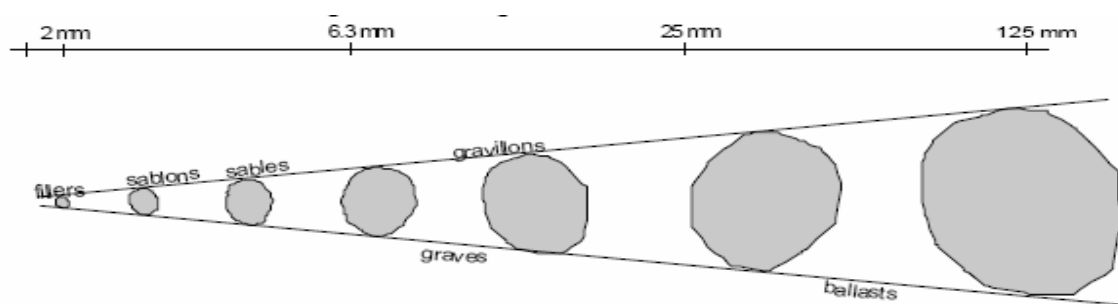


Figure :1 les dimensions de sol

2-2-2 CLASSES GRANULAIRES :

- Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D.
- Le premier désigne le diamètre minimum des grains d et le deuxième le diamètre maximum

D.

- Lorsque d est inférieur à 0.5 mm, le granulat est désigné 0/D.

Chapitre 4 : les matériaux utilisés

- Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum D exprimé en mm.

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrés :

- Les fines 0/D avec $D \leq 0,08$ mm,
- Les sables 0/D avec $D \leq 6,3$ mm,
- Les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm,
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm,
- Les graves d/D avec $d \geq 6,3$ mm et $D \leq 80$ mm,

Le granulat est dit de classe d/D lorsqu'il satisfait aux conditions suivantes :

Le refus sur le tamis D est compris entre :

- 1 et 15% si $D > 1.56 d$,
- 1 et 20% si $D \leq 1.56 d$

-Le tamisat au tamis d est compris entre :

- 1 et 15% si $D > 1.56 d$,
- 1 et 20% si $D \leq 1.56 d$

-Le refus sur le tamis 1.56 D est nul,

-Le tamisat au tamis 0.63 $d < 3\%$; toutefois pour $D \leq 5$ mm, cette limite est portée à 5%.

2-2-3 OBJECTIF:

• L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre **0,063** et **125 mm**. On appelle :

- **REFUS** sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.
- **TAMISAT** (ou **passant**) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

2-2-4 PRINCIPE DE L'ESSAI:

• L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de *tamis* un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.

• Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

2-2-5 Domaine d'application :

Tous les matériaux cités par la norme NF P 11 300 et le GTR .

2-2-6 Matériel utilisé :

- Une balance de précision.
- Une série de tamis d'ouvertures (en mm).
- Une série de tares pesées préalablement.
- Une tamiseur mécanique.



Figure 2 : Tamiseur mécanique

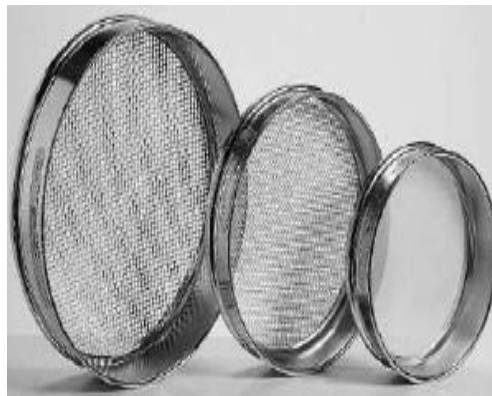


Figure 3 : les Tamis utilisés

Chapitre 4 : les matériaux utilisés

Tableau 1 : Le tableau des résultats de l'analyse granulométrique pour sol A :

Tamis (mm)	Tares (g)	Refus +Tares (g)	Refus Partiels (g)	Refus cumulés		Tamisats (%)
				(g)	(%)	
2	384.5	743.5	359	359	57.44	42.56
0.7	323	446.5	123.5	482.5	77.20	22.80
0.355	294.5	326.5	32	514.5	82.32	17.68
0.125	264	319	55	569.5	91.12	9.88
0.063	261.5	298.5	37	606.5	97.04	2.96
0.045	256	267	11	617.5	98.80	1.20
0.032	259	263.5	4.5	622	99.52	0.48
0.025	251	252	1	623	99.68	0.32
0.020	251.5	253.5	2	625	100	0
Fond	250	250	0	625	100	0

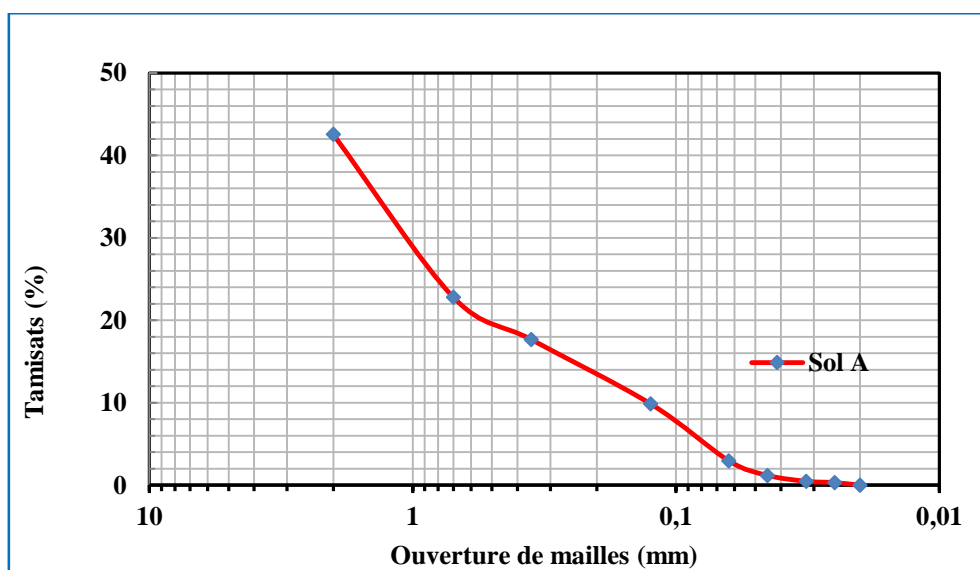


Figure 4 la courbe granulométrique de sol A

Chapitre 4 : les matériaux utilisés

Tableau 2 : Le tableau des résultats de l'analyse granulométrique pour sol B :

Tamis (mm)	Tares (g)	Refus +Tares (g)	Refus Partiels (g)	Refus cumulés		Tamisats (%)
				(g)	(%)	
2	384.5	1040.5	619.5	619.5	68.08	31.92
0.7	323	495	172	791.5	87.55	12.45
0.355	294.5	330	35.5	827	91.48	8.52
0.125	264	314	50	877	97.01	2.99
0.063	261.5	277.5	16	893	98.79	1.22
0.045	256	263	7	900	99.55	0.45
0.032	259	260	1	901	99.66	0.34
0.025	251	251.5	0.5	901.5	99.72	0.28
0.020	251.5	253.5	2.5	904	100	0
Fond	250	250	0	904	100	0

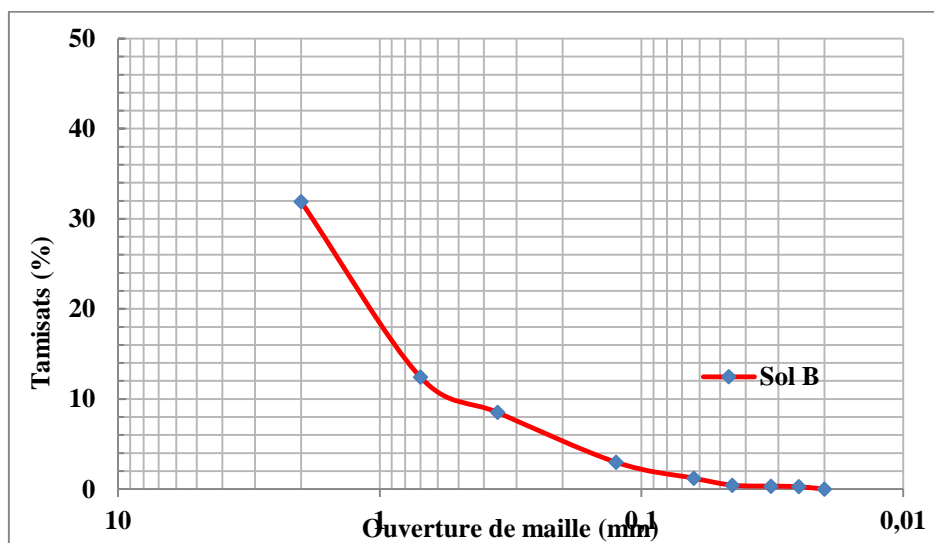


Figure 5 ; la courbe granulométrique de sol B

Le tableau 3 : ci-dessous correspond a la norme française NF P18-560 utilisée notamment dans le domaine :

Maxi	Appellation	Mini
200mm	cailloux	20 mm
20 mm	Graviers	2 mm
2 mm	Sables grossiers	0.2 mm
0.2 mm	Sables fins	20 μm
20 μm	limons	2 μm
2 μm	argiles	

2-3Essais (Testes) d'Atterberg

2-3-1. Introduction

Les limites d'Atterberg sont des essais qui permettent de définir des indicateurs qualifiant la plasticité d'un sol, et plus précisément de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau. Notons que cet essai se fait uniquement sur les éléments fins du sol et il consiste à faire varier la teneur en eau de l'élément en observant sa consistance, ce qui permet de faire une classification du sol. Selon sa teneur en eau, un sol sensible à l'eau peut se présenter sous trois états :

1. état solide (état solide avec retrait et état solide sans retrait)

Chapitre 4 : les matériaux utilisés

2. état plastique
3. état liquide

2-3-2 But de l'essai :

Déterminer les teneurs en eau remarquables situées à la frontière entre ces différents états sont les « **Limites d'Atterberg** » :

- limite de Liquidité : WL (frontière entre état plastique et liquide)
- limite de Plasticité : WP (frontière entre état solide et plastique)
- limite de Retrait : WS qui sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retraits

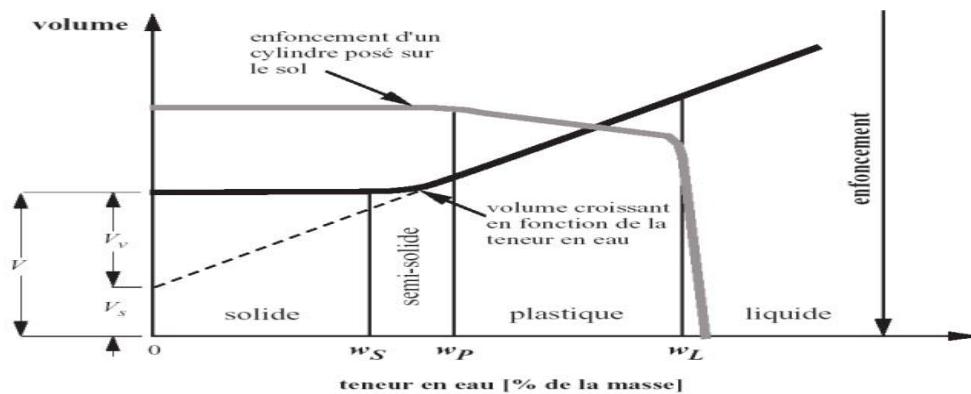


Figure 6 : différents états sont les « Limites d'Atterberg »

2-3-3 Limite de liquidité w_l :

Pour déterminer la limite de liquidité, on étend sur une coupelle une couche du matériau dans lequel on trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de v . On imprime à la coupelle des chocs semblables en comptant le nombre de chocs nécessaires pour fermer la rainure sur **1cm** on mesure alors la teneur en eau de la pâte.

Si on étudie la relation qui lie le nombre de chocs N à la teneur en eau w . On constate que la courbe représentative de cette relation est une droite en coordonnées semi-logarithmiques (échelle arithmétique pour les teneurs en eau, logarithmique pour le nombre de chocs), lorsque le nombre est

Chapitre 4 : les matériaux utilisés

compris entre 15 et 35, par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à une fermeture en 25 chocs.



Photo 1 : limite de liquidité a laboratoire (LTPE – annaba)

2-3-5 Limite de plasticité wp :

Pour déterminer la limite de liquidité, on étend sur une coupelle une couche du matériau dans lequel on trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de v . On imprime à la coupelle des chocs semblables en comptant le nombre de chocs nécessaires pour fermer la rainure sur *1cm* on mesure alors la teneur en eau de la pâte.



Photo 2 : limite de plasticité a laboratoire (LTPE-annaba)

2-3-6-Expression des résultats

A partir des limites d'Atterberg, on peut calculer les indices suivants qui expriment la sensibilité à l'eau du sol (I_p) et sa consistance (I_c) par rapport à sa teneur en eau (W_n) :

indice de plasticité : $I_p = W_L - W_P$

Pour en savoir plus, consultez la fiche technique de LTPE-Annaba :

Pou sol A :

Tableau 4 indice de plasticité pour sol A

EXPRESSION DES Résultats		
Limites d'Atterberge	$W_L = 31.30$	$W_P = 15.45$
Indice de plasticité : $I_p = W_L - W_P$	11.50	

Pour sol B :

Tableau 5 : indice de plasticité pour sol B

EXPRESSION DES Résultats		
Limites d'Atterberge	$W_L = 21.55$	$W_P = 15.45$
Indice de plastiité : $I_p = W_L - W_P$	06.13	

Tableau 6 : classification indice de plasticité et degré de plasticité

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	plastique
$I_p > 40$	Très plastique

- Calcul la teneur en eau initial (W_n) :

Tableau 7 : la Teneur en eau initial a les doux sol A et B

	Sol A	Sol B
<i>La masse de la tare (g)</i>	14	18
<i>La masse de la tare+Le sol (g)</i>	24.5	30
<i>La masse de sol sèche+ la tare (g)</i>	29.3	23.9
La teneur en eau %	5.83	5.71

3- Classification des sols A et B

Sol A

$$D_{\max} = 2 \text{ mm} < 50 \text{ mm}$$

$$\text{Tamisat } 80 \mu\text{m} = 6\% < 35\%$$

Classe **B** sols sableux et graveleux avec fines

Chapitre 4 : les matériaux utilisés

Tamisé à 80 μm = 6% \leq 12%

Tamisé à 2 mm = 43 % \leq 70%

Sous classe **B4** Graves argileuses (peu argileuses)

Sol B

$D_{\text{max}} = 2 \text{ mm} < 50 \text{ mm}$

Tamisé 80 μm = 2% $<$ 35%

Classe **B** sols sableux et graveleux avec fines

Tamisé à 80 μm = 2% \leq 12%

Tamisé à 2 mm = 32 % \leq 70%

Sous classe **B4** Graves argileuses (peu argileuses)

1-Essais de compactage (Proctor normal)

1-1-Introduction sur l'essai Proctor :

L'essai Proctor, mis au point par l'ingénieur Ralph R.Proctor (1933), est un essai géotechnique qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol granulaire (ou non) par compactage à une énergie fixée (poids de dame, nombre de coups et dimensions normés).

Les remblais posent à l'ingénieur routier un certain nombre de problèmes, d'où on peut citer :

- La stabilité des talus
- La résistance des talus à l'érosion.
- Le tassement.
- Et le compactage.

Le « compactage » est le procédé le plus économique toujours utilisé dans la construction des remblais pour améliorer la densité sèche du sol (gd).

Le « compactage » est une réduction pratiquement instantanée du volume du sol dû à la réduction des vides d'air. Il ne y'a aucune expulsion d'eau ce qui différencie le compactage de la consolidation. [arvor-geo.fr/cariboost_files/Proctor_20du_2026_01.pdf]

L'étude du compactage s'effectue à l'aide d'un damage normalisé connu sous le nom de « l'essai Proctor ».

1- 2 But de l'essai

C'est l'un des essais les plus utilisés en géotechnique routière. Il a pour but de déterminer au laboratoire les conditions de compactage d'un sol donné en fonction de la teneur en eau et l'énergie de compactage. A une énergie de compactage donnée, il s'agit de déterminer la teneur en eau optimale (W_{opt}) et la densité maximale ($\gamma_d \max$) proctor correspondantes.

CHAPITRE 5 : Résultats et Interprétation des essais au laboratoire

N.B : L'essai s'effectue sur un matériau ne contenant que des éléments inférieurs à 20mm

Il existe deux sortes d'essais proctor :

Proctor modifié pour les sols fins

Proctor normal pour les sols fins uniquement

Tableau1 : Caractéristiques essentielles pour les deux types de compactage :

Essai proctor normal	Essai proctor modifié
Poids de la dame 2,490kg	Poids de la dame 4,538kg
Hauteur de la chute 305mm	Hauteur de la chute 457mm
Nombre de couches 3	Nombre de couches 5
Pour les remblais	Finir avec ce proctor pour les 50 dernier cm

L'échantillon nécessaire est ensuite prélevé par quartage ou de préférence au moyen d'un échantillonneur.





Photo 5- 1 : Essais de compactage dans laboratoire (LTPE .Annaba)

1-3 Résultats d'essai Proctor

1-3-1 Pour sol A

a . Sol A (sans additives)





Photo 5- 2 : l'essai proctor pour sol A sans additives dans laboratoire (LTPE.Annaba)

Tableau 2 : Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol A (sans additives). Voir figure ci-dessous

	Sol A (sans additives)		
Teneur en eau (w) %	11.36	14 .06	17.64
Masse volumique humide (g/cm^3)	2.05	2.12	2.09
Masse volumique sèche (g/cm^3)	1.84	1.86	1.77

La courbe de compactage est obtenue à partir des données contenues dans le tableau 2. De cette courbe, on déduit que la masse volumique sèche maximale est $1.86 g/cm^3$ correspondant à une teneur en eau de 14%.

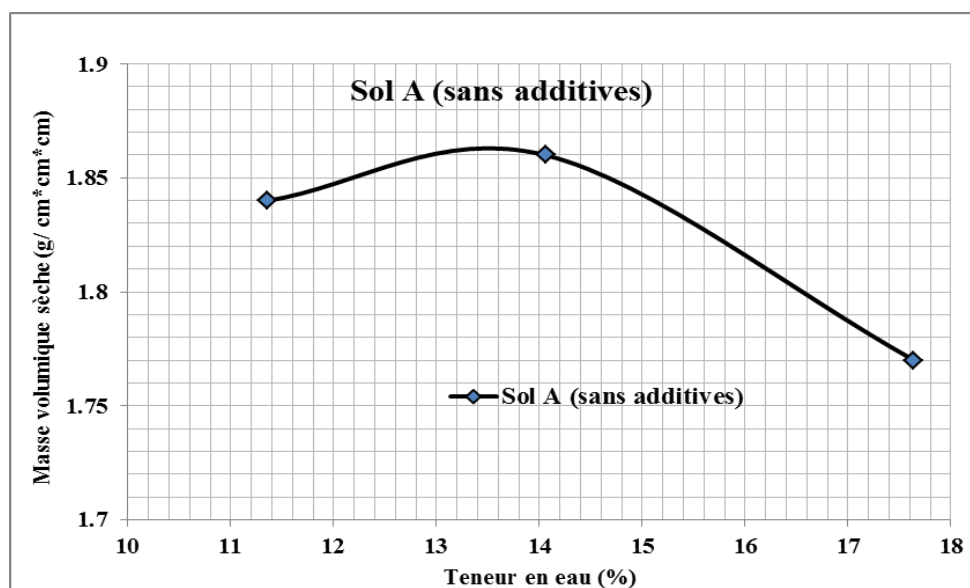


Figure5- 1 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (sans additives).

b . Sol A avec la chaux

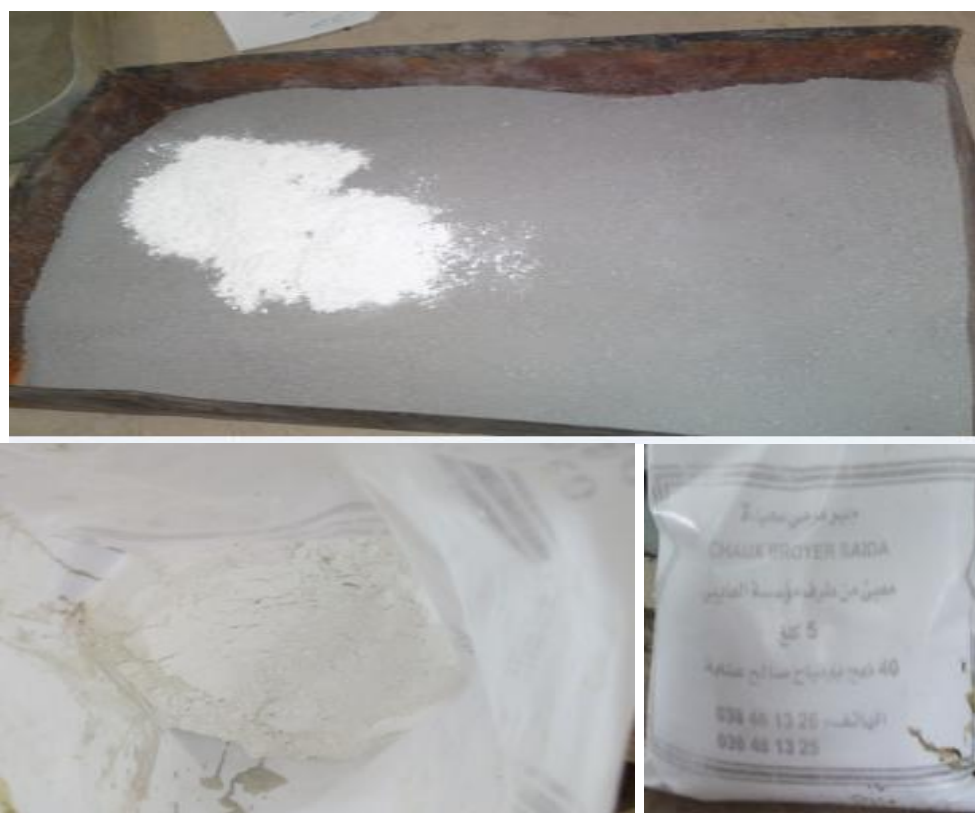


Photo 5- 3 : l'essai proctor pour sol A avec la chaux _ laboratoire (LTPE. Annaba)

CHAPITRE 5 : Résultats et Interprétation des essais au laboratoire

Tableau 3 : Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol A (avec 2% Chaux). Voir figure ci-dessous

	Sol A (Avec 2% Chaux)		
Teneur en eau (w) %	11.23	13.74	17.64
Masse volumique humide (g/cm^3)	2.07	2.16	2.23
Masse volumique sèche (g/cm^3)	1.86	1.90	1.89

La courbe de compactage est obtenue à partir des données contenues dans le tableau 3. De cette courbe, on déduit que la masse volumique sèche maximale est $1.90 g/cm^3$ correspondant à une teneur en eau de 13.74 %.

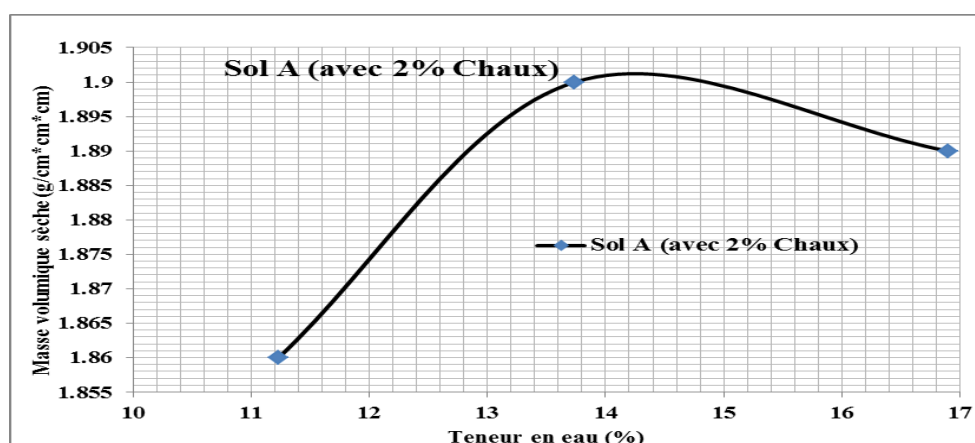


Figure 5-2 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (avec 2% chaux).

Tableau 4 : Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol A (avec 4% Chaux). Voir figure ci-dessous

	Sol A (avec 4% Chaux)		
Teneur en eau (w) %	14.23	17.10	20.62
Masse volumique humide (g/cm^3)	2.10	2.15	2.14
Masse volumique sèche (g/cm^3)	1.83	1.84	1.77

La courbe de compactage est obtenue à partir des données contenues dans le tableau 4. De cette courbe, on déduit que la masse volumique sèche maximale est 1.84 g/cm^3 correspondant à une teneur en eau de 17.10%.

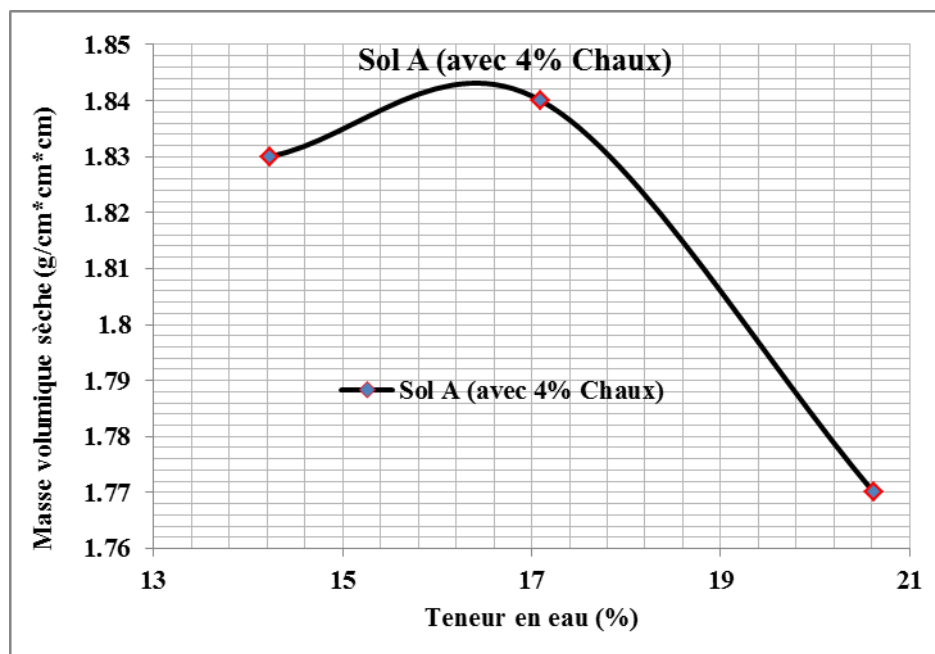


Figure5- 3 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (avec 4% chaux).

Tableau 5 : Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol A (avec 6 % Chaux). Voir figure ci-dessous

	Sol A (avec 6% Chaux)		
Teneur en eau (w) %	15.53	17.64	21.17
Masse volumique humide (g/cm^3)	1.94	2.09	2.10
Masse volumique sèche (g/cm^3)	1.68	1.77	1.73

La courbe de compactage est obtenue à partir des données contenues dans le tableau 5. De cette courbe, on déduit que la masse volumique sèche maximale est 1.77 g/cm^3 correspondant à une teneur en eau de 17.64%.

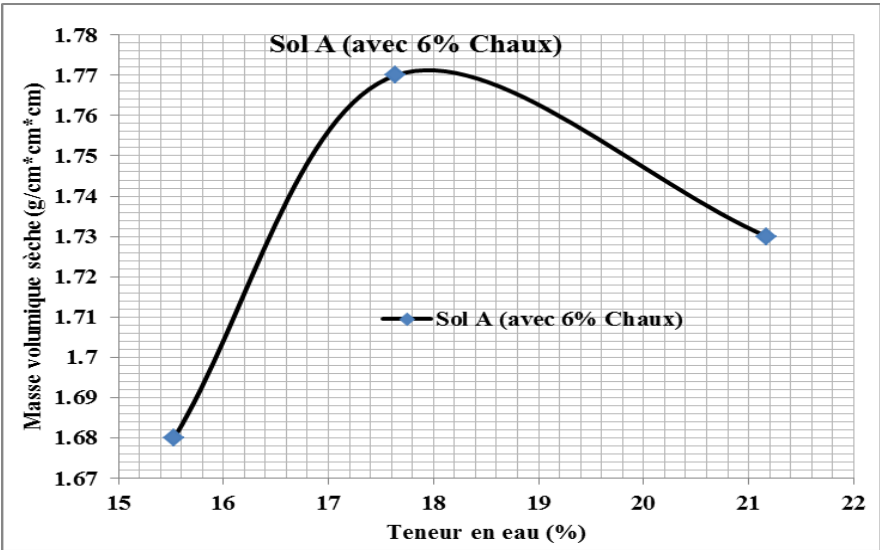


Figure5- 4 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (avec 6% chaux).

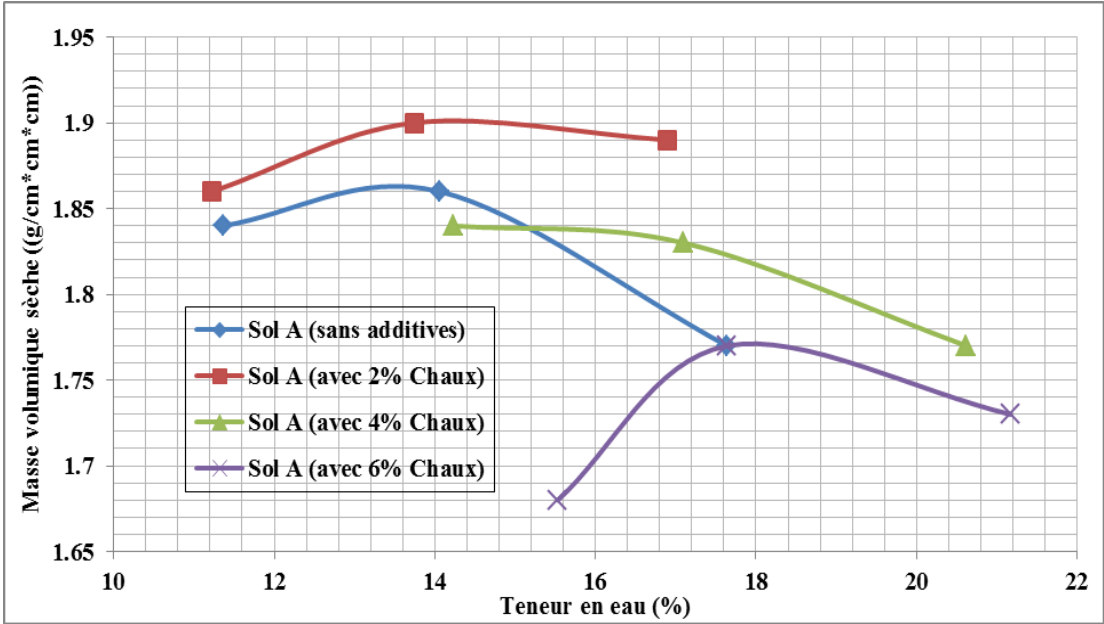


Figure5- 5 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (sans et avec de la chaux).

c . Sol A avec plastique

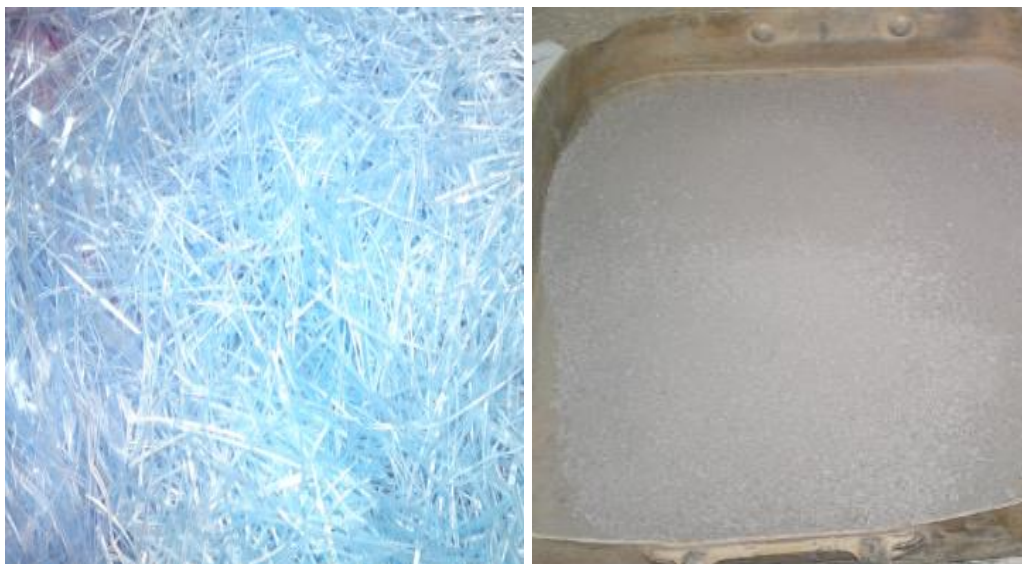


Photo 4 : l'essai proctor pour sol A avec Plastique _ laboratoire (LTPE.Annaba)

Tableau 6 : Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol A (avec 20 g fibres de Plastique). Voir figure ci-dessous

	Sol A (avec 20 g de fibres plastiques)		
Teneur en eau (w) %	11.36	13.50	16.79
Masse volumique humide (g/cm³)	2.05	2.20	2.18
Masse volumique sèche (g/cm³)	1.84	1.94	1.86

La courbe de compactage est obtenue à partir des données contenues dans le tableau 6. De cette courbe, on déduit que la masse volumique sèche maximale est 1.94 g/cm³ correspondant à une teneur en eau de 13.50%.

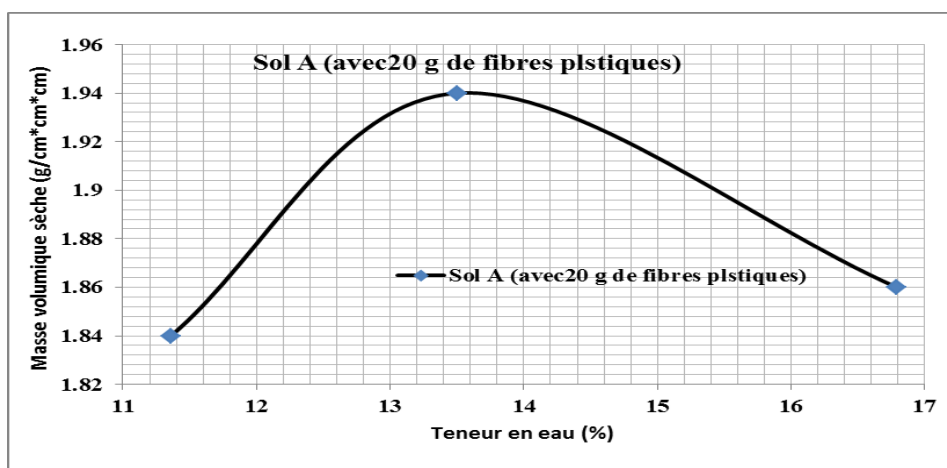


Figure5- 6 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (avec 20 g de Plastique)

Tableau 7 : Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol A (avec 40 g de fibres Plastique). Voir figure ci-dessous

	Sol A (avec 40 g de fibres plastiques)		
Teneur en eau (w) %	11.10	13.66	16.60
Masse volumique humide (g/cm ³)	2.09	2.17	2.21
Masse volumique sèche (g/cm ³)	1.88	1.91	1.89

La courbe de compactage est obtenue à partir des données contenues dans le tableau 7. De cette courbe, on déduit que la masse volumique sèche maximale est 1.91 g/cm³ correspondant à une teneur en eau de 13.66%.

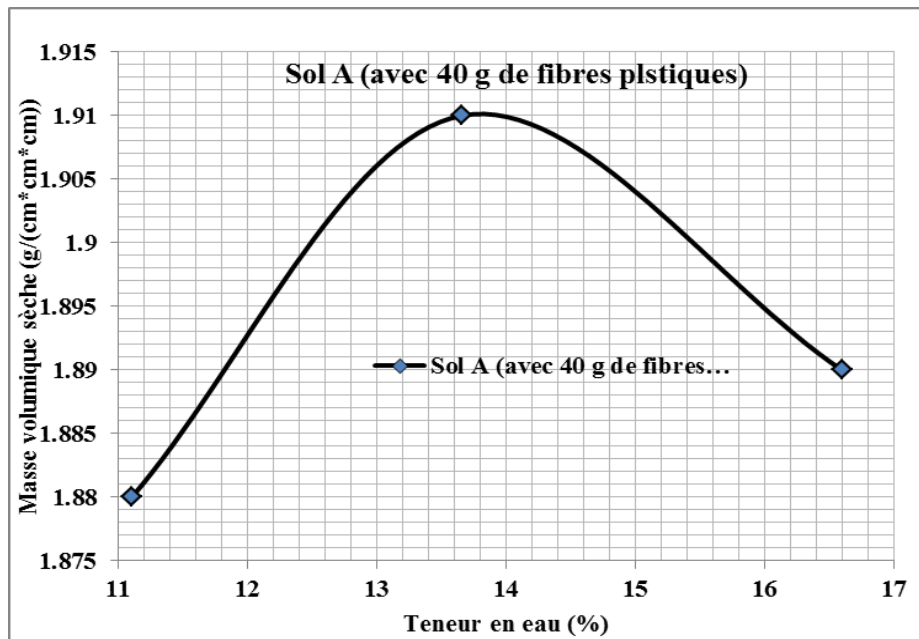


Figure 5-7 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (avec 40 g de fibres Plastique)

Tableau 8 : Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol A (avec 60 g de fibres Plastique). Voir figure ci-dessous

	Sol A (avec 60 g de fibres plastiques)		
Teneur en eau (w) %	11.56	14.06	16.96
Masse volumique humide (g/cm ³)	2.02	2.12	2.16
Masse volumique sèche (g/cm ³)	1.81	1.86	1.84

La courbe de compactage est obtenue à partir des données contenues dans le tableau 8. De cette courbe, on déduit que la masse volumique sèche maximale est 1.86 g/cm³ correspondant à une teneur en eau de 14.06%.

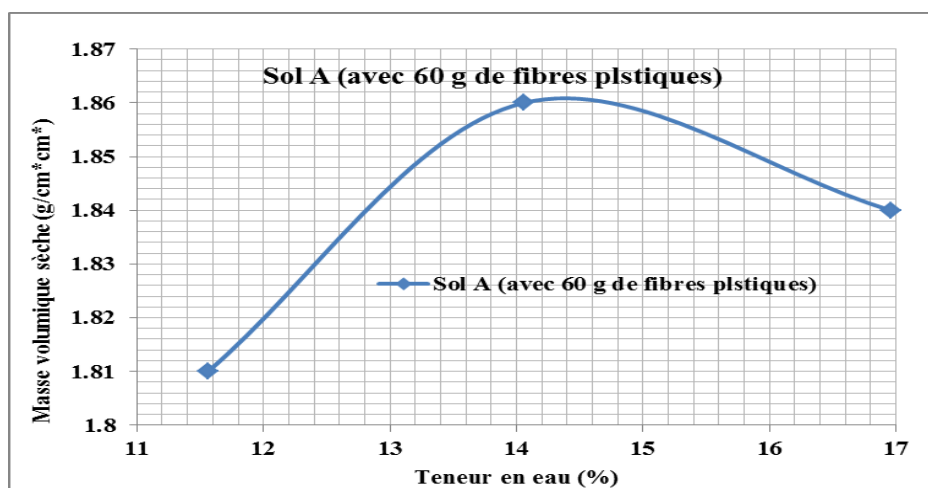


Figure 5- 8 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (avec 60 g de fibres Plastique).

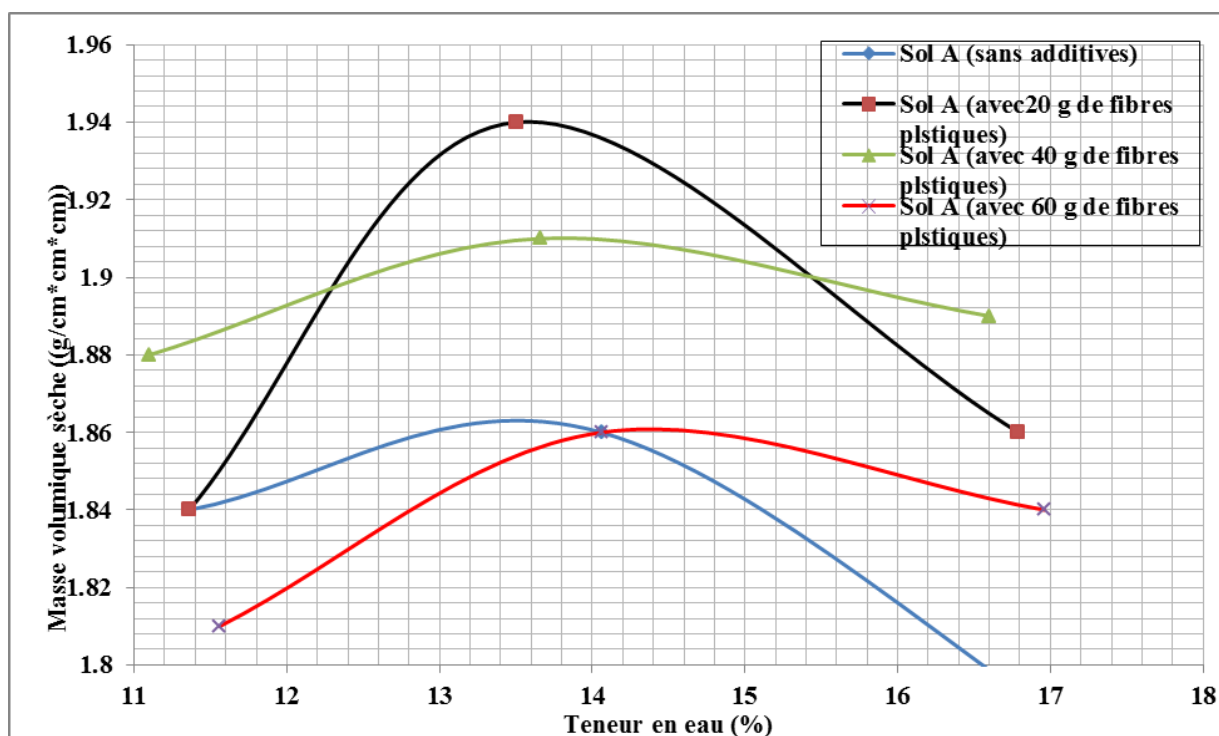


Figure 5-9 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (sans et avec des fibres plastiques).

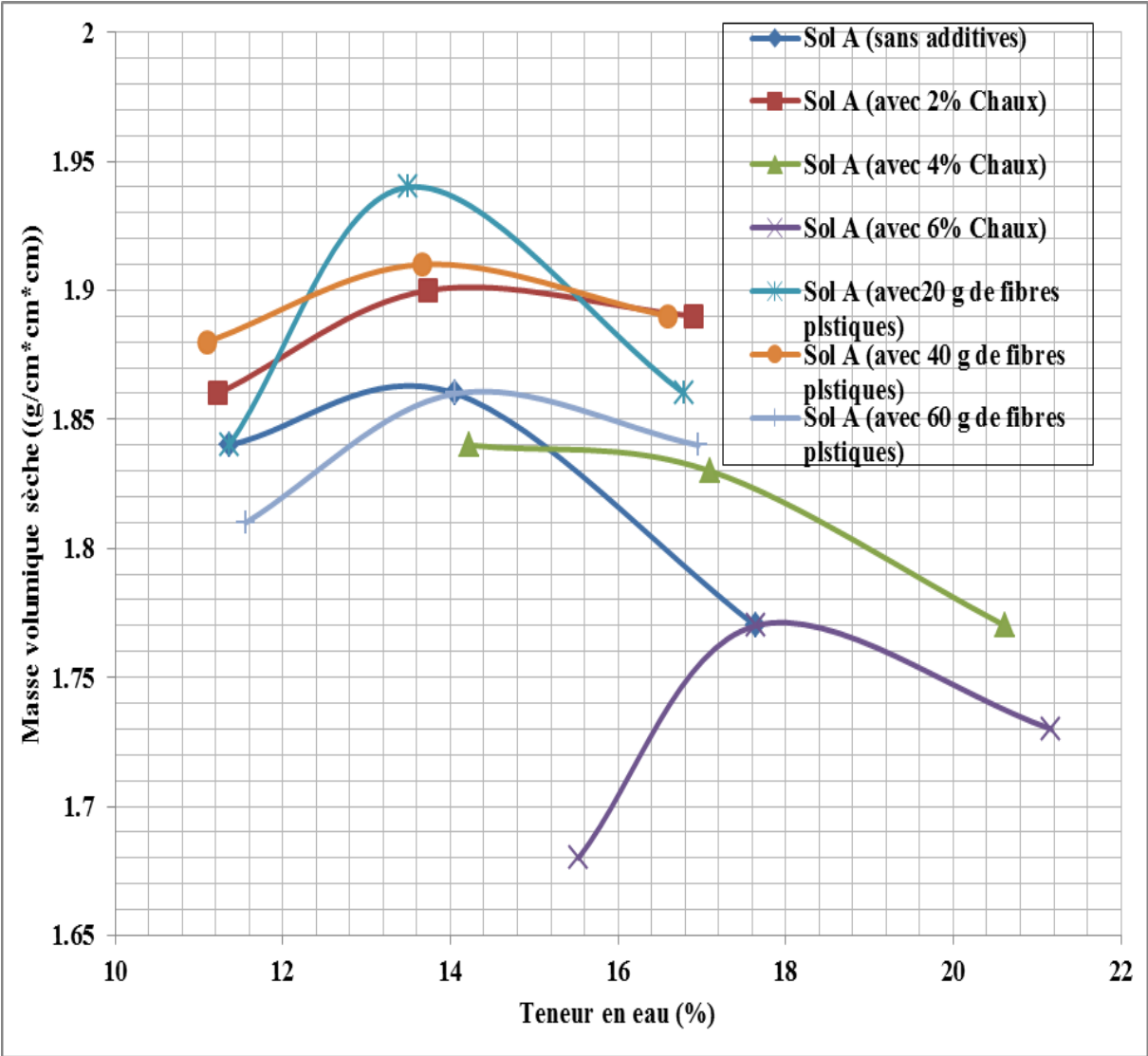


Figure 5-10 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (sans et avec de la chaux et des fibres plastiques).

1-3-2 Pour sol B

a . Sol sans additives



Photo 5- 5 : l'essai proctor pour sol B sans additives _ laboratoire (LTPE.Annaba)

Tableau 9 : Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol B (sans additives). Voir figure ci-dessous

	Sol B (sans additives)		
Teneur en eau (w) %	20.78	24.01	28.01
Masse volumique humide (g/cm ³)	1.82	1.89	1.91
Masse volumique sèche (g/cm ³)	1.50	1.52	1.49

La courbe de compactage est obtenue à partir des données contenues dans le tableau 9. De cette courbe, on déduit que la masse volumique sèche maximale est 1.52 g/cm^3 correspondant à une teneur en eau de 24%.

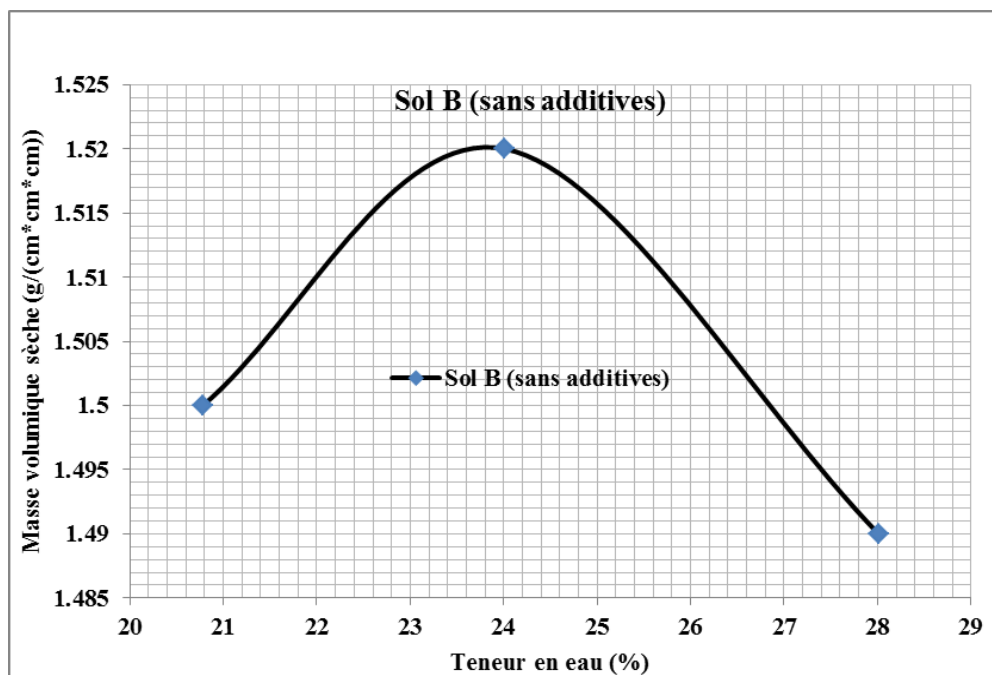


Figure 5- 11 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (sans additives).

b . Sol B avec la chaux



Photo 5-6 : l'essai proctor pour sol B avec la chaux_ laboratoire (LTPE. Annaba)

Tableau 10 : Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol B (avec 2% Chaux). Voir figure ci-dessous

	Sol B (Avec 2% Chaux)		
Teneur en eau (w) %	18.83	21.89	25.99
Masse volumique humide (g/cm^3)	1.98	2.04	2.03
Masse volumique sèche (g/cm^3)	1.66	1.67	1.61

La courbe de compactage est obtenue à partir des données contenues dans le tableau 10. De cette courbe, on déduit que la masse volumique sèche maximale est $1.67 g/cm^3$ correspondant à une teneur en eau de 21.89%.

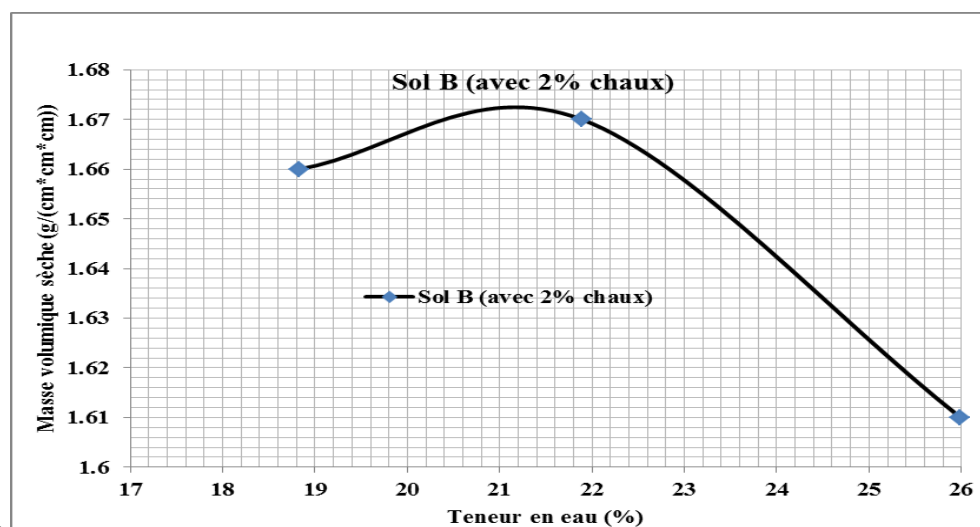


Figure 12 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (avec 2% chaux).

Tableau 11 : Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol B (avec 4% Chaux). Voir figure ci-dessous

	Sol B (Avec 4% Chaux)		
Teneur en eau (w) %	18.21	20.76	24.74
Masse volumique humide (g/cm^3)	2.04	2.13	2.11
Masse volumique sèche (g/cm^3)	1.72	1.76	1.7

La courbe de compactage est obtenue à partir des données contenues dans le tableau 11. De cette courbe, on déduit que la masse volumique sèche maximale est $1.76 g/cm^3$ correspondant à une teneur en eau de 20.76 %.

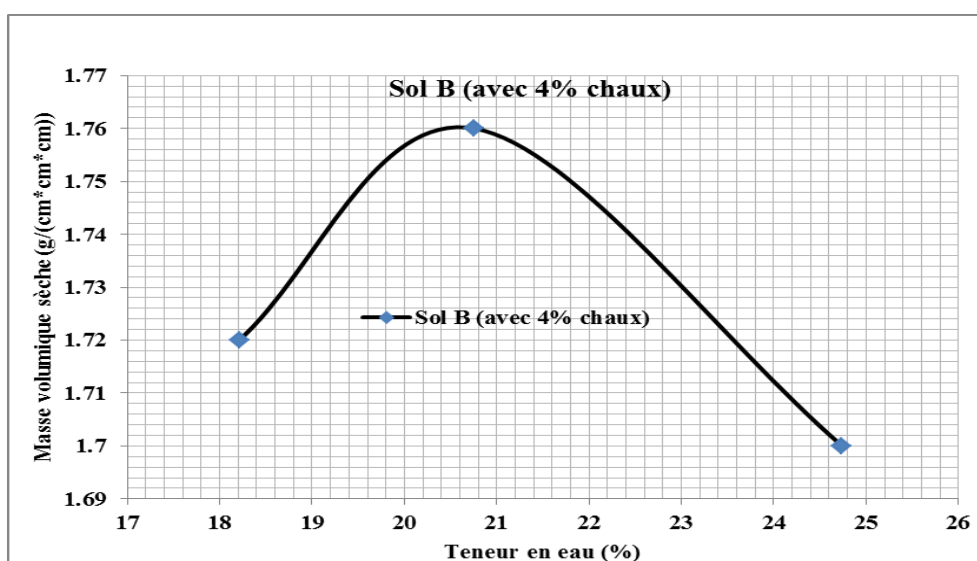


Figure5- 13 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (avec 4% chaux).

CHAPITRE 5 : Résultats et Interprétation des essais au laboratoire

Tableau 12 : Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol B (avec 6 % Chaux). Voir figure ci-dessous

	Sol B (Avec 6% Chaux)		
Teneur en eau (w) %	17.64	20.23	24.08
Masse volumique humide (g/cm^3)	2.09	2.17	2.15
Masse volumique sèche (g/cm^3)	1.77	1.80	1.73

La courbe de compactage est obtenue à partir des données contenues dans le tableau 12. De cette courbe, on déduit que la masse volumique sèche maximale est $1.80 g/cm^3$ correspondant à une teneur en eau de 20.23 %.

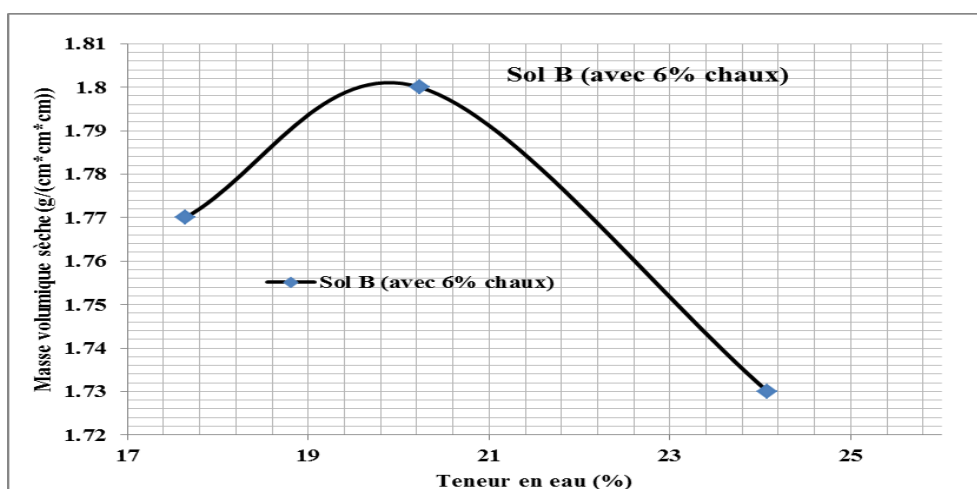


Figure5- 14 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (avec 6% chaux).

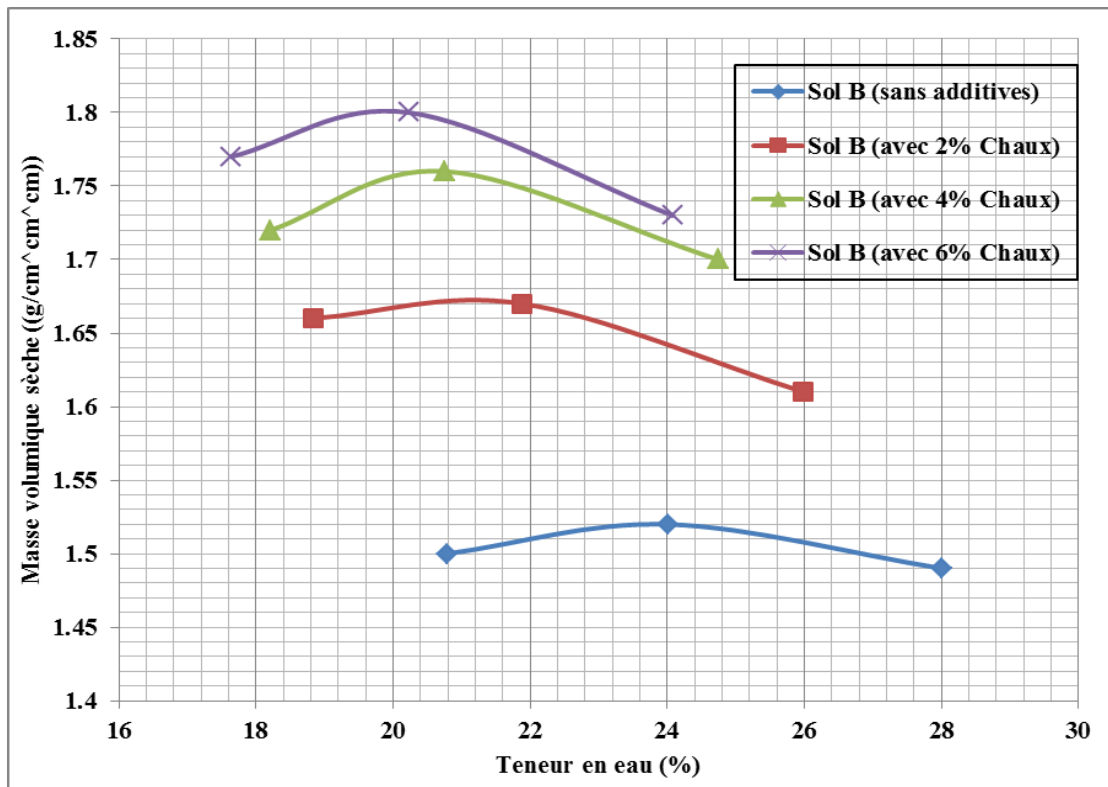


Figure 5-15 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (sans et avec de la chaux).

C. Sol B avec les fibres plastique

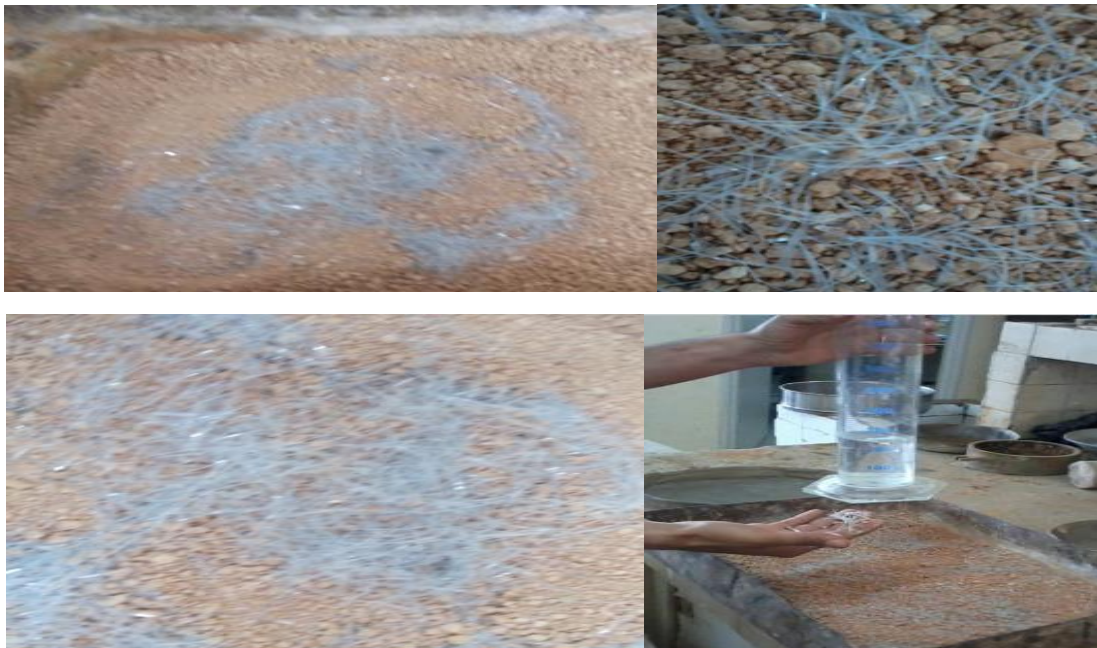


Photo 5- 7 : l'essai proctor pour sol B avec les fibres plastique_ laboratoire (LTPE.Annaba)

Tableau 13 : Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol B (avec 20 g des fibres Plastique). Voir figure ci-dessous

	Sol B (avec 20 g des fibres plastiques)		
Teneur en eau (w) %	14.49	17	20.36
Masse volumique humide (g/cm^3)	2.06	2.16	2.16
Masse volumique sèche (g/cm^3)	1.8	1.84	1.79

La courbe de compactage est obtenue à partir des données contenues dans le tableau 13. De cette courbe, on déduit que la masse volumique sèche maximale est 1.84' g/cm^3 correspondant à une teneur en eau de 17 %.

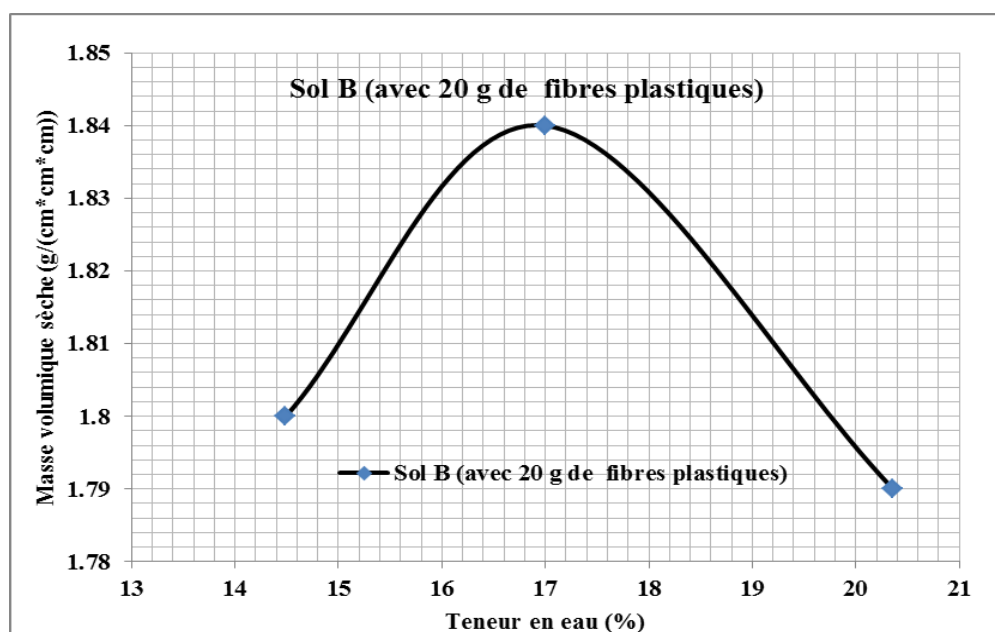


Figure 5- 16 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (avec 20 g des fibres Plastiques).

Tableau 14 : Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol B (avec 40 g des fibres Plastique). Voir figure ci-dessous

	Sol B (avec 40 g des fibres plastiques)		
Teneur en eau (w) %	14.49	16.80	20.23
Masse volumique humide (g/cm^3)	2.06	2.18	2.17
Masse volumique sèche (g/cm^3)	1.79	1.86	1.8

La courbe de compactage est obtenue à partir des données contenues dans le tableau 14. De cette courbe, on déduit que la masse volumique sèche maximale est $1.86 g/cm^3$ correspondant à une teneur en eau de 16.80 %.

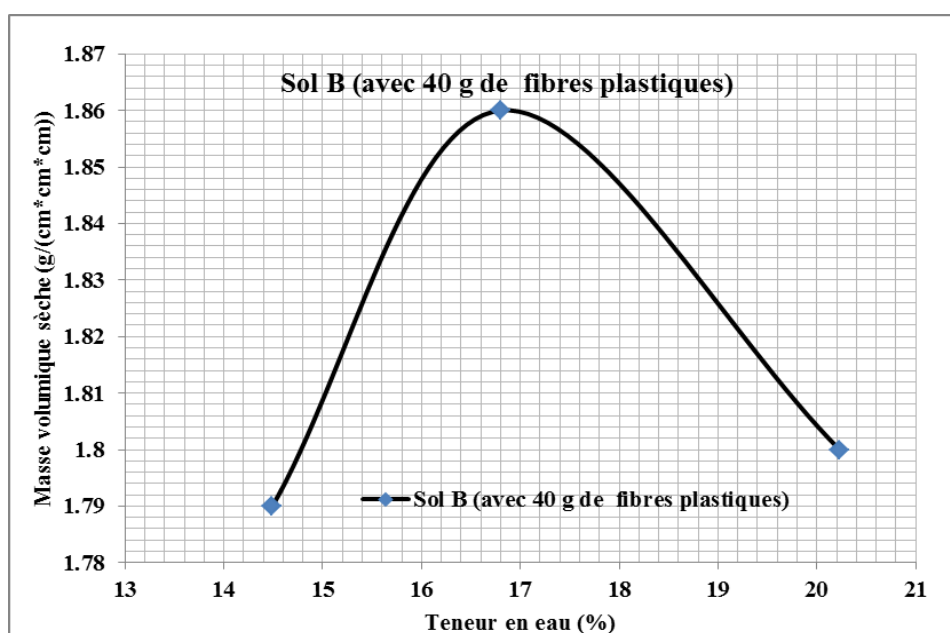


Figure 5-17 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (avec 40 g des fibres Plastique)

Tableau 15 : Les résultats des paramètres de l'essai Proctor standard pour sol B (avec 60 g des fibres Plastique). Voir figure ci-dessous

	Sol B (avec 60 g de fibres plastiques)		
Teneur en eau (w) %	13.81	16.12	19.38
Masse volumique humide (g/cm^3)	2.15	2.26	2.25
Masse volumique sèche (g/cm^3)	1.89	1.94	1.88

La courbe de compactage est obtenue à partir des données contenues dans le tableau 15. De cette courbe, on déduit que la masse volumique sèche maximale est $1.94 g/cm^3$ correspondant à une teneur en eau de 16.12 %.

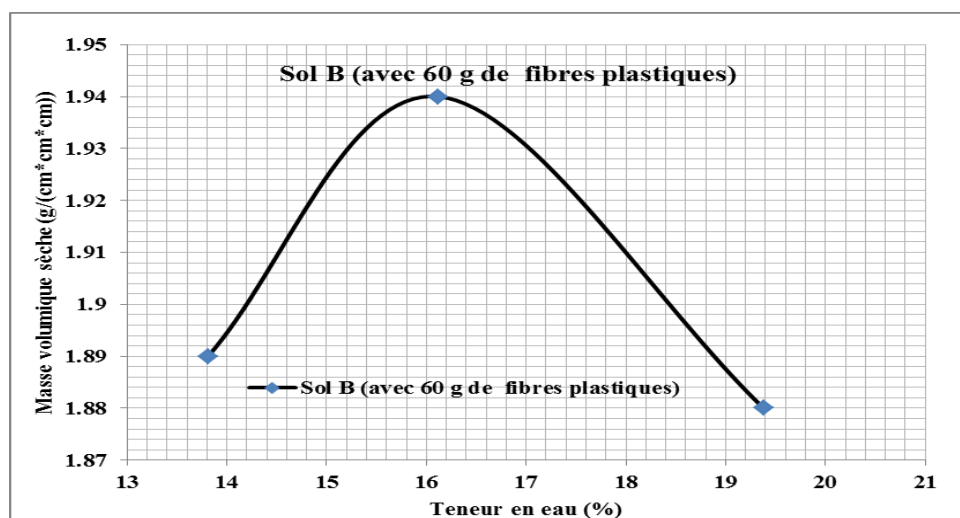


Figure 5- 18 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (avec 60 des fibres plastique)

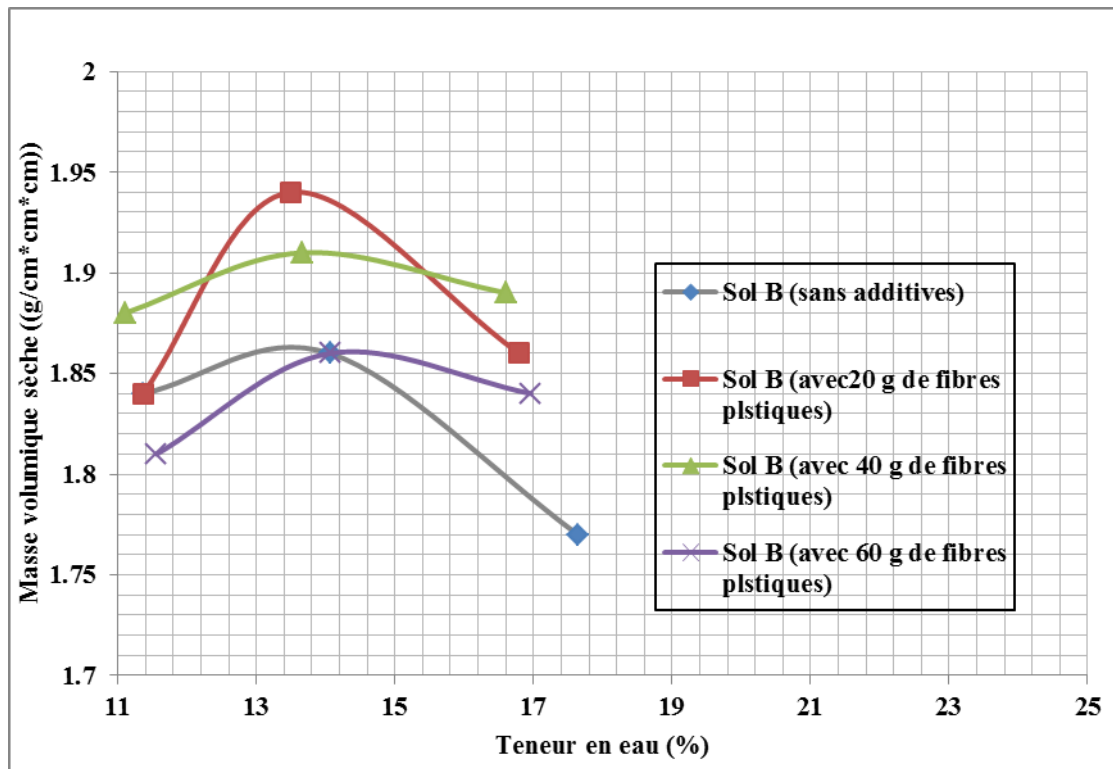


Figure 5-19 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (sans et avec des fibres plastiques).

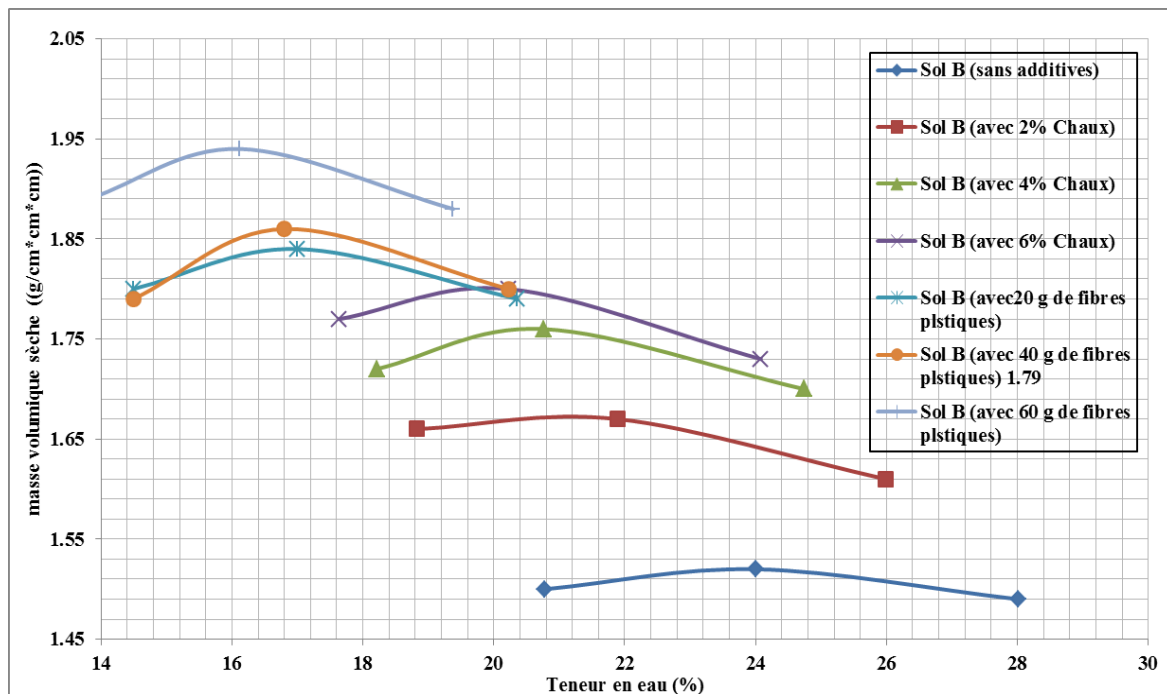


Figure 5- 20 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (sans et avec de la chaux et des fibres plastiques).

2 - Compression simple ou uniaxiale



Photo 5- 8 : les machines utilisai pour la Compression simple_ laboratoire (LTPE.Annaba)

Résistance en compression uniaxiale Dans cet essai, l'éprouvette, généralement cylindrique, est placée entre les plateaux d'une presse , et la force axiale est augmentée jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La valeur maximale F de la force permet de calculer la résistance en compression uniaxiale R_s du sol : $R_s = F/S$ avec S est la surface de la section de l'éprouvette.

2-1 – Pour sol A

a . Sol A sans additives

Tableau 16 : Valeurs de la résistance de compression (sans additives).

	Sol A (sans additives)		
Force de compression (kgf)	80	145	122
La résistance de compression (kgf/cm ²)	04.13	07.49	06.30

b . Sol A avec la chaux

Tableau 17 : Valeurs de la résistance de compression (avec 2% chaux).

	Sol A (avec 2% chaux)		
Force de compression (kgf)	287	300	295
La résistance de compression (kgf/cm²)	14.83	15.50	15.24

Tableau 18 : Valeurs de la résistance de compression (avec 4% chaux).

	Sol A (avec 4% chaux)		
Force de compression (kgf)	289	355	212
La résistance de compression (kgf/cm²)	14.93	18.34	10.96

Tableau 19 : Valeurs de la résistance de compression (avec 6% chaux).

	Sol A (avec 6% chaux)		
Force de compression (kgf)	96	175	147
La résistance de compression (kgf/cm²)	4.96	9.04	7.60

C . Sol A avec les fibres de plastiques



Photo 5- 9 : la déformation de Sol A avec des fibres plastique après la compression laboratoire (LTPE.Annaba)

Tableau 20 : Valeurs de la résistance de compression (avec 20 g des fibres Plastique).

	Sol A (avec 20 g des fibres Plastique)		
Force de compression (kgf)	134	165	158
La résistance de compression (kgf/cm²)	6.93	8.52	8.16

Tableau 21 : Valeurs de la résistance de compression (avec 40 g de Plastique).

	Sol A (avec 40 g de Plastique)		
Force de compression (kgf)	255	320	276
La résistance de compression (kgf/cm²)	13.17	16.53	14.26

Tableau 22 : Valeurs de la résistance de compression (avec 60 g de Plastique).

	Sol A (avec 60 g de Plastique)		
Force de compression (kgf)	164	222	175
La résistance de compression (kgf/cm²)	8.47	11.47	9.04

2-2- Pour sol B

a . Sol B sans additives

Tableau 23 : Valeurs de la résistance de compression (sans additives).

	Sol B (sans additives)		
Force de compression (kgf)	64	80	71
La résistance de compression (kgf/cm²)	03.31	04.13	3.67

b .Sol B avec la chaux

Tableau 24 : Valeurs de la résistance de compression (avec 2% chaux).

	Sol B (avec 2% chaux)		
Force de compression (kgf)	113	134	124
La résistance de compression (kgf/cm²)	5.84	6.93	6.41

Tableau 25 : Valeurs de la résistance de compression (avec 4% chaux).

	Sol B (avec 4% chaux)		
Force de compression (kgf)	160	183	157
La résistance de compression (kgf/cm ²)	8.26	9.46	8.11

Tableau 26 : Valeurs de la résistance de compression (avec 6% chaux).

	Sol B (avec 6% chaux)		
Force de compression (kgf)	174	174	166
La résistance de compression (kgf/cm ²)	8.99	8.99	8.57

C . Sol B avec les fibers de plastique



Photo 5-10 : la déformation de Sol B avec plastique après la compression laboratoire (LTPE. Annaba)

Tableau 27 : Valeurs de la résistance de compression (avec 20 g de Plastique).

	Sol B (avec 20 g de Plastique)		
Force de compression (kgf)	198	220	212
La résistance de compression (kgf/cm²)	10.23	11.37	10.96

Tableau 28 : Valeurs de la résistance de compression (avec 40 g de Plastique).

	Sol B (avec 40 g de Plastique)		
Force de compression (kgf)	345	520	432
La résistance de compression (kgf/cm²)	17.83	26.87	22.32

Tableau 29 : Valeurs de la résistance de compression (avec 60 g de Plastique).

	Sol B (avec 60 g de Plastique)		
Force de compression (kgf)	278	421	321
La résistance de compression (kgf/cm²)	14.36	21.57	16.16

Tableau 30 : comparaison la masse volumique sèche maximale et la résistance de compression

	Sol A (Sans addition)	La chaux (%)			Les fibres plastique (g)		
		2	4	6	20	40	60
La résistance de compression (kgf/cm²)	7.49	15.50	18.34	9.04	8.52	16.53	11.47
Masse volumique sèche maximale (g/cm³)	1.86	1.90	1.84	1.77	1.94	1.91	1.86

Tableau 31 : comparaison la masse volumique sèche maximale et la résistance de compression pour sol B

	Sol A (Sans addition)	La chaux (%)			Les fibres plastique (g)		
		2	4	6	20	40	60
La résistance de compression (kgf/cm ²)	4.31	6.93	9.46	18.99	11.37	26.87	21.17
Masse volumique sèche maximale (g/cm ³)	1.52	1.67	1.76	1.80	1.84	1.86	1.94

3- interprétation des Résultats

Au contact du sol, la chaux vive absorbe l'humidité du sol et devient de la chaux éteinte (hydratée) (Babasaki et al. 1996). L'hydratation est rapide, génère une grande quantité de chaleur (155 kcal/kg de CaO) et entraîne la formation d'hydroxyde de calcium (Kitazume 2005). Au fur et à mesure de cette formation, une partie du CH va se dissoudre dans l'eau interstitielle et va être adsorbée par les particules de sol. Des échanges ioniques, en particulier le remplacement dans le sol des ions sodium et potassium par des ions calcium et magnésium, vont avoir lieu, ce qui va entraîner une réduction de l'indice de

CHAPITRE 5 : Résultats et Interprétation des essais au laboratoire

plasticité du sol, et une modification structurelle du sol, le rendant plus granuleux et sec, notamment grâce à la floculation des particules d'argile.

L'ajout de chaux provoque une augmentation du pH du sol, ce qui augmente la capacité d'échange ionique de celui-ci, en permettant la dissolution des ions silice (S) et alumine (A) présents dans le sol et leur réaction avec le calcium (CDIT 2002). Ces réactions sont appelées pouzzolaniques. Elles sont lentes et produisent des CSH, CASH et CAH.

L'augmentation de la densité en présence de la chaux peut être expliquée par une diminution de la teneur en eau. Cette diminution est due à la consommation de l'eau nécessaire à l'hydratation de la chaux et l'évaporation d'eau suite à la réaction d'hydratation et par l'aération provoquée par le malaxage.

L'augmentation de la densité et de la résistance de compression par l'addition des fibres plastiques se traduit par l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols et l'apparition d'un gain de cohésion. D'une façon générale, la méthode de renforcement par l'addition des fibres plastiques au sol est semblable à l'addition de la chaux au sol.

Chapitre1 :

Bourdeau, Y. (1997). Le comportement des alluvions du Rhône dans une grande boîte de cisaillement direct. *Revue Française de géotechnique*, (79) :4557.

Dendani, H. (1988). Comportement de matériaux de barrages en terre : étude expérimentale et modélisation. PhD thesis, Institut national polytechnique de Grenoble.

Donaghe, R.T. & Torrey, V.H. (1979). Scalping and replacement effects on strength parameters of earth-rock mixtures. In BGS, editor, *Design parameters in geotechnical engineering*, volume 2, pages 293-4. London.

Fragaszy, R.J., Su, J., Siddiqi, F.H. & Ho, C.L. (1992). Modelling strength of sandy gravel. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 118(No. 6) :920-935.

Holtz, W.G. & Willard, E. (1967). Triaxial shear characteristics of clayed gravel soils. In *Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation engineering*, pages 143-149, Paris.

Insley, A.E. & Hillis, S.F. (1965). Triaxial shear characteristics of a compacted glacial till under unusually high confining pressures. In *Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, volume Vol.1, pages 244-248, Montréal.

Shirdam, R. (1998). Comportement mécanique des matériaux superficiels des versants naturels. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

Collins K and McGown A., 1974. The form and function of microfabric features in variety of natural soils. *geotechnique* 24, n°2: pp 223-254.

Xiang-liang LI, 1999. Comportement hydromécanique des sols fins : de l'état saturé à l'état non saturé. Thèse de doctorat en science appliquées, Université de Liège.

Delphine, H., Michel A., (2002) Rapport : Historique national des opérations de curage et perspectives. « études sur l'eau en France ministère de l'écologie et du développement durable, Agence de l'eau Artois-Picardie.

PROULHAC.N, KER LANN, 2006 Rapport Final du Schéma Directeur de gestion et de valorisation des sédiments de dragage de Rouen et Tancarville. Département de La Gironde .Bassin d'Arcachon.

HAL Id: pastel-00001295 Submitted on 10 Sep 2010.

Chapitre3:

- Documents de Géopac® et Ménard et soltraitemen®.
- **(DTU.13.2)** (1992) «fondation profondes pour le batiment-Chap.VIII : Colonnes ballastées ».
- Aéroport de Nice-France- documents de Ménard soltraitemen®.
- [www.Keller-france.com/technique/procèdes/colonnes ballastées](http://www.Keller-france.com/technique/procèdes/colonnes_ballastées).
- **Jean. Charles Bourdeau** : amélioration des sols p : 6-9.
- **Soletanche Bachy** : PLATES - FORMES AMÉLIORATION DES SOLS
- **Walid ZOUBIR** :effet des résidus minéraux sur l'amélioration des sols fins argileux p 27+ p 28-30
- **DOCUMENTATION TECHNIQUE** :Le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques pour l'exécution des remblais et des couches de forme Routes n°89 • Septembre 2004
- **Bell, F.G.**, (1978). Méthodes de traitement des sols instables. Editions Eyrolles, France, 240p.

Chapitre 5 :

- [arvor-geo.fr/cariboost_files/Proctor_20du_2026_01.pdf]
- Babasaki, R., M. Terashi, T. Suzuki, A. Maekawa, M. Kawamura and E. Fukazawa (1996).
- Japanese Geotechnical Society Technical Committee Report - Factors influencing the strength of improved soil, Grouting and Deep Mixing.
- 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems, Grouting and Deep Mixing, Tokyo, 913-918.
- Kitazume, M. (2005). State of Practice Report: field and laboratory investigation, properties of binders and stabilised soils. Deep Mixing '05, Stockholm, 660-684.
- CDIT (2002).
- The Deep Mixing Method - Principle, Design and Construction, 121 pages.

Conclusions

Les techniques d'amélioration de sols sont très importantes. L'application d'une de ces méthodes nécessite une bonne connaissance du sol à traiter (granulométrie, composition, teneur en eau). Il existe un grand nombre de procédés différents, le but est de trouver la solution la plus efficace et la plus économique.

D'après les essais effectués de cette étude, on peut tirer les points suivants :

- Les valeurs des paramètres de compactage normal pour le sol A (sans additives) sont $\rho_{dmax} = 1.86 \text{ g/cm}^3$ et $\omega_{opt} = 14.05\%$ alors que pour les sols avec addition de 2% de la chaux, la valeur de la densité sèche maximale augmente à 1.9 g/cm^3 et une diminution de la teneur en eau optimale à 13.74%
- Au contraire lorsqu'on ajoute 4% et 6% de la chaux, les valeurs de la densité sèche maximale diminuent à 1.84 g/cm^3 et 1.77 g/cm^3 respectivement, par contre les valeurs de la teneur en eau optimales augmentent à 14.23% et 17.64%
- La plus grande valeur de la densité sèche maximale ($\rho_{dmax} = 1.94 \text{ g/cm}^3$) est obtenue par l'addition de 2% de la chaux avec sol A. par ailleurs, il y a une légère diminution des densités sèches maximales ($\rho_{dmax} = 1.91 \text{ g/cm}^3$ et $\rho_{dmax} = 1.86 \text{ g/cm}^3$) par l'addition de 40g et 60 g de fibres plastiques respectivement.
- Les plus grandes valeurs de la densité sèche maximale sont obtenues par l'addition de 6% de la chaux et 60g de fibres plastiques pour le sol B.
- L'addition de la chaux en général augmente les valeurs de la résistance de compression pour le sol A et le sol B. La plus grande valeur trouvée avec l'addition de 4% de la chaux pour sol A, avec une résistance de compression non confinée égale à 18.53 kgf/cm^2 .
- En ce qui concerne l'addition des fibres plastiques, on remarque que la plus grande valeur a été trouvée par l'addition de 40 g de fibres plastiques au sol B avec une résistance de compression non confinée égale à 26.87 kgf/cm^2 .
- La présence de la chaux et les fibres plastiques au sol améliorent la résistance du sol, ce qui augmente aussi l'énergie portante de sol.
- L'amélioration de ce type est plus économique en termes de coûts et d'énergie pour augmenter la capacité portante du sol et d'éviter le recours aux fondations profondes et les radiers.
- elle est aussi utilisée pour rassurer la stabilité des talus et les cas similaires.

- Elle permet de diminuer la perméabilité du sol.
- En général l'addition de la chaux et les fibres plastiques ont une influence positive pour l'amélioration des sols étudiés.