



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



Université Djillali Bounaama de Khemis Miliana

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre

Département des Sciences de la Terre

Filière : Géologie appliquée

Spécialité : Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique

Mémoire présenté pour l'obtention d'un diplôme de Master
en Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique

Thème

**Effets apportés par les dérivés du pétrole
sur le comportement des sols argileux
améliorés à la chaux**

Réalisé par :

Mlle. Ladjal Khadidja
Mlle. Bokreta Khouloud

Déposé le: 31/07/2021

Encadré par :

Dr. Gadouri Hamid	MCB	Université Khemis-Miliana	Promoteur
Dr. Kellouche Yasmina	MCB	Université Khemis-Miliana	Co-promotrice

Expertisé/examiné à distance par :

Mme. Hadj Mohamed Nacera	MAA	Université Khemis-Miliana	Présidente
Dr. Aissa Mohamed Hemza	MCB	Université Khemis-Miliana	Examineur

Année universitaire : 2020/2021

Dédicace

*Je remercie dieux de m'avoir donnée le courage pour accomplir ce
modeste travail je dédié :*

A mes parents

Mon père Djilali le bien aimé et

Ma chère mère Naima

*A fait preuve d'une grande patience et sacrifice, au cours
de mon processus d'apprentissage, Il m'a toujours*

Encouragé

*A toute ma famille, sans eux, il n'y aurait pas ou je suis
aujourd'hui*

*A ma sœur Noudjoud, Amon frère Sabre, A ma tante Fatima
Zahra*

A mon respecté partenaire Ladjal Khadidja

*A tous ceux qui m'ont soutenu et encouragé depuis mes débuts pas dans
cette vie*

A tous mes chéris et ceux dont je n'ai pas parlé

*Je leur dédie cet humble travail, en espérant qu'il sera à la hauteur
des attentes leurs attentes.*

Khouloud

Dédicace

Avec l'aide de Dieu le tout puissant que j'ai pu arriver au terme de ce Travail que

Je tiens à dédier à :

*Mes très chers parents qui m'ont entouré de leur affection et qui m'ont Toujours
orienté avec leurs Conseils judicieux*

Que Dieu les gardes pour moi et les récompenser Pour leurs sacrifices.

*A ma chère mère, la plus merveilleuse femme, je suis très Reconnaisante à ses
divers sacrifices, Son soutien, et ses encouragements.*

*A mes sœurs Liela, Hadjer, Laalia, Meriem, Fouzia et mes frères Anouar Abd El
djalil et Yassine*

A toute ma famille paternelle et maternelle

A mon binôme Bokreta Khouloud et ma meilleure amie Bokreta Khouloud

A tous ceux ont attribué de près ou de loin à l'élaboration de ce Modest travail.

Khadidja

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En premier lieu, nous exploitons cette occasion qui nous est offerte pour adresser nos plus vifs remerciements et exprimer nos profonde gratitude à notre promoteur de mémoire **Dr. Gadouri Hamid**, Enseignant chercheur à l'Université de Khemis-Miliana et membre au laboratoire de recherche « Géomatériaux » de l'université de Chlef, pour sa grande disponibilité et pour la totale confiance tout au long de ce projet,. Sa grande expérience, sa générosité ses précieux conseils et ses encouragements ont permis le bon déroulement et l'aboutissement de ce travail de fin d'étude.

Nos remerciements les plus sincères pour notre Co-promotrice **Dr. Kellouche Yasmina**, Enseignante chercheur à l'Université de Khemis-Miliana et membre au laboratoire de recherche « Géomatériaux » de l'université de Chlef, d'avoir nous guidée tout au long de ce travail, nous la remercions vivement pour sa disponibilité, sa générosité et pour ces conseils avisés et son aide précieuse pour la rédaction de ce mémoire.

Il nous est très agréable de remercier sincèrement **Mme. Hadj Mohamed Nacera**, Enseignante à l'université de Khemis Miliana, pour sa disponibilité permanente et pour son accompagnement tout au long de notre parcours universitaire et d'avoir également acceptée de présider le jury.

Nous adressons également nos vifs remerciements et les expressions de toute notre gratitude, à **Dr. Aissa Mohamed Hemza**, Enseignante chercheur à l'Université de Khemis-Miliana, d'avoir accepté d'examiner avec toute l'attention voulue le présent travail.

Enfin, nos remerciements vont également à l'ensemble du personnel technique de laboratoire avec lesquels ce travail a été réalisé, **Mme. Boumazona Hadjer** pour la sympathie qu'elle l'a témoigné ainsi qu'à toutes personnes qui de près ou de loin, ont aidé à achever ce travail.

ملخص

أصبح التحسين الكيميائي المطبق في التربة ذات الخصائص الجيوتقنية الضعيفة قطاعاً مهماً من النشاط في مجال الجيوتقني لتلبية الاحتياجات الفنية للبناء. تهدف هذه العملية إلى تحسين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للتربة ، وزيادة قدرتها على التحمل ، وتقليل نفاذية التربة والتحكم في تشوهاها. من الممكن استخدام معالجة بالجير و / أو إضافة معدنية أخرى ، ولكن في بعض الحالات ، يكون هذا النوع من المعالجة غير فعال بسبب وجود اضطرابات في التربة (الزيت ، الكبريتات ، الكلوريدات ، النترات ، الفوسفات ، المواد العضوية ، إلخ.). يعتمد هذا العمل على دراسة تأثير زيت المحرك (2 و 4٪ فيما يتعلق بكتلة التربة الجافة) على حدود التبريرج وخصائص الضغط لتربة طينية رمادية تمت معالجتها بـ 4 و 8٪ من الجير. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن زيت المحرك مع إضافة الجير زاد من معامل اللدونة للتربة المدروسة. يمكن أن يعزى الانخفاض في مؤشر اللدونة مع المعالجة الكيميائية إلى انخفاض سماكة الطبقة المزوجة بسبب التبادل الكاتيوني بواسطة أيونات البوتاسيوم والكالسيوم والحديد. ومع ذلك ، فإن وجود زيت المحرك في التربة الطينية الرمادية الجيرية المستقرة بالجير أدى إلى زيادة الكثافة الجافة القصوى وزيادة المحتوى الرطوبي الأمثل خاصة مع ارتفاع مستوى زيت المحرك. قد تكون هذه الزيادة في الكثافة الجافة مع إضافة زيت المحرك أيضاً بسبب تفاعلات التبادل الكاتيوني ويمكن أيضاً أن تكون بسبب الزيت كونه سائلاً يحتل الفراغات داخل مصفوفة التربة. من ناحية مع زيادة محتوى زيت المحرك بسبب حقيقة أن زيت المحرك كونه سائلاً بخصائص تشحيم OMC أخرى ، قد يكون الانخفاض في ميل إلى تسهيل انزلاق جزيئات التربة بالنسبة لبعضها البعض مما أدى إلى الوصول إلى كثافات أعلى عند انخفاض الرطوبة المحتوى.

الكلمات المفتاحية: التربة الطينية الرمادية ، معالجة، زيت المحرك ، الجير ، حدود أتيربيرج ، خواص الضغط.

Résumé

La stabilisation chimique appliquée dans les sols à faibles caractéristiques mécaniques est devenue un secteur d'activité important dans le domaine de la géotechnique pour satisfaire les besoins techniques des constructions. Ce procédé vise à améliorer les propriétés physico-mécaniques du sol, en augmentant sa capacité portante, en réduisant sa perméabilité et en contrôlant sa déformabilité. Il est possible d'utiliser un traitement à la chaux et/ou une autre addition minérale, mais dans certains cas, ce type de traitement est inefficace du fait de la présence dans le sol de perturbations (huile, sulfates, chlorures, nitrates, phosphates, matières organiques, etc.). Ce travail est basé sur l'étude de l'effet de l'huile moteur (2 et 4% par rapport à la masse de sol sec) sur les limites d'Atterberg et les propriétés de compactage d'un sol argileux gris traité à 4 et 8% de chaux. Les résultats obtenus ont montré que l'huile moteur avec et sans ajout de chaux augmentait l'indice de plasticité du sol étudié. La diminution de l'indice de plasticité avec le traitement chimique pourrait être attribuée à l'épaisseur réduite de la double couche due à l'échange de cations par les ions potassium, calcium et ferrique. Cependant, la présence d'huile de moteur dans un sol argileux gris stabilisé à la chaux a augmenté la densité sèche maximale et a augmenté la teneur en humidité optimale, en particulier avec un niveau d'huile de moteur élevé. Cette augmentation de la densité sèche avec l'ajout d'huile moteur peut également être due à des réactions d'échange de cations et elle pourrait également être due au fait que l'huile est un fluide occupant les vides dans la matrice du sol. D'autre part, la diminution de la MOC à mesure que la teneur en huile moteur augmente peut être due au fait que l'huile moteur étant un fluide avec des caractéristiques lubrifiantes a tendance à faciliter le glissement des particules de sol les unes par rapport aux autres, ce qui a permis d'atteindre des densités plus élevées à une humidité plus faible. Contenu.

Mots clés : Sol argileux gris, Stabilisation, Huile moteur, Chaux, Limites d'Atterberg, Propriétés de compactage.

Abstract

The chemical stabilization applied in soils with poor mechanical characteristics has become an important sector of activity in the field of geotechnics to satisfy the technical needs of constructions. This process aims to improve the physical-mechanical properties of the soil, increasing its bearing capacity, reducing its permeability and controlling its deformability. It is possible to use a treatment with lime and/or another mineral addition, but in some cases, this type of treatment is ineffective due to the presence in the soil of disturbances (oil, sulphates, chlorides, nitrates, phosphates, organic matter, etc.). This work is based on the study of the effect of motor oil (2 and 4% in relation to the mass of dry soil) on the Atterberg limits and the compaction properties of a grey clay soil treated with 4 and 8% lime. The obtained results showed that the motor oil with and without addition lime increased the plasticity index of the studied soil. The decrease in plasticity index with chemical treatment could be attributed to the depressed double layer thickness due to cation exchange by potassium, calcium and ferric ions. However, the presence of motor oil in lime-stabilized grey clayey soil increased the maximum dry density and increased the optimum moisture content especially with high motor oil level. This increase in dry density with addition of motor oil may also be due to cation exchange reactions and it could also be due to oil being a fluid occupying the voids within the soil matrix. On the one hand, the decrease in optimum moisture content as motor oil content increases may be due to the fact that motor oil being a fluid with lubricating characteristics tends to facilitate slippery of the soil particles relative to each other which resulted in reaching higher densities at lower moisture content.

Keywords: Grey clay soil, Stabilization, Motor oil, Lime, Atterberg limits, Compaction properties.

Table des Matières

Dédicaces

Remerciements

Résumé

ملخص

Abstract

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale 1

Chapitre I : Techniques d'améliorations des sols

I.1	Introduction	3
I.2	Les mauvais sols.....	3
	I.2.1 Les argiles	3
	I.2.2 Les Limon.....	4
	I.2.3 Les marnes	4
I.3	Identification et Classification des sols	4
	I.3.1 Identification d'un sol	4
	I.3.2 Paramètres de nature	5
	I.3.3 Paramètres d'état.....	6
	I.3.4 Paramètres de comportement	7
	I.3.5 Paramètres hydrogéologiques	8
	I.3.6 Paramètres traduisant la sensibilité ou l'évolution des sols.....	8
	I.3.7 Identification des sols médiocres (instables).....	8
I.4	Classification d'un sol ou d'un matériau.....	8

I.4.1	Classification selon la granularité.....	9
I.4.2	Classification des sols selon la sismicité.....	10
I.4.3	Classification des sols selon la granularité et la valeur de bleu du sol.....	10
I.4.4	Classification des sols médiocres.....	10
I.5	Pathologie des sols	10
I.5.1	Phénomène de Gonflement	10
I.5.2	Définition des argiles	11
I.5.3	Etude microstructurale des argiles	14
I.5.4	Principales caractéristiques des minéraux argileux.....	19
I.5.5	Tassements	20
I.5.6	Glissements	21
I.6	Quelques cas pathologiques	21
I.6.1	Cas des bâtiments.....	21
I.6.2	Cas des chaussées	21
I.7	Quelques Techniques d'amélioration des sols.....	22
I.7.1	Amélioration par remplacement du sol	22
I.7.2	Compactage de surface	23
I.7.3	Compactage dynamique	25
I.7.4	Vibrocompactage.....	27
I.7.5	Pré-chargement ou Pré-compression.....	27
I.7.6	Accélération de la consolidation par les drains verticaux	28
I.7.7	Inclusion rigide.....	28
I.7.8	Colonnes ballastées	29
I.7.9	Méthodes chimiques	30
I.8	Conclusion.....	30

Chapitre II : Les éléments perturbateurs et leurs effets sur les sols améliorés à la chaux

II.1	Introduction	31
II.2	Les produits de traitement (les additifs).....	31
II.2.1	La chaux aérienne.....	31
II.2.2	Les ciments.....	32
II.3	Les éléments perturbateurs.....	33
II.3.1	Définition d'un élément perturbateur.....	33
II.3.1.1	Les sulfates	33
II.3.1.2	Les nitrates.....	34
II.3.1.3	La matière organique.....	34
II.3.1.4	Les phosphates.....	34
II.3.1.5	Kérosène.....	35
II.3.1.6	Gaz de pétrole liquéfié (GPL)	36
II.3.1.7	Composition et combustion de l'essence.....	37
II.3.1.7 .1	Composition de l'essence	37
II.3.1.7 .1	Combustion de l'essence	38
II.3.1.8	Huile moteur.....	39
II.4	Effet de la chaux sur les propriétés physiques-mécaniques des sols argileux.....	39
II.4.1	Effet de la chaux sur la plasticité.....	39
II.4.1.1	En absence des sulfates	39
II.4.1.2	En présence des sulfates	41
II.4.2	Effet de la chaux sur les caractéristiques du compactage.....	42
II.4.2.1	En absence des sulfates	43
II.4.2.2	En présence des sulfates.....	43
II.4.3	Effet de la chaux sur la résistance au cisaillement.....	44

II.4.3.1	En absence des sulfates	44
II.4.3.2	En présence des sulfates	45
II.5	Conclusion.....	48

Chapitre III : Etude expérimentale

III.1	Introduction	49
III.2	Sols naturels	49
III.2.1	Lieu de prélèvement.	49
III.2.1.1	Préparation.....	50
III.2.2	Chaux.....	53
III.2.2.1	Définition.....	53
III.2.2.2	Chaux utilisée.....	54
III.2.3	Produit pétrolier (Huile moteur).....	55
III.3	Déroulement des essais	56
III.3.1	Combinaison des échantillons.....	56
III.3.2	Propriétés étudiées	57
III.3.2.1	Limites d'Atterberg.....	57
III.3.2.1.1	Principe des limites d'Atterberg	57
III.3.2.1.2	Détermination de la limite de liquidité.....	59
III.3.2.1.3	Détermination de la limite de plasticité.....	60
III.3.2.1.4	Détermination de l'indice de plasticité.....	60
III.3.2.2	Compactage.....	61

III.3.2.2.1 Principe de l'essai.....	61
III.3.2.2.2 Détermination de la densité sèche.....	63
III.3.2.2.3 Détermination de la teneur en eau.....	63
III.4 Conclusion.....	65

Chapitre IV : Présentation et interprétation des résultats obtenus

IV.1 Introduction.....	66
IV.2 Variation des limites d'Atterberg	66
IV.2.1 Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg.....	67
IV.2.2 Effet de la huile moteur sur les limites d'Atterberg.....	68
VI.3 Variation des caractéristiques de compactage.....	69
VI.3.1 Effet de la chaux sur les propriétés de compactage.....	70
IV.3.2 Effet de la huile moteur sur les propriétés de compactage.....	72
IV.4 Conclusion.....	73
Conclusions générales	75
Recommandations et Perspectives	76
Références Bibliographiques	77

Liste des Figures

Figure I-1 Schémas des relations entre les paramètres de nature et d'état du sol (M, AFNOR en août1999).....	7
Figure I-2 Classification triangulaire, Exemple (PAREZ M. , Sols : reconnaissance et essais, AFNOR en août 1999).....	9
Figure I-3 Structure de la kaolinite.(selma, 2017-2018)	13
Figure I-4 Structure d'illite (selma, Mémoire de fin d'étude, 2017-2018).....	13
Figure I-5 Structure de la montmorillonite (selma, Mémoire de fin d'étude, 2017-2018).....	14
Figure I-6 Structure du tétraèdre SiO_4 , (BELABBACI, thèse de doctorat, 2014).....	15
Figure I-7 Structure de l'octaèdre Al_2O_6 , (BELABBACI, thèse de doctorat, 2014)	15
Figure I-8 Différentes structures des groupes des argiles (BELABBACI, thèse de doctorat, 2014)	17
Figure I-9 Ouverture des fissures en proximité des matériaux rigides, (BELABBACI, thèse de doctorat, 2014).....	19
Figure I-10 Photographies au microscope électronique à balayage des argiles, (BELABBACI, thèse de doctorat, 2014).....	19
Figure I-11 Stabilisation par compactage de surface (Cas d'une digue de barrage en terre de Kef-Eddir construit à Tipaza en 2009, Algérie)(Gadouri,H, 2017).....	23
Figure I-12 Compactage de surface aux références de compactages d'une chaussée routière.	24
Figure I-13 Densification d'un terrain par compactage dynamique à très haute énergie (4000 T.m) (Cas réel de l'aéroport de Nice 1978, France). (hamid, thèse final de doctorat , 2017)	25
Figure I-14 Maillage du compactage dynamique	26
Figure I-15 Densification par vibro-compactage (Cas d'un sable lâche ayant 5m d'épaisseur d'un hall industriel construit en Belgique). (Gadouri,H, thèse final de doctorat , 2017).....	27
Figure I-16 Amélioration d'un sol mou par la technique de pré-chargement(gadouri, thèse final de doctorat, 2017).....	28
Figure I-17 Amélioration des mous par la technique de l'Accélération de la consolidation par les drains verticaux, (a): drains de sable verticaux, (b): drains verticaux préfabriqués (gadouri, thèse final de doctorat , 2017).....	28

Figure I-18 Principe de renforcement des sols compressibles par inclusion rigide. (Gadouri,H, 2017)	29
Figure I-19 Principe de renforcement des sols par colonnes ballastées. (Gadouri,H, 2017)	30
Figure II-1 sulfure(Gadouri)	34
Figure II-2 Kérosène	35
Figure II-3 GPL(Gadouri)	36
Figure II-4 Equation de la combustion complète de l'octane(CultureSciences.Chimie)	38
Figure II-5 Effet des sulfates monovalents et divalents sur les limites d'Atterberg d'unekaolinite	42
Figure II-6 Effet des sulfates monovalents et divalents sur les paramètres de compactage d'une kaolinite traité à 6% de chaux, (a): la densité sèche maximale, (b): la teneur en eaoptimale,(Kinuthia et al., 1999).(Gadouri,2017)	44
Figure II-7 Effet des sulfates sur la résistance au cisaillement d'une montmorillonite traitée avec 6% de chaux après une année de cure (pression de confinement: PC = 100 KPa), (Sivapullaiah et al. 2000)	47
Figure III-1 Prélèvement du sol argileux gris (SG) à partir d'un projet de remblai à Haouche El-Ghaba. (Gadouri. 2017)	49
Figure III-2 Moyens utilisés pour la préparation des sols, (a) : concasseur, (b) : broyeur. (Harichane et al. 2011a)	50
Figure III-3 Préparation de sol pour les essais au laboratoire, (a): Sol après concassage, (b):	50
Figure III-4 Le diagramme diffractométrique présentant la composition minéralogique du sol étudié (argilegris). (Gadouri. 2017)	53
Figure III-5 Cycle de production de la chaux	54
Figure III-6 Emballage utilisé pour la Chaux vive de Saïda.	54
Figure III-7 Huile moteur utilisée dans l'étude expérimentale.	56
Figure III-8 Détermination de la limite de liquidité, (a): étalement de la pâte et remplissage de la coupelle, (b): pratiqué la rainure et créer une serré de chocs jusqu'à la fermeture des lèvres à 13mm, (c): prélèvement d'échantillon et dessiccation à l'étuve. (Gadouri.2017)	59
Figure III-9 compactage.	60

Figure III-10 Préparation de la prise d'essai de compactage. (Zoubir. 2009).....	62
Figure III-11 compactage du sol.(Zoubir.2009).....	62
Figure III-12 Organigramme des essais prévus à effectuer au laboratoire	64
Figure IV-1 L'influence de différents dosages en chaux sur la limite de liquidité (W_L) et de plasticité (W_P) du sol argileux gris traité en présence de 2 et 4% de la huile moteur (HM)	67
Figure IV-2 L'influence de différents dosages en chaux sur l'indice de plasticité (I_P) du sol argileux gris traité en présence de 2 et 4% de la huile moteur (HM).....	68
Figure IV-3 L'influence de différents dosages en chaux sur la teneur en eau optimale (W_{opn}) du sol argileux gris traité en présence de 2 et 4% d'huile moteur.....	71
Figure IV-4 L'influence de différents dosages en chaux sur la densité sèche maximale (γ_{dmax}) du sol argileux gris traité en présence de 2 et 4% d'huile moteur.....	72

Liste des tableaux

Tableau I-1 Occurrence des minéraux argileux dans les sols en fonction du climat	12
Tableau I-2 Schéma simplifié montrant la classification des principaux de minéraux Argileux et de leurs espèces, cité par (CABANE.N, 2004). (BELABBACI, thèse de doctorat, STABILISATION DES SOLS GONFLANTS)	18
Tableau I-3 Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux, cité par (CABANE.N, thèse de doctorat, école nationale supérieure des mines, 2004)(BELABBACI, thèse de doctorat, 2014).....	20
Tableau I-4 Profondeur efficace du traitement fonction de l'énergie unitaire du compactage (Jean-Pierre Magnan, 2010).....	27
Tableau II -1 Caractéristiques physico-mécaniques du sol. (Harichane et al. 2011a).....	42
Tableau II -2 Propriétés chimiques des sols étudiés. (Harichane et al. 2011a).....	45
Tableau II -3 Effet des sulfates sur les paramètres de cisaillement effectifs (C' et ϕ') d'une montmorillonite traité à 6% de chaux à différentes périodes de cure, (Sivapullaiah et al, 2000).....	46
Tableau III-1 Caractéristiques physico-mécaniques du sol. (Harichane et al. 2011a).....	51
Tableau III-2 Propriétés chimiques des sols étudiés. (Harichane et al. 2011a).....	52
Tableau III-3 Propriétés minéralogiques des sols étudiés. (Harichane et al. 2011a).....	52
Tableau III-4 Propriétés physiques et chimiques des ajouts utilisés. (Harichane et al, 2011).....	55
Tableau III-5 Caractéristiques physico-chimiques de l'huile moteur utilisée.	56
Tableau III-6 Combinaisons des échantillons des sols stabilisés avec ou sans présence d'huile moteur.	57
Tableau III-7 Quantités des sols et des additifs utilisés avec ou sans présence d'huile moteur pour les limites d'Atterberg.....	58
Tableau IV.1: Résultats des limites d'Atterberg avec et sans présence de la huile moteur du sol gris très plastique très à différents pourcentages de chaux.....	66
Tableau IV.2: Résultats Proctor normal avec et sans présence de la huile moteur du sol gris très plastique très à différents pourcentages de chaux.....	70

Liste des abbreviations et symbols

CaCO_3	:	-	Carbonate de calcium
C_{ca}	:	%	teneur en carbonates
D_{max}	:	mm	la dimension des plus gros éléments
C_U	:	mm	le facteur d'uniformité
W_L	:	%	limites de liquidité
W_P	:	%	limites de plasticité
IP	:	%	L'indice de plasticité
ρ_s	:	t/m ³	la masse volumique des particules
ρ_w	:	t/m ³	la masse volumique
e_{max}	:	-	l'indice des vides maximal
e_{min}	:	-	l'indice des vides minimales
ρ	:		la masse volumique humide
$(\text{Al}_{1.67}\text{Mg}_{0.33}) \text{Si}_4\text{O}_{10} (\text{OH})_2$:	-	la montmorillonite
NC	:	-	Nombre de chocs
γ_{dmax}	:	KN/m ³	Densité sèche maximale
ω_{opt}	:	%	Teneur en eau optimale
Eu	:	T.m	énergie unitaire
CaO	:	-	Oxyde de calcium
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$:	-	gypse
K_2SO_4	:	-	Le sulfate de potassium
$\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$:	-	Alcanes
GPL	:	-	Gaz de pétrole liquéfié
P_{cs}	:	KCal / Nm ³	Pouvoir calorifique supérieur
PC	:	kJ/kg	Pouvoir Calorifique
NF	:	-	Norme française

C	:	g	lime) chaux)
HM	:	g	moteur Huile
ASTM	:	-	Société américaine pour les essais des matériaux
SG	:	-	gris sol
W	:	%	La teneur en eau

Introduction générale

Introduction générale

La raréfaction des sols de bonne qualité pour développer les réseaux routiers, autoroutiers et ferroviaires, ainsi que les zones industrielles et les ouvrages hydrauliques impose parfois de construire sur des sols mous de mauvaise qualité (argiles gonflantes, vases, tourbes, limons, sols organiques.....etc). En ce qui concerne leurs propriétés mécaniques, tous ces sols présentant une plasticité élevée, une faible capacité portante et une faible perméabilité, il a été donc nécessaire d'améliorer ces sols afin de les rendre acceptables pour la construction. Ces limitations pourraient être surmontées par l'amélioration des propriétés géotechniques des sols en employant différentes méthodes mécaniques ou chimiques d'où le processus de stabilisation des sols.

D'une part, l'utilisation des ajouts minéraux pour la stabilisation des sols argileux présente beaucoup d'avantages sur les trois aspects : techniques, économiques, et environnementaux. Ces ajouts combinés avec la chaux et/ou le ciment ont été longtemps employés comme stabilisants de sol tels que les cendres volantes, la fumée de silice, le calcaire, le laitier...De plus, ces ajouts sont généralement additionnés aux sols argileux pour améliorer leurs propriétés géotechniques (physiques et mécaniques). Ce processus s'avère bénéfique pour diminuer la plasticité et augmenter la résistance des sols argileux étudiés.

D'autre part, la présence de certains composés chimiques dans les matériaux de stabilisation (ajouts minéraux), dans le matériau stabilisé (sol), dans l'eau utilisée dans le malaxage et/ou dans la nappe phréatique présente des effets complexes qui sont liés à la perturbation de l'échange cationique et des réactions pouzzolaniques.(Khebizi, 2011)

Cette perturbation devient de plus en plus importante et raison de plusieurs facteurs à savoir : la nature du sol stabilisé, le type et la concentration des composés chimiques qui se présentent dans le système stabilisé, le dosage et le type du liant utilisé, la température de conservation et enfin la période de cure.(Le Roux, 1969)

Mais malgré ces sols sont amélioré il y a parfois la présence de certain composants chimique (ex : sulfates, nitrates, phosphates...etc.) pauvre perturbé le processus d'amélioration des sols soit positive (inhibiteurs) ou bien négative(les éléments perturbateurs).(P.T, 1962)

Aussi il y a d'autres éléments perturbateurs qui sont d'origine pétrolé comme l'huile moteur, kérosène, essence, Gaz de pétrole liquéfié (GPL) ces éléments perturbent le processus d'améliorations.

Dans le cas de notre étude, il s'agit d'un sol argileux gris, qui possède des propriétés mécaniques et physiques faibles, d'où le traitement est conseillé. Cette argile a été prélevée à partir de 4m de profondeur et est de provenance d'un projet de remblai situé approximativement à 18 km au Nord-est de la ville de Chlef.

- **L'objectif du travail**

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'influence et les changements apporté par certains dérivés de pétrole (huile, essence...etc.) sur certains propriétés géotechniques des sols argileux améliorés par l'utilisation de la chaux en tant qu'un additif minéral.

- **Plan de travail**

Le mémoire est structuré en trois chapitres à savoir :

➤ **Une introduction générale** exposant la problématique et définissant les objectifs à atteindre ;

➤ **Le premier chapitre** présente en première partie un aperçu sur l'identification et la classification des sols médiocres et dans une deuxième partie un panorama sur les différentes techniques d'amélioration des mauvais sols

➤ **Le deuxième chapitre** présente une synthèse bibliographique sur les divers aspects des effets des ajouts minéraux sur les sols stabilisés avec et sans présence des composés chimiques.

➤ Dans **le troisième chapitre**, dans ce présent chapitre, nous allons essayer de présenter les différents matériaux sélectionnés pour notre travail (prélèvement, préparation des échantillons, calcul des quantités des matériaux à utiliser...etc.) et ainsi que l'objectif et le principe des différents essais prévus.

Et dans le quatrième chapitre, Il présente la discussion de différents résultats expérimentaux des effets et des changements apportés par huile moteur sur les limites d'Atterberg et les paramètres de compactage (essais Proctor normal), des sols argileux stabilisés à la chaux.

Enfin, ce travail de fin d'étude va se terminer par des conclusions générales en rappelant les principaux résultats obtenus ainsi que les recommandations et les perspectives pour de futurs travaux de recherche.

Chapitre I

Techniques d'amélioration des sols

I.1 Introduction

La nécessité d'utiliser des terrains de plus en plus médiocres pour les constructions de génie civil n'a fait que croître au cours de ces dernières décennies. D'une part le développement impose de réaliser dans les zones de terrains en place non encore construite, qui sont souvent les plus médiocres, des fondations, des grandes excavations, des tunnels...etc. D'autre part le sol est devenu de plus en plus un matériau de construction que l'on cherche, où les raisons souvent économiques nous conduisent à utiliser des sols de qualité médiocre dont il faudra les améliorer.

Il en résulte le développement d'un très grand nombre de techniques destinées à améliorer les caractéristiques mécaniques globales des sols en place ou apportés d'ailleurs. Nous pouvons donc distinguer deux grandes catégories de techniques à savoir: celles où la structure du sol est améliorée par un additif, un liant, ou modifiée par réduction des vides entre les grains. Il y a aussi celles où l'on place dans le sol des éléments structuraux pour augmenter principalement la résistance mécanique: ce sont des techniques de renforcement des sols (Gadouri, 2017).

I.2 Les mauvais sols

Le sol supporte les fondations d'ouvrages, sert comme matériaux de construction (barrages, remblai), peut comporter des ouvrages souterrains (tunnels), reçoit des matériaux à stocker (déchets industriels et nucléaires) et sert à extraire des minéraux et autres ressources de production de l'énergie et des matériaux. Il est donc très important de se renseigner des caractéristiques des mauvais sols (principalement les sols argileux et organiques qui sont la cause d'instabilité des structures projetées) pour qu'on puisse les améliorer.

I.2.1 Les argiles

Les argiles sont des roches sédimentaires à grains fins, de taille inférieure à $5\mu\text{m}$, composées pour une large part de minéraux spécifiques, silicates en général, d'aluminium 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 $0,2\text{ mm/h}$), 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 de l'eau et, au contraire, diminuer de volume sous l'effet de la sécheresse. 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.

Les argiles constituent en général une assise acceptable 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.

I.2.2 Les Limon

Les limons (constitués principalement de silt) possèdent un squelette siliceux à silico-calcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles; mais sa teneur en argile est variable. Ils sont peu perméables.

I.2.3 Les marnes

Les marnes sont à la fois argileuses et calcareuses. On considère, selon le taux de CaCO_3 , trois grandes catégories:

- les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35% de carbonate de calcium (CaCO_3) ;
- les marnes proprement dites contenant 35 à 65% de CaCO_3 ;
- les calcaires marneux qui possèdent 65 à 95% de CaCO_3 .

Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de se fissurer sur une certaine profondeur en cas de sécheresse. Les marnes ont souvent fait l'objet d'exploitation en carrières à ciel ouvert où en souterrain pour donner respectivement :

- de la chaux avec les marnes argileuses ;
- de la chaux hydraulique avec les marnes proprement dites ;
- du ciment avec les marnes calcaires ou calcaires marneux. . (Gadouri, 2017)

I.3 Identification et Classification des sols

I.3.1 Identification d'un sol

Les paramètres servant à identifier un sol sont issus d'analyses et d'essais conventionnels normalisés effectués sur les prélèvements conformément aux classes définies dans la norme (XP P 94-202). Ils sont répartis selon les grands types suivants : nature, état, comportement mécanique.

L'identification ne consiste pas à effectuer systématiquement tous les essais possibles mais uniquement ceux qui sont adaptés, compte tenu des informations déjà recueillies grâce à la description.

I.3.2 Paramètres de nature

Constituants minéraux et organiques

- **Carbonate**

La teneur en carbonates C_{ca} est obtenue à partir de l'essai décrit dans la norme (PAREZ, 1999.);

- **Matières organiques**

Les essais permettant de déterminer une teneur en matières organiques font l'objet des normes (PAREZ, 1999) .

- **autres (silicate, etc.).**

Granularité

La détermination de la granularité se fait par tamisage par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments sont supérieurs à 80 μm (PAREZ, 1999) et par sédimentation pour les éléments inférieurs ou égaux à 80 μm ((NF P 94-057).)

Elle comporte :

1- La recherche de la dimension des plus gros éléments contenus dans le sol (d_{max}) ;
 2- la répartition pondérale des particules, entre différents seuils granulométriques, exprimée par le rapport entre la masse de sol dont la dimension des grains est comprise entre deux valeurs extrêmes et la masse totale du sol soumis à l'analyse. La granularité est représentée par la courbe granulométrique complétée éventuellement par :

- i) le pourcentage de tamisât à 2 mm, à 80 μm ;
- ii) les dimensions d_N pour N fixé ;
- iii) le facteur d'uniformité :

$$(C_U = d_{60}/d_{10})$$

I -1

iv) le facteur de courbure :

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}} = \left(\frac{d_{30}}{d_{60}}\right)^2 C_u$$

I -2

Où :

d_N (avec N en pour cent prenant les valeurs 10, 30, 60) désigne la dimension des grains dont le pourcentage N est de dimension inférieure ou égale à d .

Limites d'Atterberg

a) Les limites de liquidité W_L (NF P 94-051)-(NF P 94-052-1), de plasticité W_P (NF P 94-051), de retrait W_R (XP P 94-060-1) sont des paramètres caractéristiques de la fraction du sol passant au travers du tamis à maille carrée de 400 μm d'ouverture ;

b) plasticité :

L'indice de plasticité I_P est déduit des limites de liquidité et de plasticité

$$I_P = W_L - W_P$$

I -3

c) l'activité argileuse :

La valeur de bleu V_{BS} quantifie la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol (NF P 94-068);

d) la masse volumique des particules ρ_s (NF P 94-054);

e) la masse volumique ρ_w de l'eau interstitielle ;

f) l'indice des vides maximal e_{\max} , indice des vides minimales e_{\min} .

Les essais correspondants sont décrits dans la norme (NF P 94-059);

g) équivalent de sable ES.

L'équivalent de sable s'exprime par le pourcentage volumique mesuré (conventionnellement) des particules grossières contenues dans l'ensemble des éléments de dimension inférieure à 5 mm.

I.3.3 Paramètres d'état

Les paramètres d'état traduisent, à un instant donné, la répartition des phases de sol entre elles et l'arrangement des grains de la phase solide. Ce sont :

- la teneur en eau pondérale w (NF P 94-050) rapport entre la masse d'eau contenue dans le sol et sa masse après séchage.

Éventuellement, la teneur en eau w_{mo} déterminée par la méthode du four à micro-onde ou la teneur en eau w_{pc} déterminée à la plaque chauffante peuvent être utilisées les normes (NF P 94-049-1) et (NF P 94-049-2) ;

- la masse volumique humide (ρ) voir norme (NF P 94-053); et tous les paramètres qui en découlent:

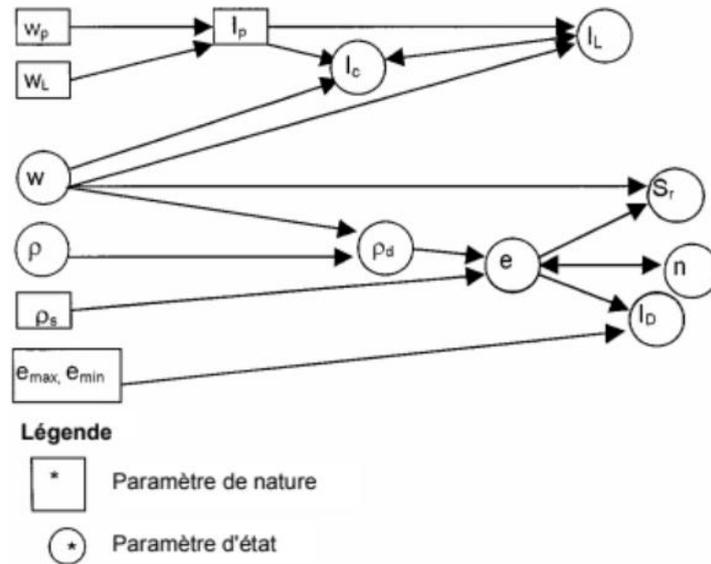


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-**Schémas des relations entre les paramètres de nature et d'état du sol (PAREZ, 1999)**

- l'indice des vides (e) ou la porosité (n) ;
- le degré de saturation (S_r) ;
- la teneur en eau pondérale de saturation (w_{sat}) à partir de la relation;

$$W_{sat} = e \frac{\rho_w}{\rho_s} \tag{I -4}$$

- l'indice de compacité (ID) ou indice de densité pour les sols en majorité grenus

$$I_D = (e_{max} - e) / (e_{max} - e_{min}) \tag{I -5}$$

- l'indice de consistance I_C pour les sols fins

$$I_C = (W_L - W) / I_P \tag{I -6}$$

I.3.4 Paramètres de comportement

Les caractéristiques mécaniques sont déterminées

- soit directement en place :
- pression limite p_l et module pressiométrique E_m;
- résistance statique de pointe q_c mesurée au pénétromètre statique;
- résistance dynamique q_d déduite d'un essai au pénétromètre dynamique;
- cohésion mesurée au scissomètre S_u;
- nombre N lié à la pénétration d'un carottier normalisé ;
- cohésion c_i et angle de frottement φ_i déduit de l'essai au phicomètre;

- résistance au cisaillement déduite lors d'un essai à la boîte de cisaillement.
- soit en laboratoire, à partir d'essais de déformabilité et de résistance à la rupture, effectués sur des prélèvements non remaniés ou sur des échantillons reconstitués et donnant :
- la compressibilité œdométrique ;
- la cohésion effective et l'angle de frottement interne;
- le gonflement;
- la cohésion non drainée c_u obtenue à partir d'essais de cisaillement à l'appareil triaxial ou au scissomètre de laboratoire

I.3.5 Paramètres hydrogéologiques

- perméabilité déduite d'essais en place (PAREZ, 1999) ou en laboratoire.

I.3.6 Paramètres traduisant la sensibilité ou l'évolution des sols

- la solubilité ;
- la sensibilité (aux chocs mécaniques, au remaniement, etc.) ;
- la gélivité ;
- la dégradabilité ;
- la décomposition des sols organiques.

I.3.7 Identification des sols médiocres (instables)

Les sols fins mous et compressibles sont fréquemment rencontrés. Les problèmes relatifs à ce type de sol est qu'ils subissent des déformations importantes sous les charges qui leur sont appliquées. Leur capacité portante est souvent trop faible pour supporter les charges prévues. Toutes ces caractéristiques nous amène aux problèmes rencontrés dans la pratique à savoir des tassements excessifs et l'instabilité de l'ouvrage

I.4 Classification d'un sol ou d'un matériau

La classification consiste à regrouper les sols ou les matériaux qui ont une nature, un état et un comportement similaires vis-à-vis d'une application géotechnique particulière.

Les classifications font intervenir un, deux ou plusieurs critères tels que granularité, plasticité, teneur en matière organique, teneur en carbonates, résistance mécanique, etc.

Les critères retenus pour établir une classification peuvent évoluer dans le temps afin d'intégrer l'expérience acquise. C'est pourquoi il convient de se reporter aux normes liées à l'activité particulière considérée.

I.4.1 Classification selon la granularité

En fonction des applications, les classifications peuvent reposer :

- sur deux fractions granulaires :

La partition granulométrique est faite par rapport à un seuil de dimension des grains d ;

EXEMPLE si $d < 60 \mu\text{m}$ sol à matrice fine

Si $d \geq 60 \mu\text{m}$ sol à matrice grossière.

- sur trois fractions granulaires :

Lorsque l'analyse granulométrique porte sur trois fractions granulaires contiguës, une représentation graphique sous forme triangulaire est généralement adoptée comme le traduit-la(**fig I .2**). Le point P visualise la proportion de chaque fraction granulaire dans l'échantillon analysé. À l'intérieur de chaque fraction granulaire il peut également être introduit d'autres subdivisions.

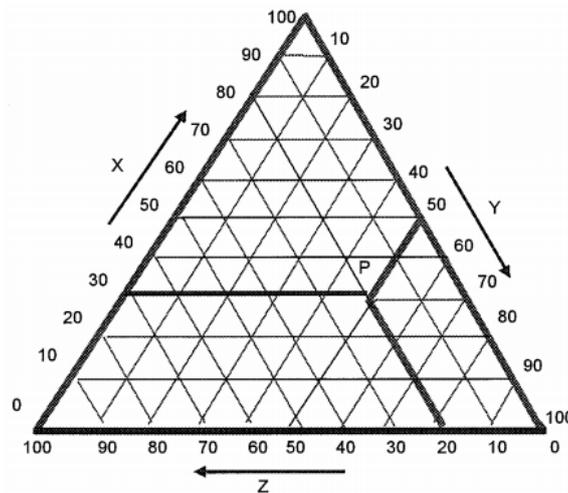


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-2Classification triangulaire, Exemple (PAREZ, 1999)

Le sol P contient :

- 30 % de X ;
- 50 % de Y ;
- 20 % de Z ;

X ; Y ; Z désignent les classes granulaires

Les pourcentages sont ceux de la masse des particules de la fraction granulaire considérée (X, Y, Z) par rapport à la masse totale des particules.

- sur plusieurs seuils granulaires :

Une représentation sous forme d'histogramme est souvent retenue.

EXEMPLES

- classification des granulats;
- classification des matériaux à usage routier (PAREZ, 1999)

I.4.2 Classification des sols selon la sismicité

EXEMPLE La norme XP ENV 1998-1-1 donne une classification des sols de fondation.

I.4.3 Classification des sols selon la granularité et la valeur de bleu du sol

EXEMPLE (PAREZ, 1999)

I.4.4 Classification des sols médiocres

Les sols fins en général et l'argile en particulier sont constitués d'un ensemble de particules minérales ayant une taille inférieure à $2\mu\text{m}$. Ce matériau a fait l'objet de nombreux travaux sur sa nature minéralogique. Au niveau minéralogique, les argiles sont des silicates Simples ou complexes d'aluminium, de magnésium et de fer. La plupart des minéraux argileux se présentent sous la forme de feuillets, d'où leur nom de phyllithes ou phyllo-silicates. Chaque particule est constituée d'un empilement de quelques dizaines ou centaines de feuillets. La constitution chimique, l'épaisseur et l'écartement des feuillets définissent la minéralogie de l'argile et ses propriétés. En général, trois grands types argiles sont identifiés : la kaolinite, la smectite et l'illite. Dans les sols, ces types d'argiles peuvent être mélangés. La proportion de chacune de ces Argiles varie suivant les sols.

I.5 Pathologie des sols

I.5.1 Phénomène de Gonflement

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, tassement, et de glissement. 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, tassement, et de glissement.

Le phénomène de gonflement dépend des caractéristiques minéralogiques du matériau argileux et de la nature de la solution d'hydratation. C'est pourquoi une description microscopique du phénomène est cruciale afin de bien comprendre le développement du gonflement (BELABBACI, 2014).

I.5.2 Définition des argiles

L'argile est une roche sédimentaire, se rapporte à la terre grasse et molle contenant un ensemble de particules fines dont la taille supérieure est fixée à $2\mu\text{m}$. Chargée négativement comme la smectite, l'illite et la kaolinite. La présence de tels minéraux rend l'argile fortement sensible aux molécules polaires d'eau. Cette sensibilité se traduit par le gonflement, le retrait et le changement des propriétés mécaniques. Les argiles sont très abondantes dans la nature et couvrent environ 42 % du volume de l'écorce terrestre. (WAKIM, 2005)

Elles peuvent être classées en deux grandes catégories :

- Les argiles plastiques : elles sont tendres et très déformables ;
- Les argiles raides : elles sont indurées et présentent un comportement plus fragile que ductile au de la de la limite d'élasticité, et cela à cause de la présence des carbonates et du quartz.

L'argile, matériau naturel qui contient habituellement des phyllo-silicates (silicates en feuillets), est plastique à l'état humide et durcit par séchage ou chauffage.

C'est la variation de la teneur en eau qui est le facteur déclenchant des variations de volume. Une augmentation de la teneur en eau entraîne le phénomène de gonflement tandis que sa diminution induit le phénomène de retrait.

Il faut s'entendre sur la qualification de cette teneur en eau. Elle est composée de la teneur en eau liée et de la teneur en eau libre. Les cinétiques d'évolution dans le temps de ces deux teneurs en eau ne sont pas identiques. En effet, la vitesse d'adsorption de l'eau liée, due aux phénomènes électrostatiques, est plus rapide.

Formation des minéraux argileux

Les sols argileux se forment par un processus lent d'altération sous l'action du climat, suivi de phénomènes «érosion, de transport et de sédimentation. 90 % des minéraux argileux sont d'origine détritique, l'altération peut être physique (désagrégation des minéraux primaires) ou chimique par

transformation des minéraux). Certains minéraux argileux précipitent à partir d'une solution (minéraux néoformés).

Il existe donc trois processus de formation des minéraux argileux.

1- Héritage et altération

L'une des origines des minéraux argileux est liée à l'altération physique des roches, En fonction des roches mères et du climat, les minéraux argileux résultant seront différents. En climat froid, l'altération est faible, les minéraux argileux sont identiques ou peu différents des minéraux de la roche (illite et chlorite), ils sont hérités de la roche d'origine.

2- Transformation des minéraux argileux par dégradation et aggradation

La transformation des minéraux argileux consiste en une modification du minéral argileux tout en conservant son type de structure (BELL, 1988) .

On distingue les transformations par dégradation (sous traction d'ions) et par aggradation (fixation d'ions supplémentaires). Ces transformations ont lieu aussi bien au cours de l'altération que pendant la sédimentation et la diagenèse.

3- Contexte de formation des sols argileux :

La sédimentation océanique argileuse est directement liée au type d'altération régnant sur les continents voisins et dépend donc de la latitude et de la nature de la roche mère, mais aussi de l'éloignement des sources ainsi que des conditions physico-chimiques régnant dans la zone de sédimentation.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. -1**Occurrence des minéraux argileux dans les sols en fonction du climat(BELABBACI, 2014)**

Climat	Origine des argiles	Minéraux fréquents
Glaciaire	Héritage	Illite, chlorite
Boréal tempéré	Héritage, transformation	Vermiculite, inter stratifiés, illite, chlorite, smectites
Méditerranéen subtropical	Héritage, transformation, Néof ormation	Smectites,...
Désertique	Héritage	Illite, chlorite,...
Equatorial	Néof ormation	Gibbsite, kaolinite,...

La nature minéralogique des argiles dépend aussi de la roche mère :

- La kaolinite provient de l'altération des roches magmatiques grenues et acides (feldspaths principalement), elle est constituée d'une succession alternée de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite). Les deux feuillets sont liés de telle manière que les sommets du feuillet de silice et ceux d'une des couches du feuillet en octaèdre ne forment qu'une seule et même couche.

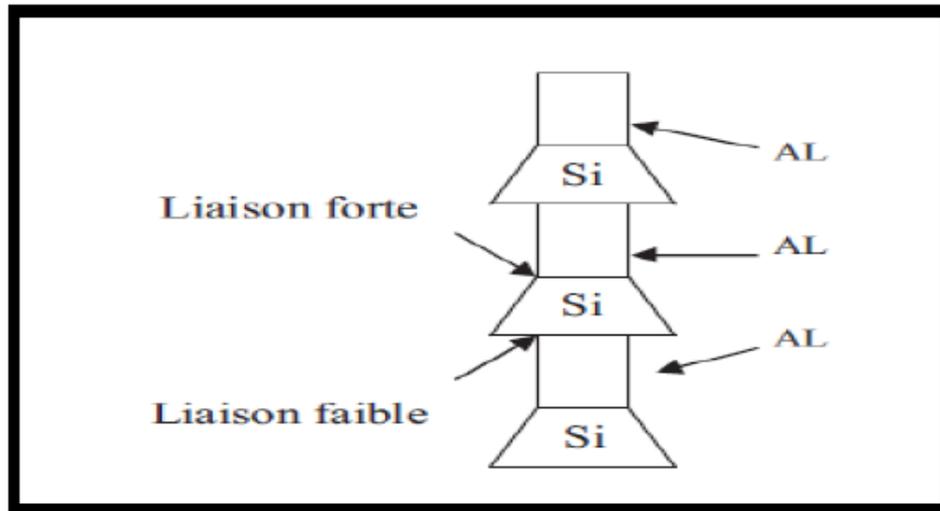


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-3**Structure de la kaolinite. (Oudni, 2017-2018)**

- L'illite de l'altération des roches magmatiques et métamorphiques, est une autre composante importante des sols argileux, elle a une structure analogue à la montmorillonite mais il y a des ions de potassium intercalés entre les feuillets tétraédriques. Grâce à ces ions la liaison est relativement forte et les molécules d'eau ne peuvent pratiquement plus s'intercaler. Aux extrémités de la particule d'argile, il y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations. Ces cations dits échangeables jouent un rôle important dans le comportement des argiles. (**Fig.1.4**)

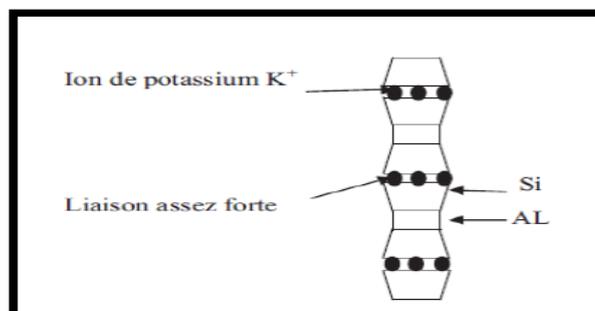


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. -4**Structure d'illite (Oudni, 2017-2018)**

- Les smectites de l'altération des roches volcaniques, parfois appelée montmorillonite, est un Minéral argileux important composé de deux feuillets de Silice et d'un feuillet d'Alumine (Gibbsite). Les feuillets en octaèdres se trouvent entre deux feuillets de Silice et les sommets des tétraèdres se confondent avec les hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former qu'une seule couche. Les sols qui contiennent de la montmorillonite peuvent être gonflants lorsque leur Teneur en eau augmente, les pressions de gonflements qui en résultent peuvent facilement causer des dommages aux structures légères et pavages.

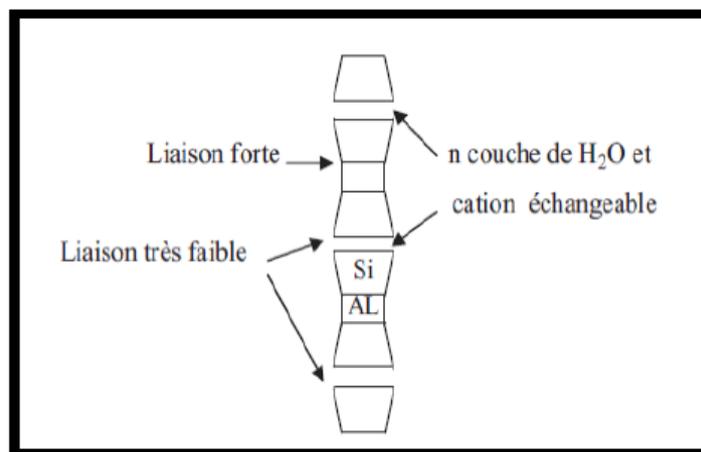


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. -5**Structure de la montmorillonite (Oudni, 2017-2018)**

- Les attapulgites et sépiolites (argiles fibreuses) sont associés à des dépôts lagunaires. Ces différentes familles d'argile, associées à d'autres minéraux d'origine détritique (quartz essentiellement) et/ou chimique (calcite, dolomite essentiellement) et à des minéraux accessoires sont les constituants principaux des sols argileux. Leurs caractéristiques mécaniques et géotechniques sont directement liées à la nature des minéraux argileux et aux transformations diagénétiques subies par la suite.

Les marnes sont des matériaux d'origine chimique, biochimique ou détritiques dont la quantité en carbonates est comprise entre 35 et 65 %. Le terme d'argile calcaire est utilisé pour un pourcentage en carbonates compris entre 5 et 35 %.

I.5.3 Etude microstructurale des argiles:

Les minéraux argileux sont des silicates hydratés appartenant au groupe des phyllo-silicatés. Ces phyllo-silicates sont formés par un empilement de feuillets, chacun étant formé par un arrangement de deux types de couches, l'une tétraédrique (T) à base de silice et l'autre octaédrique (O) à base d'hydroxyde d'aluminium.

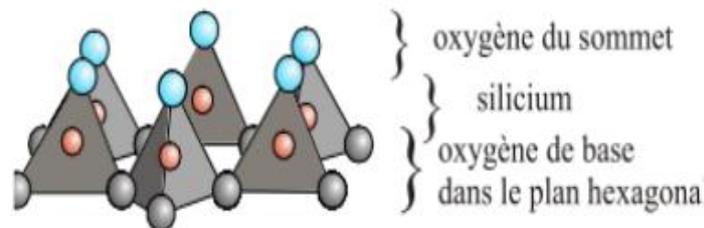


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-6**Structure du tétraèdre SiO₄, (BELABBACI, 2014)**

Les 4 atomes d'oxygène forment un tétraèdre. L'atome de silicium est au centre de cette structure. Le réseau est formé par l'arrangement hexagonal des tétraèdres. Ce motif hexagonal se reproduit à l'infini dans le plan hexagonal.

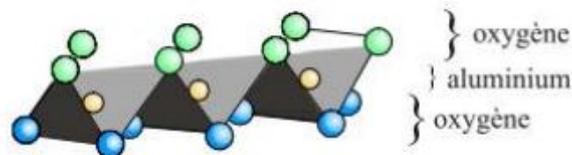


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-7**Structure de l'octaèdre Al₂O₆, (BELABBACI, 2014)**

Les six atomes d'oxygène forment un octaèdre. L'atome d'aluminium est au centre de cette structure. Le réseau est formé par l'arrangement linéaire des octaèdres. Dans chacun des feuillets décrits précédemment, les cations peuvent être remplacés par d'autres de taille voisine mais pas nécessairement de la même valence. On parle de substitution isomorphe car les dimensions du feuillet restent quasi inchangées. Ces substitutions entraînent alors un excès de charges négatives à la surface des feuillets. Cette électronégativité est une caractéristique intrinsèque des matériaux argileux.

À l'échelle microscopique des argiles, on peut distinguer :

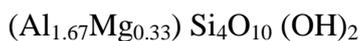
- La structure ;
- La texture.

A- Structure d'argile de type T O T :

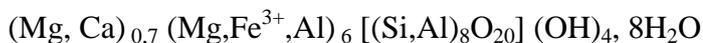
Elle correspond à une couche d'octaèdres encadrée par deux couches de tétraèdres. L'épaisseur du feuillet est de 10 Å. Les couches tétraédriques peuvent soit contenir des atomes de silicium et d'oxygène (groupe du talc), soit présenter une substitution partielle des atomes de silicium par des atomes d'aluminium. Dans ce cas, les feuillets présentent un déficit en charges positives (substitution Si^{4+} par Al^{3+}). Par compensation, des cations sont introduits au sein du réseau cristallin des phyllo-silicates.

- **Groupe de la smectite:** Une partie des atomes d'aluminium de la couche octaédrique est remplacée par des atomes de magnésium voire de fer. La compensation des charges négatives excédentaires, s'effectue par l'introduction dans l'espace inter-foliaire (espace séparant deux triplets consécutifs T O T) d'un cation (Ca^{2+} , Na^+). Ces cations inter-foliaires ont la particularité de pouvoir être solvates par des molécules d'eau qui provoquent le gonflement du cristal :

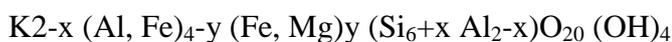
L'espace inter-foliaire passe de 14 à 17 Å en présence de Ca^{2+} et de 13 Å jusqu'à l'infini pour Na^+ . Il existe plusieurs minéraux argileux dans le groupe des smectites, entre autres, la montmorillonite



- **Groupe de la vermiculite :** Il existe des substitutions au niveau des octaèdres entre l'aluminium, le fer et le magnésium et au niveau des tétraèdres entre le silicium et l'aluminium. La minérale vermiculite a donné son nom à ce groupe.



- **Groupe de l'illite :** Un quart des atomes de silicium dans les tétraèdres est remplacé par des atomes d'aluminium. La compensation des charges négatives s'effectue par l'introduction dans l'espace inter-foliaire d'un cation : K^+ . Le cation inter-foliaire lie les feuillets les uns aux autres. Cette structure confère au cristal d'illite une plus grande rigidité que celle du cristal de kaolinite. La composition minéralogique de l'illite est :



- Structure du feuillet de la kaolinite : une couche de tétraèdres SiO_4 (T) surmontée par une couche d'octaèdres AlO_6 (O) (CABANE N. , 2004) .

- Structure du feuillet de l'illite, de la smectite et de la vermiculite : deux couches de tétraèdres SiO_4 (T) encadrant une couche d'octaèdres AlO_6 (O). Le cation inter-foliaire lie deux feuillets consécutifs.

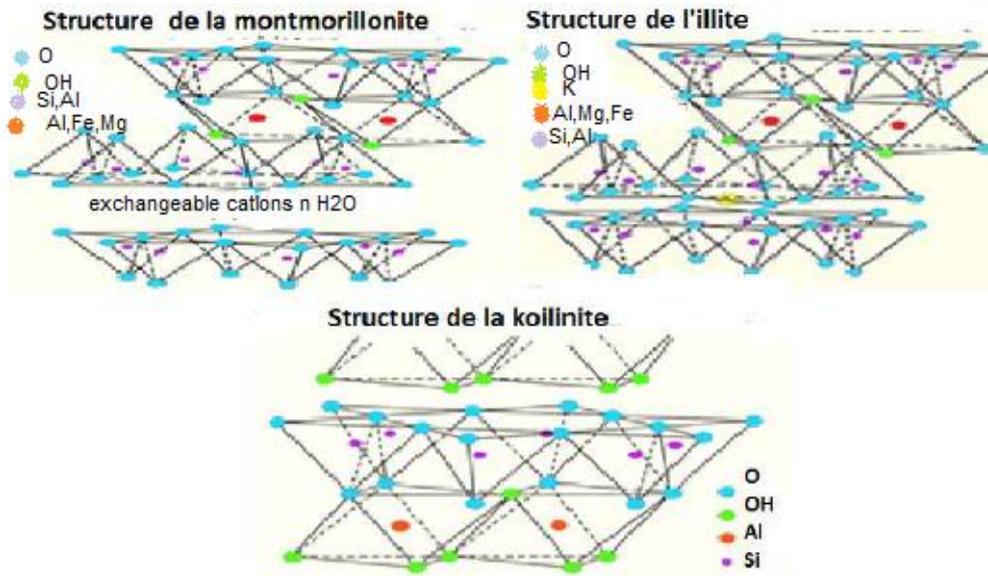


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. -8 Différentes structures des groupes des argiles (BELABBACI, 2014)

Le tableau suivant donne les différentes classifications des principaux groupes de minéraux argileux et de leurs espèces. Du fait de la substitution des ions Si^{4+} par les ions Al^{3+} dans la couche Tétraédrique (illite et beidellite) et les ions Al^{3+} par des ions de valences inférieures comme Mg^{2+} dans la couche octaédrique (montmorillonite), des charges non compensées sont produites entre les feuillets et sont responsables à 80% de la capacité d'échange cationique (CEC). L'équilibre des charges n'est pas atteint et la neutralité électrique sera alors assurée par des cations compensateurs (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) qui servent de lien entre les feuillets (AZOUZ, 2006).

L'illite et la montmorillonite ont la même structure cristalline mais elles diffèrent par le type et le nombre de substitutions. L'espace entre les feuillets est plus important chez la montmorillonite que chez l'illite où des ions K^+ plus gros se trouvent très proches des points de substitution et sont solidement insérés entre les feuillets et empêchent par conséquent le gonflement de cette argile.

Les minéraux ayant de faibles déficits de charges et des cations échangeables de valences variables ne présentent qu'une faible attraction de feuillet en feuillet, ceci facilite la pénétration des molécules H_2O entre les feuillets en les écartant.

Ainsi, les cations compensateurs sont mobilisables par des échanges réversibles avec les cations des solutions mises en contact avec l'argile.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. -2**Schéma simplifié montrant la classification des principaux de minéraux Argileux et de leurs espèces, cité par (CABANE, 2004). (BELABBACI, 2014)**

Groupe de minéraux argileux	Espace minérale	Structure T=couche de tétraèdres O=couche d'octaèdres
Kaolinites	Kaolinite, Halloysite, Diskite	Minéraux à deux couches T-O T-O
Smectites	Montmorillonite, Saponite, Beidellite, Nontronite	Minéraux à trios Couches T-O-T T-O-T
Illites, Vermiculites, micas	Illites, Vermiculites, Muscovite, Biotite	H_2O Cations
chlorites	chlorite	Minéraux à quatre couches T-O-T-O T-O-T-O
Sépiolites, playgorskites	Sépiolites, (écume de mer), Attapulgate	Minéraux en lattes <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">T-O-T</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">T-O-T</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">T-O-T</div> </div>

B- Texture des argiles :

La texture des minéraux argileux dépend du mode de sédimentation et de l'état de consolidation. Une roche argileuse qui présente une organisation serrée et orientée des particules d'argiles n'a pas le même gonflement qu'un sol argileux dont la sédimentation a été rapide et récente et pour lequel la distance entre les plaquettes est maximale. Cette organisation des minéraux argileux est la principale cause du gonflement anisotrope.

Les matériaux argileux ne sont pas uniquement composés des argiles. Au sein de la fraction argileuse, plusieurs types de minéraux peuvent coexister. La texture des matériaux argileux se superpose donc aux organisations des autres minéraux non argileux. Cette hétérogénéité rend la structure et la texture extrêmement complexes, surtout lorsque les minéraux argileux sont cimentés par d'autres minéraux carbonatés.

Les observations microscopiques effectuées par MONTES et al, cité par (AZZOUZ, 2006)

sur les argilites, subissant des cycles d'humidification dessiccation, confirment des fracturations le long des surfaces localisées à proximité des matériaux rigides non gonflants.

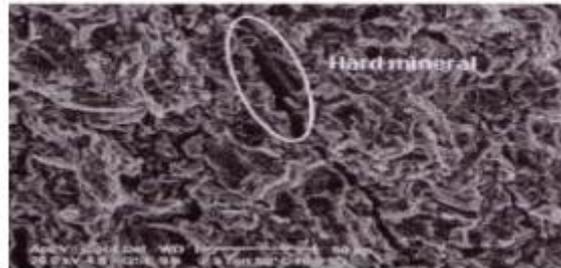


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-9 Ouverture des fissures en proximité des matériaux rigides, (BELABBACI, 2014)

L'évolution de la micro-texture en fonction de l'hydratation peut être observée à l'aide du Microscope Electronique à Balayage (M.E.B.) ou de la tomographie à rayons X.

La figure ci-dessus présente des images de ces argiles prises au microscope électronique à balayage. Les observations au microscope électronique à balayage permettant d'analyser l'évolution de la texture au cours du gonflement montrent que, pour la kaolinite, le gonflement est uniquement de type inter-agrégats, au niveau des pores interstitiels alors que pour les smectite, le gonflement est de type intra-agrégats, c'est-à-dire entre les feuillets. Ces observations microscopiques confirment

Une nouvelle organisation des feuillets argileux qui se manifeste par un écartement parallèle observable dans le cas des roches argileuses ou par un effet combiné d'un écartement et d'une rotation comme c'est le cas pour les sols argileux non indurés. Globalement, le pourcentage en minéraux gonflants, les carbonates, les minéraux non gonflants d'une part, et la nature de la consolidation d'autre part, présentent une influence notable sur le gonflement, le retrait et le changement des propriétés mécaniques.

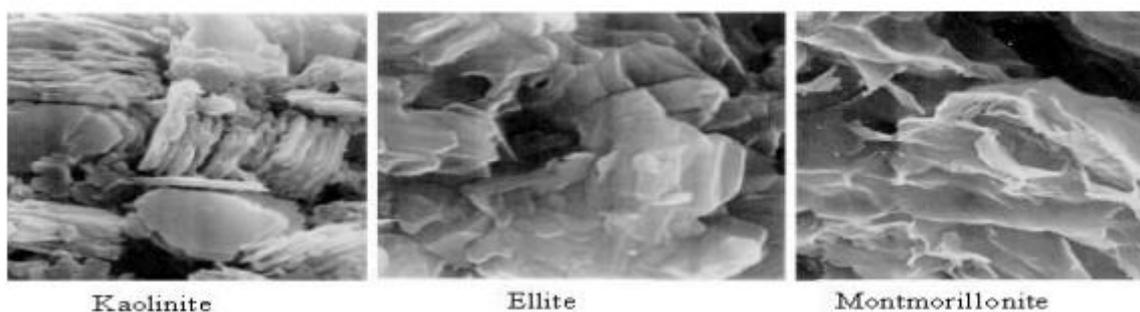


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-10 Photographies au microscope électronique à balayage des argiles, (BELABBACI, 2014)

I.5.4 Principales caractéristiques des minéraux argileux

Les principales caractéristiques des minéraux argileux qui influencent le gonflement sont les suivantes :

i - Densité de charge spécifique :

σ Est égale au rapport entre la capacité d'échange cationique, CEC et la surface spécifique S de la particule argileuse :

$$\sigma \left(\frac{m_{eq}}{m^2} \right) = CEC / S$$

I -7

Deux types de charge existent dans les milieux argileux :

- Une charge permanente ou structurelle liée aux substitutions ioniques (Al^{3+} pour Si^{4+} dans la couche tétraédrique; Mg^{2+} ou Fe^{2+} pour Al^{3+} dans la couche octaédrique),
- Une charge de surface variable selon le PH du milieu liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux. (ALLAM.O, 2011) .

ii - Capacité d'échange cationique (CEC) :

La mesure de la capacité d'une argile échangée des cations est exprimée en milli équivalent par 100 grammes d'argiles et varie dans le même sens que la densité de charge surfacique. Donc, pour les argiles ayant une valeur élevée de CEC, elles ont tendance à peu gonfler.

iii -La surface spécifique :

Les argiles sont composées de la surface externe comprise entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace inter-foliaire. Les principales caractéristiques des trois types d'argiles sont résumées dans le tableau suivant

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-3Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux, cité par (CABANE, 2004) (BELABBACI, 2014)

Minéraux	Surface interne (m ² /g)	Surface externe (m ² /g)	Surface totale (m ² /g)	CEC (milliéquivalent/ 100g)
Kaolinite	0	10-30	10-30	5-15
Illite	20-55	80-120	100-175	10-40
Montmorillonite	600-700	80	700-800	80-150
Vermiculite	700	40-70	760	100-150
Chlorite	---	100-175	100-175	10-40

I.5.5 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.

I.5.6 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 chimiques dans une solution. visibles ou non, et de formes diverses.

I.6 Quelques cas pathologiques:

Les désordres provoqués par le gonflement affectent généralement les constructions apportant de faible contrainte sur le sol support. La pathologie dépend du type d'ouvrage. Les phénomènes de retrait et de gonflement de certains sols argileux ont été observés depuis longtemps dans

Les pays à climat aride et semi-aride où ils sont à l'origine de nombreux dégâts causés tant aux bâtiments qu'aux réseaux et voiries.

I.6.1 Cas des bâtiments:

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

- Fissuration des structures.
- Distorsion des ouvertures.
- Rupture des canalisations.
- Décollement des bâtiments

I.6.2 Cas des chaussées :

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Ce phénomène est causé par des variations de la teneur en eau du sous-sol. Il peut être attribué au climat et à la surcharge. Le désordre subis par la chaussée se résume généralement à des fissures qui apparaissent à la fin de la saison sèche sur ses accotements. En saison de pluie ces fissures permettent à l'eau de s'infiltrer plus facilement entraînant la saturation de ces zones et par conséquent leur gonflement, engendrant ainsi l'apparition de déformation à la surface de la chaussée, puis l'apparition de fissures longitudinales qui peuvent être assimilées à la chute de la portance dans les zones latérales de la chaussée entraînant l'affaissement des

bords. Ces phénomènes sont accélérés par le flux routier. Ces désordres s'amplifient avec le début de la saison.

I.7 Quelques Techniques d'amélioration des sols

Lorsque les sols posent des problèmes de tassements, de portance ou de liquéfaction pour un ouvrage, les améliorations et les renforcements du sol sont en général la première option à étudier, car ils peuvent permettre de préserver le mode de fondation le plus économique et le plus simple à mettre en œuvre, à savoir les fondations superficielles.

Il existe plusieurs techniques servant de valoriser les sols présentant des mauvaises caractéristiques géotechniques. Ces différentes techniques d'amélioration permettent d'augmenter la densité du sol, de diminuer ou augmenter la perméabilité, de réduire la compressibilité, de minimiser la sensibilité à l'eau, de modifier la fraction argileuse, ou de changer le comportement du sol par traitement. Il s'agit de la stabilisation:

- par le **remplacement** du sol (remplacement du mauvais sol par le bon)
- **mécanique** (compactage de surface, compactage dynamique, vibro-compactage...etc.)
- **hydrodynamique** (pré-chargement ou pré-compression, accélération de la consolidation par les drains verticaux...etc.) ;
- **thermique** (congélation, cuisson...etc.).
- **chimique** (ajouts de produits minéraux: chaux, ciment, pouzzolane naturelle, fumé de silice, cendres volantes, laitier...etc.) ;
- par **renforcement** du sol (terre renforcé, matériaux synthétiques...etc.) ;
- par **substitution** ou inclusion souples constituées de gravier (colonnes ballastées, inclusion solide...etc.) ;
- **hydraulique** (drainage, rabattement de la nappe...etc.)
- **électrique** (électro-osmose, électrochimie...etc.).

I.7.1 Amélioration par remplacement du sol

D'après (Gaafer, 2015), le remplacement du sol est l'une des méthodes les plus anciennes et les plus simples qui améliorent les conditions du sol support. Le sol support peut être amélioré par le remplacement des sols médiocres (les sols organiques et argiles molles) avec des matériaux de capacité portante élevée tels que les sables, les graviers ou de pierres concassées. Cependant, certains sols sont plus difficiles à compacter que d'autres, lorsqu'ils sont utilisés en tant qu'une couche de remplacement. Le

tassement vertical diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche de remplacement. D'ailleurs, (Gabr, 2012) avait observé que l'utilisation du sol de remplacement peut réduire considérablement les tassements ainsi que les coûts de construction. Pratiquement, l'utilisation du sol de remplacement sous une fondation superficielle est facile et peut être aussi une solution moins chère par rapport à son utilisation sous une fondation profonde.

I.7.2 Compactage de surface

Le compactage est la densification des sols par application d'énergie mécanique en vue d'améliorer les propriétés géotechniques des sols. La densité obtenue après compactage dépend de la teneur en eau du sol. En effet, la masse volumique sèche du sol augmente avec la teneur en eau jusqu'à un optimum, puis elle décroît avec l'augmentation de la teneur en eau. Donc il est important de déterminer cet optimum pour obtenir des sols suffisamment denses.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-11 **Stabilisation par compactage de surface (Cas d'une digue de barrage en terre de Kef-Eddir construit à Tipaza en 2009, Algérie) (Gadouri, 2017)**

La technique du compactage est fonction de quatre paramètres essentiels : (l'énergie et le mode de compactage, la masse volumique du sol sec, la teneur en eau et le type du sol), elle sert à :

- Augmenter la densité jusqu'à l'optimum ;
- Améliorer la résistance donc la capacité portante du sol ;
- Diminuer la déformabilité ainsi qu'une réduction de la perméabilité ;
- Réduire ou éliminer les risques de tassement ;
- Augmenter la stabilité des talus ;
- Prévenir la liquéfaction des sols ;



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-12**Compactage de surface aux références de compactages d'une chaussée routière.**

La quantification de la masse de l'eau et du sol à utiliser dans un ouvrage de remblai (digue de barrage, voies routières ou ferroviaires, etc.) peut se faire par rapport aux références de compactage [densité sèche maximale (équation I -8) et Teneur en eau optimale (équation I -9)] déterminées au niveau du laboratoire par l'essai de Proctor modifier(PM) à savoir :

$$\gamma_{dmax} = \frac{P_s}{V} \quad \text{I -8}$$

$$W_{opt} = \frac{P_w}{P_s} \quad \text{I -9}$$

Où :

W_{opt} : Teneur en eau optimale (%)

γ_{dmax} : Densité sèche maximale (kN/m^3)

P_s : Poids des grains solides du matériau à utiliser comme remblai (kN puis doit être converti en Kg ou en tonne)

P_w : Poids de l'eau à utiliser dans le chantier pour l'arrosage du remblai (kN puis doit être converti en mètre cube d'eau)

V : Volume du sol dont on a besoin sur le chantier (m^3)

Remarque :

Les paramètres V , W_{opt} , et γ_{dmax} sont connus, donc on pourra calculer la masse du sol (P_s) et la quantité de l'eau (P_w) qui correspond aux références de compactage.

La vérification des quantités du sol (P_s) et de l'eau (P_w) peut se faire par l'utilisation des équations suivantes (équations I -10, I -11 et I -12):

$$Ph = P_s + P_w \quad \text{I -10}$$

$$\gamma h = \frac{Ph}{V} \quad \text{I -11}$$

$$\gamma_{dmax} = \frac{\gamma h}{1 + W_{opt}} \quad \text{I -12}$$

Où :

Ph : Poids humide du matériau à utiliser comme remblai (kN)

γ_{dmax} : Poids volumique humide du matériau à utiliser comme remblai (kN/m^3).

I.7.3 Compactage dynamique

Le compactage dynamique permet de densifier les sols à grande profondeur sous l'effet d'impacts de forte énergie obtenus par la chute d'une masse sur la surface à compacter. Le principe de base consiste à transmettre des chocs de forte énergie à la surface d'un sol initialement compressible et de faible portance afin d'en améliorer en profondeur les caractéristiques mécaniques.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-13 **Densification d'un terrain par compactage dynamique à très haute énergie (4000 T.m) (Cas réel de l'aéroport de Nice 1978, France). (Gadouri, 2017)**

En pratique, la technique consiste à laisser tomber en chute libre, d'une hauteur de 10 à 30 mètres, une masse pesante de 10 à 35 tonnes, ou voire plus (**fig1.13**). Les impacts sont répétés selon un maillage défini en fonction du site à traiter et du futur ouvrage (**fig1.14**). Les paramètres du compactage, à savoir

l'espacement entre les impacts, le nombre de coups par impact, le nombre de passes de compactage...etc., sont déterminés sur site en fonction de différents essais de contrôle (mesures de tassements, contrôles des caractéristiques mécaniques du sol par essais in situ et même de laboratoire, etc.).

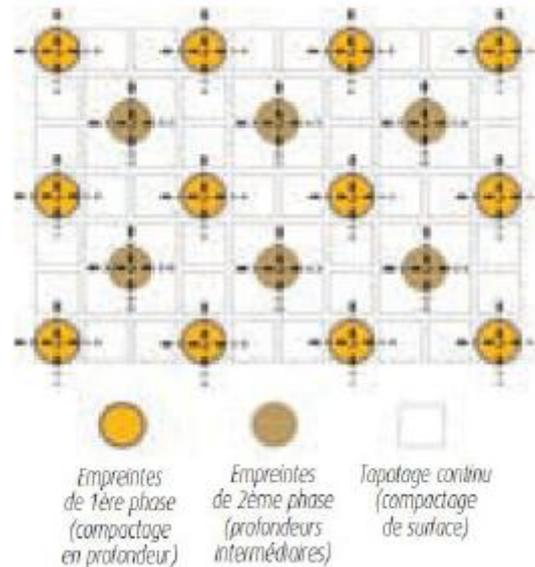


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-14 **Maillage du compactage dynamique**

Lors du compactage, on distingue un effet immédiat qui est prépondérant dans la plupart des applications pratiques. Il s'agit d'une réduction immédiate de l'indice des vides du sol traduite par le tassement du terrain et d'une augmentation de la pression interstitielle durant l'impact qui peut aller jusqu'à la liquéfaction locale du sol. Celle-ci est suivie par une phase de dissipation progressive de la surpression interstitielle et par la restructuration du matériau en un état plus dense.

Cette technique présente plusieurs champs d'applications à savoir:

- traitement sous bâtiments industriels, plate-forme portuaires et aéroportuaires, remblais routiers et ferroviaires...etc. ;
- bien adaptée pour les ouvrages de grande surface par sa très grande vitesse d'exécution ;
- bien adaptée et couramment utilisée pour réduire, ou voire éliminer, le risque de la liquéfaction La profondeur efficace du traitement (**Tableau I -4**) dépend de l'énergie unitaire du compactage calculée par l'équation suivante :

$$Eu = W * H$$

I -13

Où :

Eu : énergie unitaire (T.m)

W : Poids de la masse (t)

H : Hauteur de chute (m)

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-4 **Profondeur efficace du traitement fonction de l'énergie unitaire du compactage (Jean-Pierre Magnan, 2010).**

Energie unitaire (T.m) = Poids de la masse * Hauteur de chute	Profondeur efficace du traitement (m)
200	5/6
300	7/8
400	9/10
600	11/12

I.7.4 Vibro-compactage

La technique du vibro-compactage (ou compactage par résonance vibratoire ou compactage du sol in-situ sous l'effet des vibrations) consiste en la vibration de profilés spécialement développés à l'aide de vibreurs verticaux fortement puissants à fréquence variable, installés et adéquatement fixés à la tête du profilé.

- Domaine de profondeur : 3 m à 65 m
- Maille de traitement : 2,0 m à 5,5 m
- Densité relative atteinte : $D_r = 60\%$ à 80%



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-15 **Densification par vibro-compactage (Cas d'un sable lâche ayant 5m d'épaisseur d'un hall industriel construit en Belgique).** (Gadouri, 2017)

I.7.5 Pré-chargement ou Pré-compression

La technique de pré-compression ou de pré-chargement est tout simplement de placer une surcharge en supplément au-dessus du sol qui nécessite un grand tassement de consolidation qui doit avoir lieu avant que la construction soit réalisée.

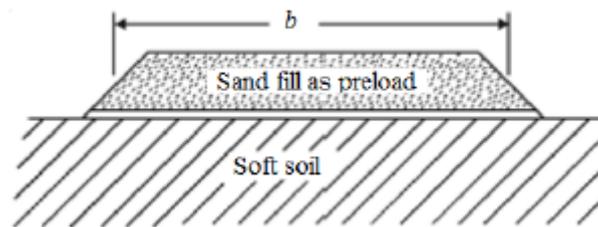


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-16Amélioration d'un sol mou par la technique de pré-chargement (Gadouri, 2017)

I.7.6 Accélération de la consolidation par les drains verticaux

Les drains verticaux est une technique où les drains sont installés sous une charge en supplément pour accélérer le drainage des sols relativement imperméables et d'accélérer ainsi la consolidation. Ces drains fournissent un chemin plus court pour l'eau de circuler à travers le sol. Ainsi, le temps de drainage des couches d'argile peut être réduit de plusieurs années à quelques mois. Les types courants de drains verticaux sont des drains de sable et des drains verticaux préfabriqués (Gaafer, 2015).

Les drains de sable sont construits en perçant des trous à travers la couche d'argile à l'aide d'un forage rotatif ou de tarière continue dans le sol. Les trous sont ensuite remplis de sable. Quand un supplément de surcharge est appliqué à la surface du sol, la pression de l'eau interstitielle dans l'argile va augmenter, et elle sera dissipée par le drainage dans les deux directions verticales et horizontales. Le tassement est alors accéléré.

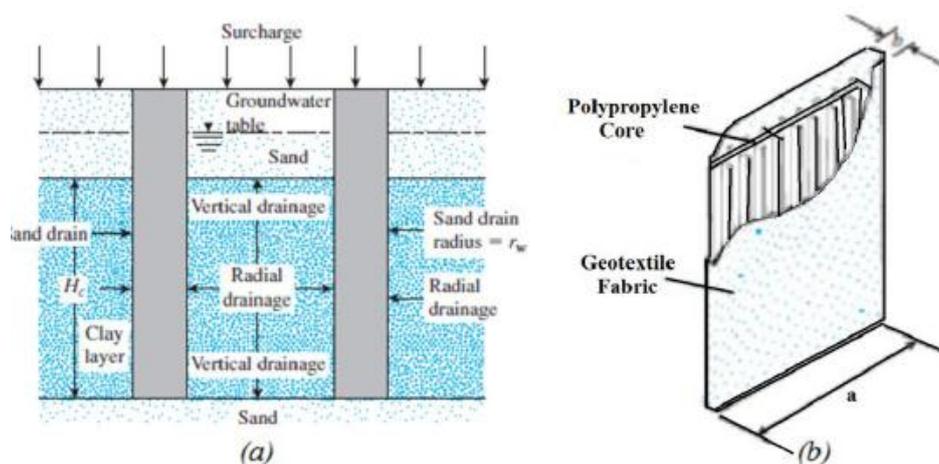


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-17Amélioration des mous par la technique de l'Accélération de la consolidation par les drains verticaux, (a): drains de sable verticaux, (b): drains verticaux préfabriqués (Gadouri, 2017).

I.7.7 Inclusion rigide :

Le procédé de renforcement de sol par inclusions rigides associe un réseau d'inclusions rigides

verticales non armées et un matelas intercalaire situé entre les têtes d'inclusions et l'ouvrage. Contrairement aux pieux, ce procédé se caractérise par l'absence de liaison structurelle entre les ouvrages et les inclusions.

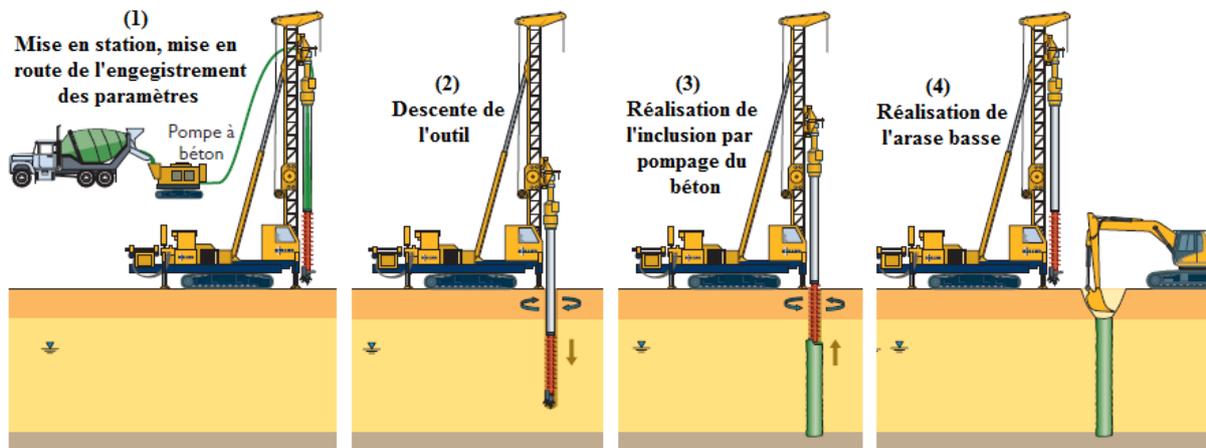


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. -18**Principe de renforcement des sols compressibles par inclusion rigide. (Gadouri, 2017)**

Le traitement par jet grouting conduit à réaliser des éléments rigides d'un mélange de sol ciment, dont la mise en œuvre fait appel à trois phénomènes distincts intervenant indépendamment ou en combinaison :

- une déstructuration des terrains en place sous un jet à très grande vitesse ;
- une extraction d'une partie des éléments constitutifs du sol en place, addition de coulis ;
- une incorporation de matériaux d'apport sous la forme d'un jet de coulis de composition adaptée à la résistance recherchée.

Le sol hors colonne ne subit pas ou peu d'amélioration. Cette méthode d'injection se distingue donc fondamentalement des injections classiques. Le jet grouting permet de remplir des fonctions d'étanchéité.

I.7.8 Colonnes ballastées

Le but de toute réalisation de colonnes ballastées est de conférer au sol de nouvelles caractéristiques, générales et/ou locales sous l'ouvrage à construire, afin que les différents éléments d'infrastructure de celui-ci (semelles isolées ou filantes, radiers, dallages, ouvrages en terre,...) aient un comportement prévisible, justifiable et compatible avec les règlements et tolérances s'appliquant à la structure de l'ouvrage et à son exploitation. Le traitement d'un sol par colonnes ballastées conjugue les actions suivantes :

- augmenter la capacité portante du sol ;
- diminuer les tassements totaux et différentiels ;

- diminuer le temps de consolidation par création d'éléments drainant ;
- diminuer les risques induits par les phénomènes de liquéfaction lors des séismes.

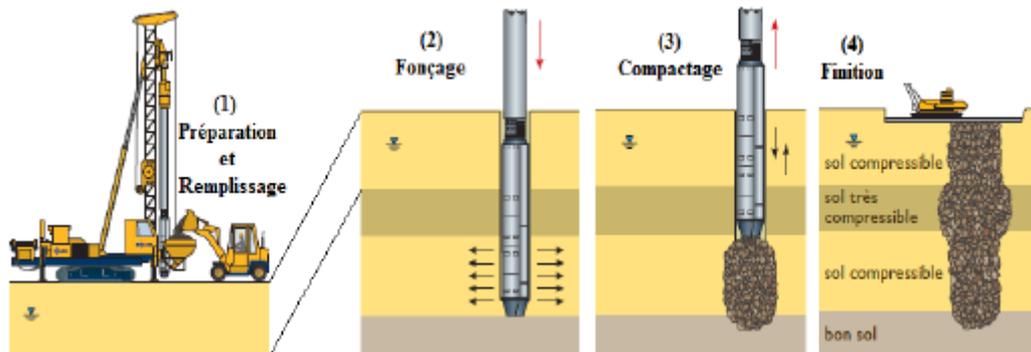


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-19 **Principe de renforcement des sols par colonnes ballastées.** (Gadouri, 2017)

I.7.9 Méthodes chimiques

Le traitement des sols à la chaux est un exemple typique de la méthode chimique pour améliorer des propriétés physico-mécaniques du sol. Le principe de la technique se base sur le processus physico-chimique de la réaction entre la chaux ajoutée et les minéraux argileux dans le sol traité qui conduit aux effets à court-terme (amélioration) et à long-terme (stabilisation) sur le sol.

Généralement, les sols qui sont candidats pour le traitement à la chaux disposaient d'une fraction minimale à 75_ m de 25% et leur indice de plasticité supérieure à 10.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé plusieurs techniques de traitements et de renforcement des sols à savoir : traitement mécanique (compactage dynamique, compactage de surface...etc.), traitement physique par congélation, traitement hydrodynamique par drainage, traitement chimique par l'addition des additifs...etc.

En effet, le traitement à la chaux est l'une des techniques les plus utilisées pour améliorer les propriétés mécaniques des sols argileux en génie civil (construction de routes, construction ferroviaires et aéroports) par l'addition de la chaux.

De nombreuses études montrent que le traitement à la chaux peut modifier significativement les propriétés physiques et hydromécaniques des sols compactés comme la réduction de potentiel du gonflement, L'augmentation de la résistance au cisaillement, l'augmentation de module d'élasticité et la modification des propriétés de compactage.

Chapitre II

*Les éléments perturbateurs et
leurs effets sur les sols
améliorés à la chaux*

II.1 Introduction

Plusieurs techniques ont été présentées dans le chapitre précédent, donc on s'intéresse maintenant sur la méthode du traitement des sols par des méthodes chimiques on utilisant les additifs.

Dans ce chapitre on va développer deux parties.

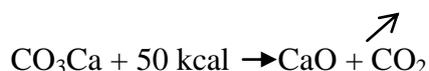
La première consacrée pour la présentation des différents additifs minéraux utilisés dans le traitement des sols et également les différents éléments perturbateurs de traitement, puis nous allons présenter les différents effets apporter par les additifs minéraux et les éléments perturbateur sur les sols.

II.2 Les produits de traitement (les additifs)

Ce sont les chaux aériennes principalement calciques (l'utilisation de chaux aériennes magnésiennes peut éventuellement être envisagée, mais l'efficacité de ces chaux est moindre que celle des chaux calciques en raison de leur faible réactivité. Par ailleurs, il est possible que, dans le cas de fortes cadences de mise en œuvre, ce retard d'hydratation puisse, pour les moins réactives d'entre elles, être à l'origine de gonflement différé. Les chaux hydrauliques sont quant à elles, à considérer en tant que liants hydrauliques mais leur utilisation en traitement de sil n'a pas jusqu'à présent été significativement développée), et les liants hydrauliques.

II.2.1 La chaux aérienne

Elle est obtenue par décarbonatation du calcaire (CO_3Ca) à une température d'environ 900°C suivant la réaction:



La réaction étant réversible, la chaux vive produite peut, après hydratation par l'humidité ambiante, se décarbonater lentement sous l'action du CO_2 atmosphérique avec formation d'une prise à l'air d'où la qualification de chaux aérienne «par opposition à chaux hydraulique».

La chaux aérienne peut exister sous trois formes : chaux vive, chaux éteinte, lait de chaux, chacune d'entre elles présentant avec les sols des interactions spécifiques.

Des indications complémentaires concernant le mode de fabrication l'implantation en France des unités de production, les caractéristiques et usage des différents chaux.

Les caractéristiques importantes des chaux aériennes vis-à-vis du traitement des sols sont:

- La forme sous laquelle elle est utilisée : chaux vive, chaux éteinte ou lait de chaux
- Sa teneur en chaux libre : exprimée sous la forme de CaO
- Sa granularité : définie à partir de ses tamisats à 2, 0,2 et 0,08 millimètre
- Sa réactivité : cette caractéristique est déterminée par l'essai dit (de réactivité à l'eau) réaliser selon la norme NF P 98-102. Elle représente la vitesse d'hydratation de la chaux vive et peut s'interpréter comme un test global de la qualité de la chaux, car elle prend en compte à la fois la qualité de la cuisson, le taux de chaux libre et la finesse de broyage. Elle présente donc un intérêt pratique indéniable et ceci d'autant plus que l'essai est simple et rapide. Son application est cependant limitée à la chaux vive, évidemment.

La norme NF P 98-101 (dans l'attente d'une norme EN actuellement en préparation) précise les valeurs des caractéristiques devant être respectées par les chaux aériennes utilisables en technique routière.

II.2.2 Les ciments

Ce sont des liants hydrauliques conformes aux normes NF P 15-300 et NF P 15-301. Les ciments sont constitués généralement d'une proportion plus ou moins importante de clinker portland (appellation courante : clinker) et de différents autres constituants.

Le clinker est obtenu par cuisson, aux environs de 1450°C, d'un mélange dénommé (cru) composé d'environ 80 % de calcaire et de 20% d'argile. Au cours de la cuisson, le cru est tout d'abord déshydraté (jusqu'à 550°C) puis décarbonaté (de 550 à 900°C) et enfin clinkerisé (de 900 jusqu'à 1450°C). Au terme de la clinkerisation qui a produit une fusion partielle du cru, ce dernier est transformé en silico-aluminates et Ferro-aluminates de calcium anhydre, facilement solubles dans l'eau.

Après refroidissement, et ajout des éventuels constituants d'apport, le mélange est finement broyé et homogénéisé (D_{max} des grains inférieur à 0,08 mm, surface spécifique (Blaine) comprise entre 2800 et 5000 cm^2/g). Le produit final est composé de constituantes qui, en présence d'eau, se dissolvent quasi instantanément avec formation de précipités de gel de silicate et de Ferro-aluminates de calcium. Ce gel s'hydrate progressivement et se transforme en espèces cristallines rigides, résistantes, insolubles et stables, qui agglomèrent les éléments grenus du sol.

Les constituants ajoutés au clinker au moment du broyage sont notamment : des laitiers de hauts-fourneaux, des pouzzolanes, des cendres volantes des centrales thermiques fonctionnant au charbon,

des fumées de silice etc. ainsi qu'une proportion de l'ordre de 3% de gypse destiné à régulariser la cinétique de la prise hydraulique.

Une préoccupation essentielle dans la fabrication des ciments et la recherche du la plus grande homogénéité-dans la fabrication du cru tout d'abord, puis dans celle de l'ajout des différents autres constituants qui s'opère lors du broyage.

II.3 Les éléments perturbateurs

II.3.1 Définition d'un élément perturbateur

Un élément perturbateur peut être défini comme un parasite qui induit des effets néfastes (indésirables) pendant et après le traitement du sol. Dans certains cas, cet élément perturbateur importe des effets bénéfiques pour les sols. Les composés suivants sont liés à la perturbation : les matières organiques, la microstructure, les composés soufrés et les sulfates solubilisés, les phosphates, les nitrates, les chlorures, la nature des ajouts utilisés (chaux, ciment, pouzzolane naturelle ou artificielle, cendres volantes, fumée de silice...etc. Le LCPC-SETRA. (2000). Il existe aussi des éléments d'origine pétrolière comme l'essence, gaz pétrolier liquéfiée, l'huile moteur, kérosène ...etc.

II.3.1.1 Les sulfates

Les sulfates sont des sels de l'acide sulfurique, les sulfates proviennent généralement de la dégradation chimique de la pyrite (FeS_2) ou du gypse($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) d'eaux souterraines et d'embruns marins. Le sulfate de potassium (K_2SO_4) est aussi présent dans l'engrais, le fumier et/ou le pesticide (Pansu et Gautheyrou .2003).

Les sulfates existent à l'état naturel dans de nombreux minéraux, dont la Pyrite ($BaSO_4$), l'epsomite ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$). Les sulfates de sodium, de potassium et de magnésium sont tous hydrosolubles, alors que les Sulfates de calcium, de baryum et des métaux lourds ne le sont pas. Les Sulfates dissous peuvent être réduits en sulfures, qui se volatilisent dans l'air sulfures D'hydrogène, ou sont précipités sous forme d'un sel insoluble ou incorporés dans le Organismes vivants. (Delisle, 1977) Des sulfates sont rejetés dans l'environnement aquatique avec Les déchets des industries qui emploient des sulfates et de l'acide sulfurique, comme Les industries minières et les fonderies. Aussi le sulfate est identifié comme cause de gonflement et de fissuration.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. -**1sulfure**

II.3.1.2 Les nitrates

Les nitrates sont des composés chimiques naturellement présents dans l'environnement. Ils Proviennent de la fixation de l'azote atmosphérique et de la décomposition de matière Organique par des microorganismes. On les trouve ainsi, à l'état naturel, à de faibles Concentrations dans les sols et dans les eaux superficielles et souterraines. Indispensables à la D'un point de vue chimique, les nitrates sont des sels minéraux de l'acide nitrique. Ils sont Très solubles dans l'eau, ne sont pas retenus par le sol et migrent vers les eaux superficielles Et sou0terraines. Ils sont ainsi présents dans les eaux de boisson et dans l'alimentation (nitrates, 2007).Substances présentes aussi à l'état naturel dans le milieu, les sources d'apport sont naturelles et intensifiées par l'usage anthropique.

II.3.1.3 La matière organique

La matière organique du sol est composée d'organismes vivants, de résidus de végétaux et d'animaux et de produits en décomposition. Il s'agit par exemple, protides, lipides et des glucides .Parmi la matière organique produite, on peut citer : les composés humiques (acides fulviques, acides humiques et humines évolués). Les acides organiques perturbent le traitement des sols. Les acides organiques (acide acétique, acides humiques, acides tanniques) empêchent la prise parce que le pH est trop faible pour former les produits cimentaires. Les huiles et le sucrose retardent la prise en enrobant les particules de ciment former les produits cimentaires. Les huiles et le sucrose retardent la prise en enrobant les particules de ciment (ralentissement de l'hydratation), et sans affecter les résistances (Tremblay et al. 2002).

II.3.1.4 Les phosphates

Les phosphates sont des sels de l'acides phosphorique, d'aspect granuleux .Le phosphore est un élément majeur de la pédosphère (1000mg/kg) dont 60% se trouve sous forme inorganique. Les teneurs en phosphate pour la plupart des sols sont de 200 à 4000mg/kg de sol sec. Le phosphate se trouve sous forme inorganique. Les teneurs en phosphate pour la plupart des sols sont de 200 à

4000mg/kg de sol sec. Le phosphate se présente sous forme d'acide phosphorique H_3PO_4 , de composés ammono-phosphatés $(NH_4)_2(HPO_4)$ et $(NH_4)_3(PO_4)$ et de superphosphates simple $Ca(H_2PO_4)_2$ ou triple $3(Ca(H_2PO_4)_2)$. Les phosphates se trouvent sous formes d'engrais et de pesticides, de détergents, d'adoucisateurs d'eau, de retardateurs d'incendie, d'additifs pour carburants, de plastiques.

Dans le ciment les résistances à la compression simple restent stables pour 0,46% de P_2O_5 . En revanche, elles diminuent de 15 à 25MPa (20 à 30%) pour 0,75 et 0,85% de P_2O_5 (Lin et al. 2009).

II.3.1.5 Kérosène

Le kérosène est un produit de distillation directe intermédiaire entre l'essence et le gazole à l'origine jusqu'au début du xx siècle le kérosène sous le nom de pétrole lampant fut la Principale utilisation du pétrole. Le kérosène est désormais surtout utilisé comme Carburéacteur. L'utilisation du pétrole lampant (éclairage) ne subsiste que dans certains Pays en développement, dans des zones où l'électricité n'est pas disponible et dans Certains cas pour la cuisine. Il se caractérise par :

Coupe du kérosène: 165 °C–240 °C, la capacité de traitement de la section du Kérosène 30000 t/an, soit 3,75 tn/h. Le kérosène est un mélange d'hydrocarbure contenant des Alcanes (C_nH_{2n+2}) de formule chimique allant de $C_{10}H_{22}$ à $C_{14}H_{30}$. Issu du raffinage de Pétrole.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. -2 Kérosène

II.3.1.6 Gaz de pétrole liquéfié (GPL)

Définition

Le GPL est un mélange gazeux composé essentiellement de butane et du propane à température ambiante et pression atmosphérique, et peut passer à l'état liquide sous Les conditions suivantes :

- Pression relevée à la température ambiante.
- Pression atmosphérique et basse température.
- Pression modérée et température pas tellement basse.

Cette propriété lui permet d'être stocké dans un volume réduit (**250 litres** de GPL Gazeux égale à un litre de GPL liquide). La composition des GPL est variable selon les normes et ses utilisations dans Différents Pays. Il peut contenir ; le **propylène, butène, une** faible quantité de **Méthane, Éthylène, Pentane**, exceptionnellement des hydrocarbures tels que le **Butadiène, L'acétylène** et le **Méthylacrylique** (HANICHI, 2005).



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-3 GPL

Caractéristique du GPL

- Densité : Dans l'état gazeux il est plus lourd que l'air : La densité du propane Est de 0.51 et celle du butane est de 0.58.
- Dilatation : à l'état liquide, il a un coefficient de dilatation dont il faut tenir Compte lors de leur stockage, car les sphères ne doivent jamais être remplies Complètement.
- Tension de vapeur : Soumis à des températures supérieures à leur point

- D'ébullition, le propane et le butane ne peuvent être amenés à l'état liquide sous

Pression ou par réfrigération .Le GPL à une tension de vapeur à 20 °C égale à :

- Pour le butane : 2 bars.
- Pour le propane : 8 bars.
- Température d'ébullition : A la pression atmosphérique, la température

D'ébullition du butane est de -0.6 °C et celle du propane est de -40 °C.

- Impuretés : Le GPL produit au niveau des différents champs doit répondre aux

Spécifications suivantes :

- Teneur en gaz sec inférieure ou égale à 3 % mol.
- Teneur en condensât inférieure ou égale à 0.4 % mol.
- Odeur et couleur : Le GPL est incolore, soit à l'état vapeur ou liquide et

Pratiquement inodore. Pour des raisons de sécurité un odorant doit être ajouté pour la

Détection des fuites. Cet odorant est à base de sulfures appelés Mercaptans.

- Toxicité : Le GPL s'enflamme dans l'air, il émet un gaz considéré comme

Toxique. Le gaz en question dénommé le monoxyde de carbone est formé suite à une

Combustion.

- Pouvoir calorifique supérieur : (KCal / Nm³)

Pcs (ic4) = 29460.

Pcs (c3) = 22506.

Pcs (nc4)=29622

II.3.1.7 Composition et combustion de l'essence

II.3.1.7.1 Composition de l'essence

Les carburants usuels n'ont pas une composition bien définie. Ce sont des mélanges d'hydrocarbures qui varient avec l'origine géographique du pétrole utilisé et les procédés de raffinage appliqués. En fait le mélange ne peut être commercialisé que s'il vérifie des contraintes très strictes sur les propriétés physiques (densité, volatilité) énergétiques (pouvoir calorique) et chimiques (indice d'octane, limitation des teneurs en certains composants).

Par exemple, pour être vendu sous l'appellation euro-super (super 95), un mélange doit avoir une densité comprise entre 0,72 et 0,78 kg/L à 15 °C et un indice d'octane (l'indice d'octane est une mesure du pouvoir anti-détonant de l'essence, c'est-à-dire sa capacité à résister à l'auto-inflammation, cette dernière pouvant diminuer les performances du moteur et même l'endommager) de 95 au moins. La composition du mélange doit vérifier une dizaine de valeurs limites. Par exemple, la quantité de benzène en volume doit être inférieure à 1 %, celle de soufre inférieure à 150 mg/kg, celle de plomb inférieure à 5 mg/L.

Les essences usuelles (super 95 et 98) et le gazole sont des mélanges de plusieurs dizaines d'hydrocarbures (alcanes linéaires et ramifiés, alcènes, aromatiques) auxquels on a ajouté des additifs qui apportent des propriétés particulières : éthers (amélioration de l'indice d'octane), détergents et surfactants (lutte contre les phénomènes d'encrassement du moteur), colorants etc. Pour déterminer les propriétés énergétiques de ces carburants, on les modélise par un « hydrocarbure moyen » : l'octane C_8H_{18} pour l'essence et le dodécane $C_{12}H_{26}$ pour le gazole.

II.3.1.7.2 Combustion de l'essence

Dans un moteur, c'est la réaction de combustion de l'essence qui dégage l'énergie nécessaire au fonctionnement. Dans le cas de l'octane, choisi pour modéliser le mélange d'hydrocarbures constitutif de l'essence, le bilan de la combustion complète par le dioxygène est le suivant :

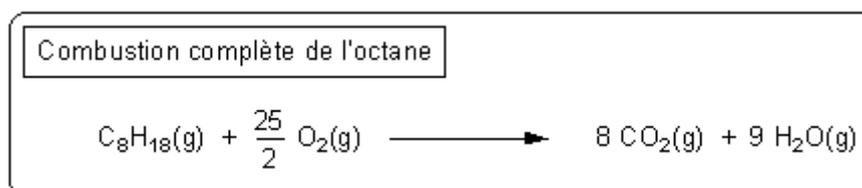
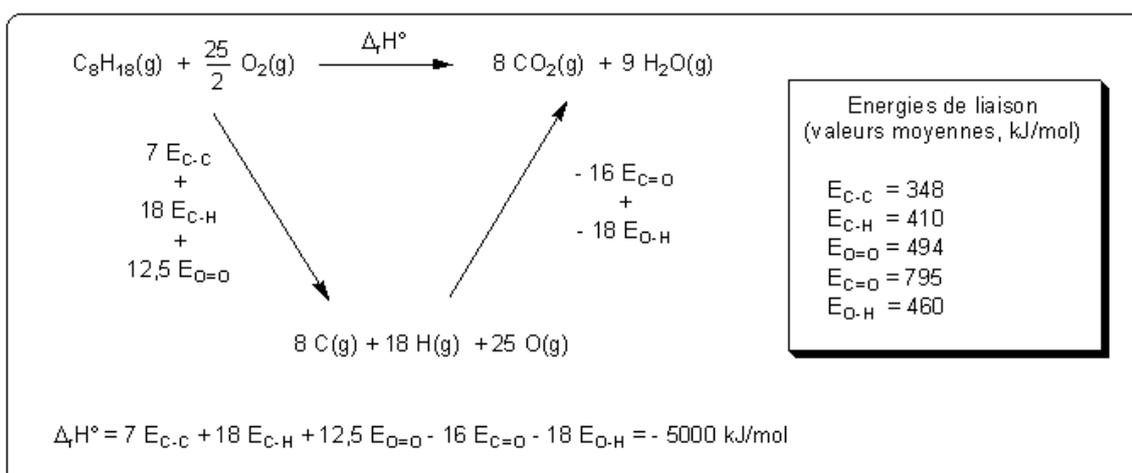


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. **-4 Equation de la combustion complète de l'octane(CultureSciences.Chimie)**

L'enthalpie standard de réaction, $\Delta_r H^\circ$, de cette combustion est de l'ordre de -5000 kJ/mol : elle est donc très exothermique. Ceci montre qu'une grande quantité d'énergie est disponible, stockée sous une forme chimique dans le carburant.

Cette énergie est libérée principalement au cours du réarrangement des liaisons chimiques. Les liaisons C-C, C-H et O=O sont brisées pour former des liaisons C=O et O-H. Le cycle thermodynamique ci-dessous permet de retrouver la valeur de $\Delta_r H^\circ$.



Dans la pratique, l'essence est caractérisée par son Pouvoir Calorifique, PC, qui est la quantité d'énergie libérée par la combustion complète d'une masse d'un kg.

$\text{PC} = -\Delta_r H^\circ / M$ où M est la masse molaire de la substance considérée. Dans le cas de l'octane, PC (octane) = 44.103 kJ/kg. On constate que cette valeur est très proche de celle obtenue expérimentalement pour les essences réelles, cela justifie a posteriori le choix de l'octane pour modéliser l'essence. Le pouvoir calorifique du gazole est légèrement inférieur à celui de l'essence. (CultureSciences.Chimie)

II.3.1.8 Huile moteur

La fonction première de l'huile moteur est de lubrifier les composantes mobiles de moteur. Une bonne lubrification permet aux différentes parties du moteur de se mouvoir les unes à côté des autres sans générer trop de frottements. En cas de frottement, le fonctionnement du moteur serait ralenti de manière spectaculaire. L'huile moteur fait aussi office de nettoyant. C'est un liquide collant qui va récupérer les petits morceaux de saletés ou la poussière qui se retrouvent dans le moteur. (auto butler.fr, 2017).

II.4 Effet de la chaux sur les propriétés physiques-mécaniques des sols argileux

II.4.1 Effet de la chaux sur la plasticité

II.4.1.1 En absence des sulfates

En absence des sulfates, l'addition de la chaux provoque une amélioration de la consistance liée à une réduction significative de l'indice de plasticité qui se traduit par une augmentation de la limite de plasticité s'accompagnent ou non d'une augmentation de la limite de liquidité. Ainsi, la surface

spécifique est réduite immédiatement après l'incorporation de la chaux à l'issue de la floculation des argiles (Al-Mukhtar, 2012).

(Kinuthia, 1999) ont montré que la limite de liquidité d'une kaolinite augmente de 60 à 73% pour l'addition de 3% de chaux et elle reste constante jusqu'à 14%, mais elle diminue graduellement au-delà de cette teneur en chaux. Cependant, la limite de plasticité continue à augmenter quel que soit la teneur en chaux. Cependant, l'indice de plasticité du sol reste toujours en diminution malgré l'augmentation de la teneur en chaux. La réduction de l'indice de plasticité est accompagnée plus souvent par l'augmentation de la limite de plasticité plutôt que la diminution de la limite de liquidité.

D'ailleurs, Sakr et al. (2009) ont indiqué que la stabilisation d'un sol argileux très organique par différents pourcentages de chaux provoque une augmentation de la limite de liquidité avec l'âge de cure (7, 15, 30 et 60 jours) qui est probablement lié au remplacement des ions de Na^+ qui se présentent dans le sol par des ions de Ca^{2+} apportés par l'addition de la chaux. Un comportement inverse a été observé par Indraratna (1996) et Jha and Sivapullaiah (2015) où la limite de liquidité des sols stabilisés diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux additionnée. (Gadouri, 2017)

D'après Locat et al. (1990), l'augmentation de la limite de plasticité s'accompagne ou non d'une augmentation de la limite de liquidité. Cette évolution provoque un déplacement du domaine de plasticité vers des teneurs en eau plus importantes. Le taux du décalage de l'indice de plasticité est lié à la quantité de chaux utilisée. L'évolution de la consistance favorise la granulation du sol lors du malaxage. Différents facteurs influencent la granulation (floculation) du sol à savoir la nature du sol, la teneur en eau et le dosage en chaux. Ce phénomène est expliqué par l'augmentation des ions Ca^{2+} et OH^- dans le sol. En effet, suite à des échanges cationiques qui se produisent alors entre les ions absorbés à la surface des particules argileuses et les cations apportés, la capacité d'échange cationique (CEC) est donc modifiée. La modification de la CEC et l'augmentation de la concentration en électrolytes ont pour effet de réduire la taille de la double couche des particules argileuses et ainsi de réduire les forces de répulsion entre elles. Celles-ci ont alors tendance à s'agréger, c'est le processus de floculation. Afès et al. (2000) ont reporté que la limite de plasticité d'une argile stabilisée par 6% de chaux augmente de 24% jusqu'à 32.4 et 34% après une cure de 7 et 30 jours, respectivement. Le même comportement a été observé par plusieurs chercheurs (**Attoh-Okine, 1995**; Bell, 1996; Okagbue and Yakubu, 2000; Yong and Ouhadi, 2007). Cela peut être expliqué par l'utilisation de la chaux qui conduit à la floculation des particules d'argiles en causant une augmentation immédiate de la limite de plasticité du sol stabilisé. De plus, l'augmentation de la

limite de plasticité provoque une réduction des propriétés plastiques du sol stabilisé. Ce la peut-être lié à l'altération du film d'eau entourant les minéraux argileux dans le sol (Osula,1991).

II.4.1.2 En présence des sulfates

En présence des sulfates, Kinuthia et al. (1999) ont étudié l'influence des sulfates monovalents (Na_2SO_4 et K_2SO_4) et divalents (CaSO_4 et MgSO_4) sur les paramètres de consistance d'une kaolinite traitée à 6% de chaux (Fig. II .4). Ils ont constaté que toutes les limites d'Atterberg varient en fonction du type et de la concentration en sulfate utilisé. De plus, les sulfates divalents présentent une variation cadencée tandis que les sulfates monovalents montrent une variation perturbée. En effet, pour des fortes concentrations, les sulfates divalents diminuent fortement la plasticité du sol stabilisé plus que les sulfates monovalents. Cependant, la réduction de la plasticité du sol stabilisé dépend de la concentration du sulfate utilisé et du type de cations qui s'attachent à l'anion sulfate (SO_4^{2-}). Un comportement similaire a été observé par Celik and Nalbantoglu (2013) où ils ont constaté que l'indice de plasticité d'un sol argileux traité avec 5% de chaux diminue de 32% à 15% en présence de 2000 ppm de sulfate de sodium alors qu'il augmente jusqu'à 34 et 38% en présence de 5000 et 10000 ppm de sulfate de sodium, respectivement.

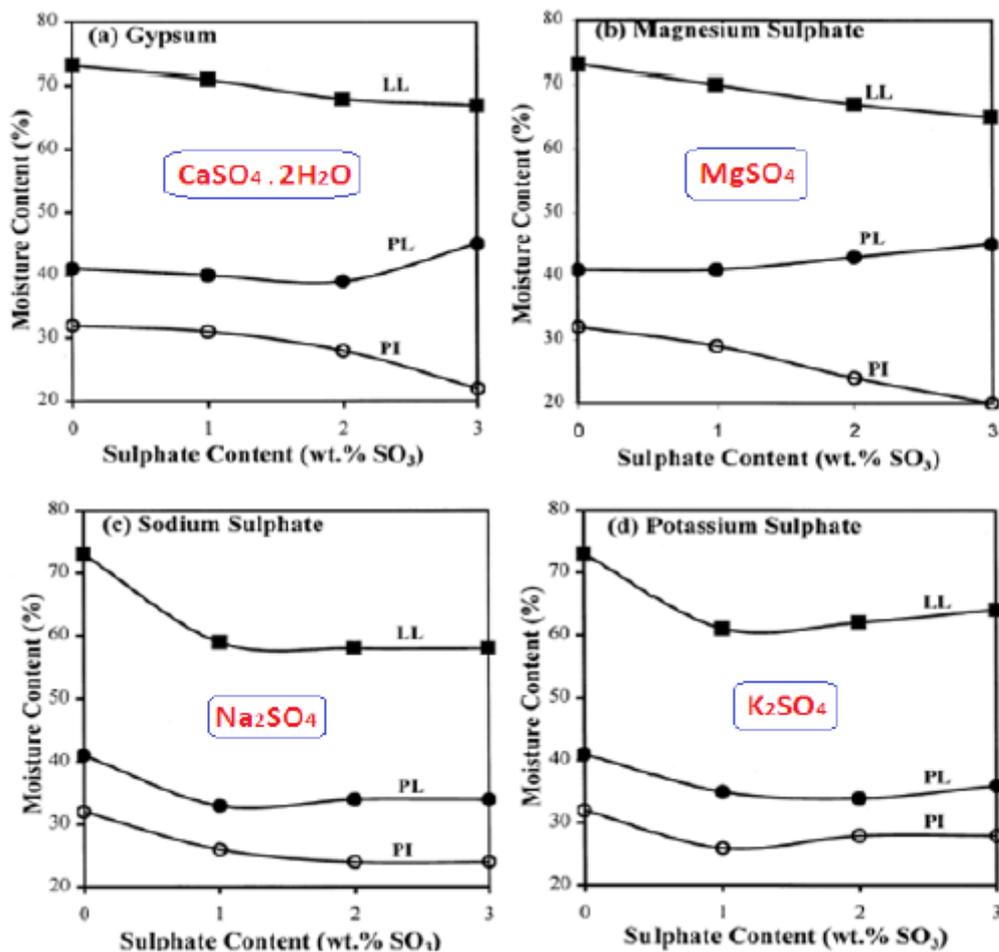


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répandant à ce style dans ce document.-5 Effet des sulfates monovalents et divalents sur les limites d'Atterberg d'une kaolinite traitée à 6% chaux, (Kinuthia et al., 1999). (Gadouri, 2017)

Sivapullaiah et al. (2000) ont étudié l'effet apporté par les différentes concentrations (0.5, 1 et 3%) d'un sulfate monovalent (Na_2SO_4) et divalent (CaSO_4) sur la limite de liquidité d'un sol montmorillonitique traitée à 6% de chaux éteinte. Les résultats obtenus ont montré que la limite de liquidité augmente avec l'augmentation de la concentration en sulfate à savoir que le sulfate de sodium a une influence considérable par rapport au sulfate de calcium (Tableau II.1). Il s'avère que le taux d'augmentation de la limite de liquidité dépend de la concentration en sulfate utilisé et du type de cation associé à l'anion sulfate. Par contre, Kinuthia et al. (1999) ont constaté que la limite de liquidité d'une kaolinite traitée avec 6% de chaux en présence des mêmes concentrations en sulfate monovalent (Na_2SO_4) décroît initialement pour une faible concentration (1%. SO_3) puis elle augmente avec son augmentation (2 et 3%. SO_3). Contrairement au sulfate divalent ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), la limite de liquidité diminue avec leur augmentation. Cela mis en évidence l'effet de la nature des minéraux argileux qui se présentent dans les sols du fait que les sols montmorillonitiques possèdent

généralement une capacité d'échange cationique (CEC) bien plus élevée que celle des sols kaoliniques.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. -**1Effet du sulfate de sodium et de calcium sur la limite de liquidité d'une montmorillonite traitée à 6% chaux, (Sivapullaiah et al., 2000).**

Nature du sol et nom du sulfate utilisé	Concentration (%)	Limite de liquidité (%)
Sol naturel (Montmorillonite)	0.0	68.0
	0.5	78.6
Sulfate monovalent (Na ₂ SO ₄)	1.0	78.9
	3.0	82.7
	0.5	70.0
Sulfate divalent (CaSO ₄)	1.0	73.0
	3.0	76.0

Yilmaz and Civelekoglu (2009) ont étudié l'effet de différents pourcentages de gypse (0, 2.5, 5, 7.5 et 10%) sur les limites d'Atterberg d'une bentonite montmorillonitique très plastique. Les résultats obtenus ont mis en évidence l'effet positif apporté par le calcium provenant de l'addition du gypse sur la plasticité de la bentonite où ils ont observé une diminution de son indice de plasticité de 186.9% à 139.5 et 120.8% pour l'addition de 2.5 et 10% de gypse, respectivement.

II.4.2 Effet de la chaux sur les caractéristiques du compactage

II.4.2.1 En absence des sulfates

En absence des sulfates, les caractéristiques de compactage contrôlent le comportement mécanique des sols tels que la perméabilité, la rigidité, la résistance, le tassement et la stabilité vis-à-vis du gonflement. Généralement, la densité obtenue après compactage dépend de la teneur en eau du sol. En effet, la densité sèche augmente avec la teneur en eau jusqu'à un optimum, puis elle décroît avec l'augmentation de la teneur en eau. Sur le chantier, il est important de connaître cet optimum pour obtenir des sols suffisamment denses. D'après Attouh-Okine (1995), l'addition de la chaux comme additif dans un traitement d'une latérite (riche en kaolinite, en oxyde de fer et d'aluminium) fait augmenter sa teneur en eau optimale et réduire sa densité sèche maximale. Les mêmes résultats ont été obtenus par plusieurs chercheurs (Ola, 1977; Rahman, 1986; George et al., 1992; Indraratna, 1996; Kinuthia et al., 1999; Gay and Schad, 2000; Kavak and Akyarli, 2007; Hossain et al., 2007; Manasseh and Olufemi, 2008; Ghobadi et al., 2014; Asgari et al., 2015; Jha and Sivapullaiah, 2015). D'une part, Les modifications apportées par l'utilisation de la chaux sont dues à la formation immédiate des produits de cimentation (Yong and Ouhadi, 2007). D'autre part, Harichane et al.

(2011c) ont indiqué que les modifications apportées sur les paramètres de compactage des sols argileux stabilisés par l'utilisation de la chaux peuvent être expliquées par:

- L'effet de la chaux qui entraîne l'agrégation des particules par le procédé complexe d'échange cationique aboutissant à une modification de la granulométrie du sol et provoquant par conséquent les particules du sol à occuper de plus grands espaces ;
- La faible densité spécifique de la chaux par rapport à celle des sols naturels testés conduit à diminuer la densité sèche maximale des sols stabilisés ;
- L'effet des réactions pouzzolaniques qui se produisent entre les particules d'argile (principalement l'alumine et la silice) et le calcium (apporté par la chaux) dans les sols sont responsables de l'augmentation de la teneur en eau optimale vu que ce processus augmente l'affinité du sol à l'eau.

II.4.2.2 En présence des sulfates

En présence des sulfates, les résultats dégagés par Kinuthia et al. (1999) ont montré que les caractéristiques de compactages de la kaolinite traitée à 6% de chaux sont négativement influées par la présence des sulfates tout en diminuant la densité sèche maximale (quel que soit la concentration et le type de cations sulfates) et en augmentant la teneur en eau optimale. En effet, les sulfates divalents influencent considérablement sur les caractéristiques de compactage que les sulfates monovalents. La (Figure II .5) indique que les sulfates divalents présentent une variation cadencée alors que les monovalents ont une variation perturbée. Le même comportement a été observé par Sivapullaiah and Jha (2014).

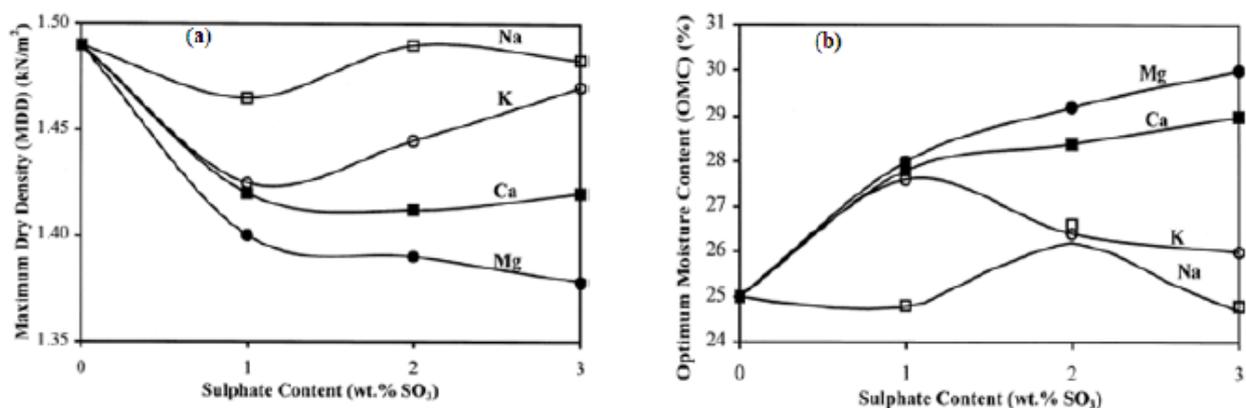


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. **-6Effet des sulfates monovalents et divalents sur les paramètres de compactage d'une kaolinite traitée à 6% de chaux, (a): la densité sèche maximale, (b): la teneur en eau optimale, (Kinuthia et al., 1999).(Gadouri, 2017)**

II.4.3 Effet de la chaux sur la résistance au cisaillement

II.4.3.1 En absence des sulfates

En absence des sulfates, Osula (1991) a reporté que les paramètres de cisaillement (C et ϕ) d'un sol de forte plasticité (Latérite) traité à différentes quantités de chaux ont été fortement modifiés. En effet, une augmentation légère marquée pour l'angle de frottement interne laquelle est accompagnée par une forte réduction de la cohésion. Ces modifications sont dues à l'action de chaux à court terme qui provoque la floculation des particules du sol stabilisé.

De plus, Muntohar and Hantoro (2000) ont montré que pour une teneur de 10 % de chaux, l'angle de frottement interne et la cohésion se sont devenus respectivement 1.7 et 1.3 fois plus grand que celui du sol non traité. L'augmentation de l'angle de frottement interne est due à la floculation des particules des sols par l'action de chaux à court terme, tandis que celle de la cohésion est attribuée à la formation des nouveaux produits de cimentation (C-S-H et C-A-H) suite à la réaction pouzzolanique de chaux qui intervient à plus long terme. Ces produits font augmenter la cohésion des particules du sol stabilisé.

D'ailleurs, Sivapullaiah et al. (2000, 2006) Ont observé que la nature minéralogique du sol traité fait influencer d'une façon significative sur les paramètres de cisaillement. En effet, l'effet apporté par l'utilisation de 6% de chaux comme additif sur les angles de frottement interne effectifs (ϕ') et les cohésions effectives (C') de deux sols argileux, à savoir une montmorillonite très plastique (IP=47.5%) et une kaolinite peu plastique (IP=22%) était fortement différent. Il s'est avéré que la période de cure joue également un rôle très important dans l'évolution des paramètres de cisaillement (Tableau II .2).

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. **-2Variation des paramètres de cisaillement effectifs (C' et ϕ') de deux sols argileux (montmorillonite et kaolinite) stabilisés avec 6% de chaux à différentes période de cure.**

Nature du sol et paramètres de cisaillement		Avant traitement	Après traitement pour différentes périodes de cure		
			7 jours	3 mois	12 mois
Montmorillonite Sivapullaiah et al., (2000)	C' (KPa)	0	73	263	263
	ϕ' (°)	27	43	41	41
Kaolinite Sivapullaiah et al.,(2006)	C' (KPa)	0	30	120 KPa à 30 j	172
	ϕ' (°)	27	34.5	35.3° à 30 j	35.3

Plusieurs travaux de recherches ont été effectués dont le but d'étudier l'effet de l'utilisation de la chaux comme stabilisant sur la résistance au cisaillement de différents types de sols (Osula,1991; Gay and Schad, 2000; Muntohar and Hantoro, 2000; Bagherpour and Choobbasti,2003). Les résultats obtenus ont montré que l'addition de la chaux comme additif améliore considérablement la résistance au cisaillement des sols stabilisés particulièrement avec la période de cure. Sivapullaiah et al. (2000) ont reporté que l'augmentation de la résistance au cisaillement est attribuée à l'amélioration de la cohésion suite aux réactions pouzzolaniques qui font lier les particules des sols stabilisés par cimentation.

II.4.3.2 En présence de sulfates

En présence des sulfates, une variation remarquable des paramètres de cisaillement d'une montmorillonite traité à 6% de chaux en fonction de la concentration en sulfate monovalent (Na_2SO_4) et divalent (CaSO_4) a été reporté par Sivapullaiah et al. (2000) (Tableau II.3). Cette variation dépend non seulement de la concentration des sulfates utilisés mais aussi de la période de cure et du type des cations (Na^+ ou Ca^{+2}) associés à l'anion SO_4^{-2} . Au jeune âge, l'angle de frottement interne effectif diminue avec l'augmentation de la concentration en sulfate monovalent ou divalent, mais avec la présence de 1% de CaSO_4 , l'angle de frottement interne devient plus grand par rapport à celui du sol traité sans CaSO_4 .

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-3 **Effet des sulfates sur les paramètres de cisaillement effectifs (C' et ϕ') d'une montmorillonite traité à 6% de chaux à différentes périodes de cure, (Sivapullaiah et al., 2000).**

Type du sulfate utilisé	Teneur en sulfate (%)	Paramètres de cisaillement	Période de cure		
			7 jours	3 moi	12 moi
Sol traité sans sulfate	0	C' (KPa)	73	243	263
		ϕ' (°)	43	41	41
Sol traité avec sulfate monovalent (Na_2SO_4)	0.5	C' (KPa)	33	104	103
			1	168	1
			3	120	80
	0.5	ϕ' (°)	41	35	29
			1	44	44
			3	31	32
Sol traité avec sulfate divalent (CaSO_4)	0.5	C' (KPa)	180	104	80
			1	102	110
			3	96	80
	0.5	ϕ' (°)	39	39	31
			1	36	44
			3	42	35

Cependant, après 7 jours de cure, la cohésion effective du sol traité initialement diminue en présence d'une faible concentration en sulfate monovalent (1%), puis elle augmente pour des fortes

concentrations. Par contre, pour la même période de cure, l'effet apporté sur la cohésion a été inversé pour le cas d'un traitement en présence d'un sulfate divalent. Tandis que la variation des paramètres de cisaillement à très long terme n'est pas claire du fait qu'il y ait une variation fortement perturbée avec la variation de la concentration des deux sulfates utilisés. D'après ces résultats, il s'avère que le sulfate monovalent généralement se comporte contrairement au sulfate divalent quel que soit les concentrations adoptées.

Après une année de cure, Sivapullaiah et al. (2000) ont démontré que la résistance au cisaillement de la montmorillonite diminue significativement de 1100 KPa jusqu'à 600 et 300KPa en présence de 0.5 et 1% de CaSO_4 , respectivement. Cependant, après la même période de cure, la résistance au cisaillement du même type de sol diminue considérablement jusqu'à 400 et 100 KPa en présence de 0.5 et 1% de Na_2SO_4 , respectivement. Ces résultats indiquent que l'altération de la résistance au cisaillement est très importante avec le sulfate de sodium que le sulfate de calcium où la résistance s'est altérée très tôt (à 2% de déformation) avec la présence d'une faible concentration en sulfate de sodium que sulfate de calcium. En général, la dégradation des performances mécaniques (résistance) dépend non seulement de la concentration en sulfate utilisé mais aussi du type de cations associés à l'anion SO_4^{-2} (Fig. II .6).

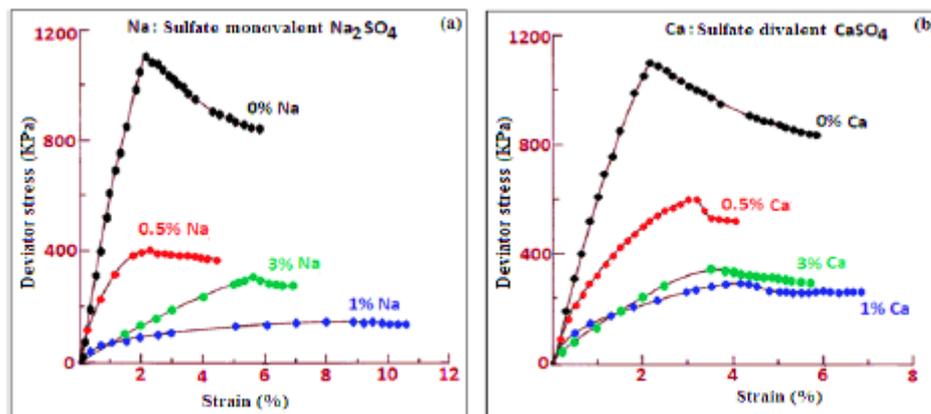


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-7 **Effet des sulfates sur la résistance au cisaillement d'une montmorillonite traitée avec 6% de chaux après une année de cure (pression de confinement: PC = 100 KPa), (Sivapullaiah et al. 2000).**

II.5 Conclusion

Plusieurs travaux de recherche ont été entrepris dont le but d'étudier l'influence des éléments perturbateurs (principalement les sulfates) sur le traitement des sols fins en utilisant des ajouts cimentaires seuls ou combinés (ciment, chaux, laitier, pouzzolane naturelle, cendres volantes, fumée de silice...etc.).

Par conséquent, l'effet de l'huile moteur sur le traitement des sols argileux par la combinaison chaux . Dans le prochain chapitre, une étude expérimentale sera entreprise en vue d'étudier l'effet d'une huile moteur sur le comportement physico-mécanique de sol gré à savoir les limites d'Atterberg, les paramètres de compactage des sols fins argileux stabilisés en utilisant la chaux.

Chapitre III

Etude expérimentale

III.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter l'étude expérimentale, qui se rapporte à connaître et évaluer l'influence et les changements apportés par l'huile moteur.

(Motor oil: https://en.wikipedia.org/wiki/Motor_oil) sur les propriétés physiques (limites d'Atterberg) et mécaniques (compactage, compression simple) des sols fins Argileux de la région de Chlef stabilisé à la chaux en tant qu'un additif minéral.

Nous allons aussi présenter les différentes caractérisations des matériaux choisis pour cette étude (sols et ajouts minéraux), ainsi que décrire la préparation des échantillons et la méthodologie des essais à réaliser.

L'étude expérimentale sera menée au niveau du laboratoire de mécanique des sols du département des sciences de la terre de l'Université Djilali Bounaama de Khemis-Miliana (UDBKM).

III.2 Sols naturels

III.2.1 Lieu de prélèvement

Le sol utilisé dans cette étude, est un sol argileux gris (SG) a été prélevé à partir de 4m de profondeur, provenant d'un projet de remblai situé approximativement à 18 km au Nord-est de la ville de Chlef.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-1 Prélèvement du sol argileux gris (SG) à partir d'un projet de remblai à Haouche El-Ghaba. (Gadouri. 2017).

III.2.1.1 Préparation

Après le prélèvement, le sol a été chargé dans des sachets en plastique et transporté au laboratoire et passés à l'étuve à 50°C pendant 24h. Après séchage, le sol a été concassé et broyées pour la préparation et exécution des essais géotechniques d'identification et de caractérisation.

Identification et caractérisation du sol

Le tableau suivant résume les caractéristiques physico-mécaniques des sols fins utilisés ainsi que leur classification déterminées selon les normes américaines (ASTM, 2004). Les propriétés chimiques et minéralogiques ont été déterminées selon les normes françaises (NF EN 196-2., 2013) comme montrées dans (le tableau III.1).



(a)



(b)

Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-2 Moyens utilisés pour la préparation des sols, (a) : concasseur, (b) : broyeur. (Harichane et al. 2011a)



(a)



(b)

Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-3 Préparation de sol pour les essais au laboratoire, (a): Sol après concassage, (b):

Sol après broyage et tamisage au tamis 1mm. (Harichane et al. 2011)

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. -1 **Caractéristiques physico-mécaniques du sol.**
(Harichane et al. 2011a).

Caractéristiques de base	sol gris (SG)
Teneur en eau naturelle (%)	32.9
Densité spécifique	2.71
Éléments passant au tamis 80µm (%)	85
Limite de liquidité (%)	82.8
Limite de plasticité (%)	32.2
Indice de plasticité (%)	50.6
Classification (USCS)	CH
Teneur en eau optimale (%)	28.3
Densité sèche maximale (KN/m³)	13.8
Résistance à la compression non confinée (MPa)	0.34
Perte au feu (%)	17.03

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-2 Propriétés chimiques des sols étudiés.
(Harichane et al. 2011a).

Nom chimique	Formule chimique	(SG%)
Oxyde de calcium	CaO	14,43
Oxyde de magnésium	MgO	1,99
Ferrite	Fe ₂ O ₃	5,56
Alumine	Al ₂ O ₃	14,15
Silice	SiO ₂	43,67
Sulfite	SO ₃	0,04
Chlorure	Cl ⁻	0,14
Potentiel d'hydrogène	pH	9,18
Oxyde de sodium	Na ₂ O	0,34
Oxyde de potassium	K ₂ O	1,96
Dioxyde de titan	TiO ₂	0,65
Phosphore	P ₂ O ₅	0,18

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.3- Propriétés minéralogiques des sols étudiés.
(Harichane et al. 2011a).

Nom minéralogique	Formule chimique	SG (%)
Quartz	SiO ₂	20
Calcite	CaCO ₃	26
Albite	NaAlSi ₃ O ₈	-
Illite	2K ₂ O. Al ₂ O ₃ . 24SiO ₂ . 2H ₂ O	16
Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	12
Montmorillonite	Al ₂ ((Si ₄ Al) O ₁₀) (OH) ₂ . H ₂ O	20
Chlorite	Mg ₂ Al ₄ O ₁₈ Si ₃	-

Minéraux ferrugineux et autres	-	6
--------------------------------	---	---

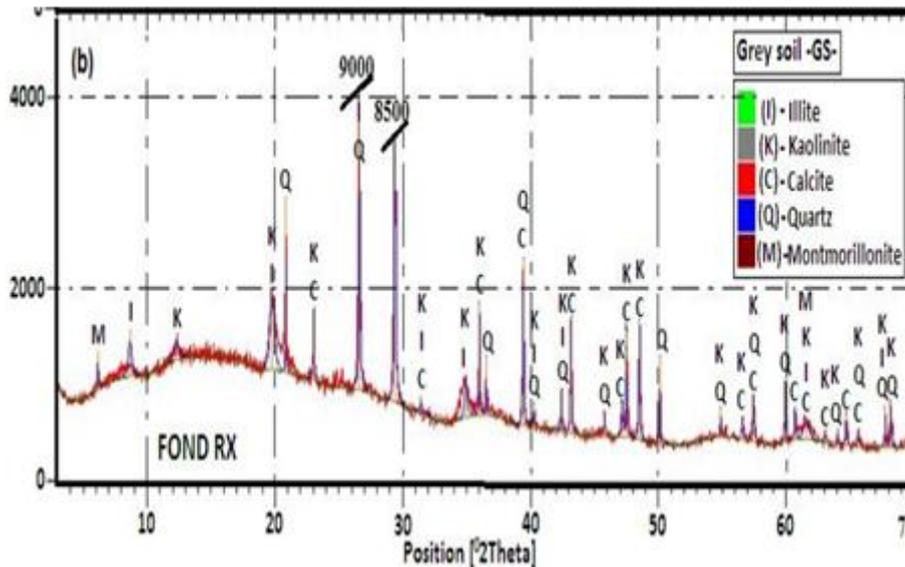


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-4 Le diagramme diffractométrique présentant la composition minéralogique du sol étudié (argilegris). (Gadouri. 2017).

III.2.2 Chaux

III.2.2.1 Définition

Le mot « chaux » désigne les produits dérivés du calcaire, notamment la chaux vive et la chaux éteinte. Le calcaire est une pierre d’origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et/ou de magnésium. La chaux est obtenue par la cuisson de roches calcaires dans des fours droits ou rotatifs à une température variable de 900 à 1250°C. On distingue plusieurs natures de chaux, selon la Composition chimique de la roche d’origine.

Les produits dérivés du calcaire (CaCO₃) possèdent la capacité unique d’être transformés et de reprendre leur forme originale. Le cycle de la chaux consiste à cuire le calcaire afin de former la chaux vive (CaO) (Fig. III.5). La chaux éteinte (Ca(OH)₂) peut donc être produite en ajoutant de l’eau à la chaux vive. Dans cet état, le dioxyde de carbone contenu dans l’atmosphère ou provenant de procédés industriels peut réagir avec la chaux éteinte pour la reconvertir en calcaire. Cette réaction représente la première réaction de durcissement des mortiers historiques. Ce cycle de continuité s’appelle le cycle de la chaux. Le temps requis à la chaux pour retourner à l’état de calcaire peut-être de quelques minutes avec l’aide de procédés industriels à plusieurs années si elle est laissée aux conditions atmosphériques.

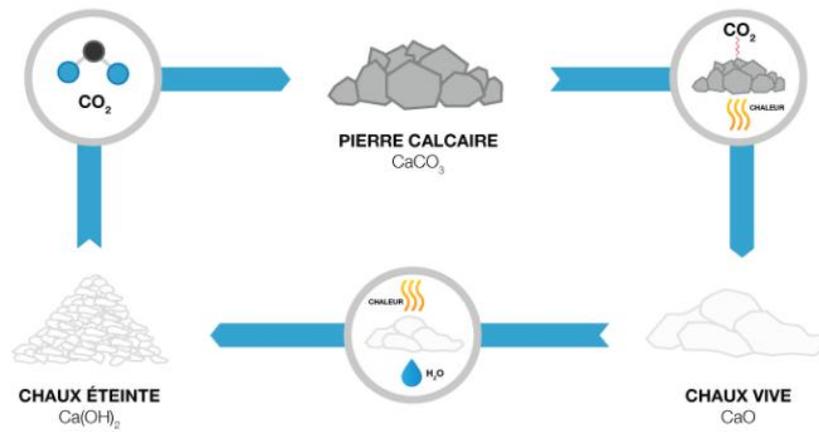


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-5 Cycle de production de la chaux

III.2.2.2 Chaux utilisée

La chaux utilisée dans cette étude est une chaux vive produite par la société BMSD-SARL située dans la ville de Saïda (Sud-ouest du territoire national) (Fig. Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-6). Les teneurs de chaux variaient entre (0, 4% et 8%), la quantité prédéterminée est 15g. Les propriétés Physiques et chimiques de cette chaux sont présentées dans le (tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-4)



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-6 Emballage utilisé pour la Chaux vive de Saïda.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-3 **Propriétés physiques et chimiques des ajouts utilisés. (Harichane et al, 2011b).**

Nom chimique	Chaux (%)
CaO	> 83.3
MgO	< 0.5
Fe ₂ O ₃	< 2
Al ₂ O ₃	< 1.5
SiO ₂	< 2.5
SO ₃	< 0.5
Na ₂ O	0.4 - 0.5
K ₂ O	-
CO ₂	< 5
TiO ₂	-
P ₂ O ₃	-
CaCO ₃	< 10
Apparence physique	Poudre blanche sèche
Densité spécifique	2
Plus de 90 µm (%)	< 10
Plus de 630 µm (%)	0
Matériau insoluble (%)	< 1
Densité apparente (g/l)	600 – 900
Perte au feu	-

III.2.3 Produit pétrolier (Huile moteur)

Dans cette étude, de l'huile moteur a été utilisée en tant qu'élément perturbateur du traitement (**Fig. Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-7**). Les quantités prédéterminées de l'huile moteur seront mélangées avec de l'eau puis rajoutées aux mélanges de sol gris ou sol-chaux. Les concentrations de l'huile moteur choisies pour cette étude sont (2% et 4%). Les propriétés physico-chimiques de l'huile Moteur utilisée sont représentées dans **le tableau**

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-4 .



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-7 **Huile moteur utilisée dans l'étude expérimentale.**

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-5 **Caractéristiques physico-chimiques de l'huile moteur utilisée.**

Propriétés physique-chimique	Huile moteur
Etat physique	Liquide
Couleur	Ombre
Point d'écoulement	42 c°
Point d'éclair	203(397.4f)
Viscosité cinématique	75.5 mm ² /s(75.5stst) à 40 c° 12.8 mm ² /s(12.8 – 16) à 100 c°
Masse molaire (g/mol)	<1000kg/m ³ (<1g/m ³) à 15c°(0.85 environ)

III.3 Déroulement des essais

III.3.1 Combinaison des échantillons

Les échantillons étudiés pour les essais des limites d'Atterberg et de compactage sont présentés dans le (Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-6)

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-7 Combinaisons des échantillons des sols stabilisés avec ou sans présence d'huile moteur.

combinaison	Limite d'Atterberg			Proctor normal			
	Sol	Chaux	Huile Moteur	Désignation	sol	chaux	Huile Moteur
C0HM0	300	0	0	C0HM0	2000	0	0
C0HM2	298	0	2	C0HM2	1998	0	2
C0HM4	296	0	4	C0HM4	1996	0	4
C4HM0	296	4	0	C4HM0	1996	4	0
C4HM2	294	4	2	C4HM2	1994	4	2
C4HM4	292	4	4	C4HM4	1992	4	4
C8HM0	292	8	0	C8HM0	1992	8	0
C8HM2	290	8	2	C8HM2	1990	8	2
C8HM4	288	8	4	C8HM4	1988	8	4

C : Chaux (lime), HM : Huile Moteur.

III.3.2 Propriétés étudiées

III.3.2.1 Limites d'Atterberg

III.3.2.1.1 Principe des limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont des paramètres servant à identifier un sol en déterminant les teneurs en eau aux transitions définies conventionnellement entre état solide (WP), plastique (IP) et liquide (WL). Cet essai s'effectue en deux phases :

- Recherche la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque cette dernière et son contenu sont soumis à des chocs répétés
- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée confectionné manuellement, se fissure.

Les limites d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité) ont été déterminées selon la norme ASTM D4318(2000). Les sols séchés à l'air (passant au tamis 400 μ m). D'abord, on mélange la quantité de sol avec la quantité prédéterminée de chlorure et de chaux ou la combinaison des deux dans un état sec (**Tab.**Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..7). Ensuite, on ajoute l'eau distillée au mélange obtenu pour laisser l'eau diffuser et passer à travers le mélange de sol. Puis on laisse les pâtes des échantillons mélangés avec les additifs sans huile moteur au repos dans un récipient hermétique pendant des périodes de cures de **1 à 15** jours avant le test. Après ce traitement, la pâte sera remélangée et malaxée pendant au moins 15 minutes avant d'effectuer le premier essai.

Cependant, les pâtes des échantillons contenant de l'huile moteur seront destinés à trois essais après des périodes de cures de **1 à 15** jours afin d'évaluer l'effet du temps de la diffusion de l'huile moteur sur l'évolution de la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité de sol argileux en fonction du temps.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-8 **Quantités des sols et des additifs utilisés avec ou sans présence d'huile moteur pour les limites d'Atterberg.**

Combinaison	Essai des limites d'Atterberg		
	Sol (g)	Chaux (g)	Huile moteur (g)
C0HM0	300	-	-
C0HM2	264	-	6
C0HM4	288	-	12
C4HM0	288	12	-
C4HM2	282	12	6
C4HM4	276	12	12
C8HM0	276	24	-
C8HM2	270	24	6
C8HM4	264	24	12

III.3.2.1.2 Détermination de la limite de liquidité

La totalité du matériau sera malaxée afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide. Après chaque période de cure (**1 à 15 jours**) en procédant à remplir une coupelle propre et sèche, avec une spatule, d'une masse de pâte d'environ 70g. Cette pâte sera étalée en plusieurs couches afin d'éviter d'emprisonner des bulles d'air, pour donner un aspect symétrique par rapport à l'axe vertical de la coupelle. Ensuite, on partagera la pâte en deux parties au moyen de l'outil à rainurer. On actionnera la came de façon à soumettre la coupelle à une série de chocs à une cadence de 2 coups par seconde. On notera le nombre de chocs (NC) nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 13 mm. L'opération complète sera effectuée au moins quatre fois sur la même pâte mais avec une teneur en eau différente à chaque fois. L'essai ne sera poursuivi que lorsque NC est compris entre 15 et 35. Les nombres de chocs de la série d'essais doivent encadrer 25 et l'écart entre deux valeurs consécutives doit être inférieur ou égale à 10. Enfin, on prélève à partir de la coupelle à l'aide d'une spatule, environ 5 g de pâte, de chaque côté des lèvres de la rainure pour en déterminer la teneur en eau par dessiccation à l'étuve. La limite de liquidité (WL) est la teneur en eau du matériau qui correspond conventionnellement à une fermeture sur 13 mm des lèvres de la rainure après 25 chocs (**Fig. Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.8**). Elle est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales (NC, WL) pour au moins quatre couples de valeurs. La limite de liquidité est obtenue pour une valeur de nombre de chocs (NC) égale à 25 coups. Elle est exprimée en pourcentage et arrondie au nombre entier le plus proche.

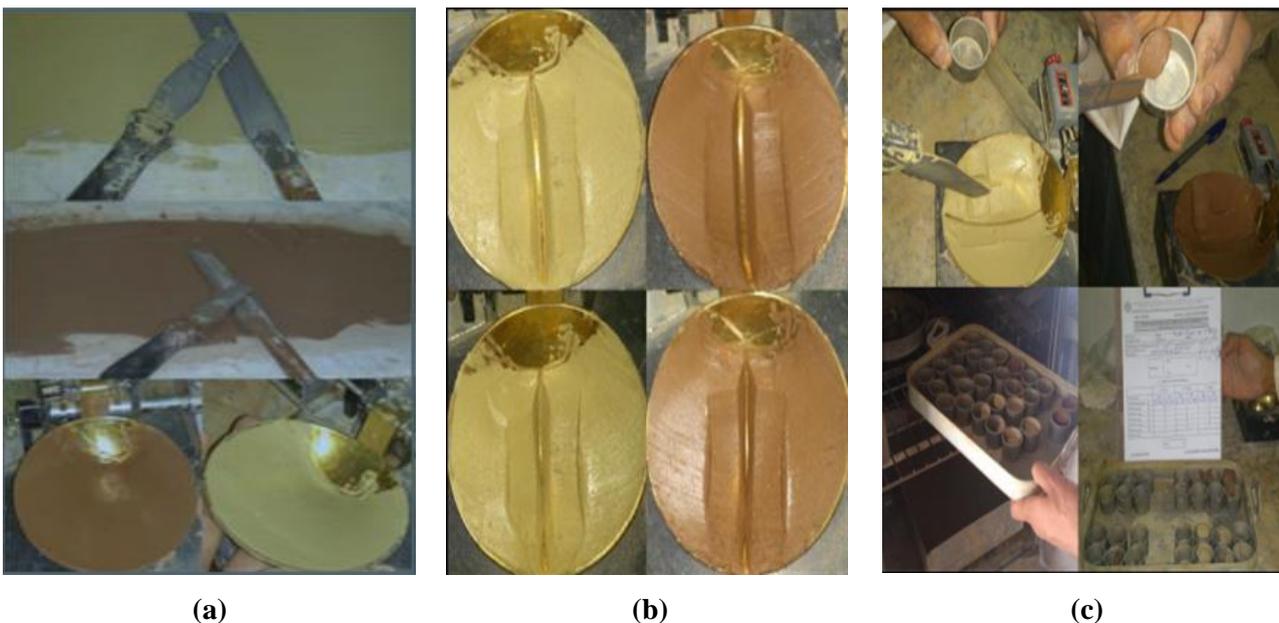


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-8 Détermination de la limite de liquidité, (a): étalement de la pâte et remplissage de la coupelle, (b): pratiqué la rainure et créer une serré de

chocs jusqu'à la fermeture des lèvres à 13mm, (c): prélèvement d'échantillon et dessiccation à l'étuve.
(Gadouri.2017)

III.3.2.1.3 Détermination de la limite de plasticité

On forme une boulette à partir de la pâte préparée et la roule sur une plaque lisse à la main ou éventuellement à l'aide d'une plaquette, de façon à obtenir un rouleau qui aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne un diamètre de 3 mm et une longueur d'environ 10 cm et ne doit être creux. La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint 3 mm. Une fois les fissures apparues, on prélève la partie centrale du rouleau et la place dans une capsule de masse connue, la pèse immédiatement et l'introduit dans l'étuve afin de déterminer sa teneur en eau (Fig. Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-9). Par définition, la limite de plasticité (WP) est la teneur en eau conventionnelle d'un rouleau de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint 3 mm. Cette limite de plasticité est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues à partir de trois essais. La valeur est exprimée en pourcentage.

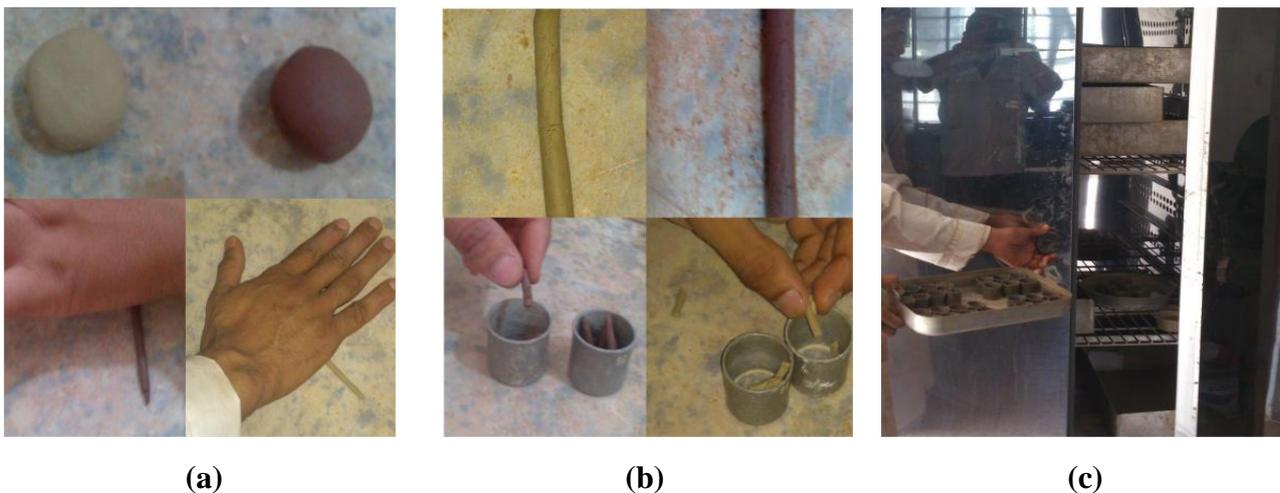


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-9 Détermination de la limite de plasticité, (a): formation d'une boulette de pâte et la rouler à la main pour former un rouleau, (b): amincissement du rouleau jusqu'à ce qu'il se fissure à 3 mm de diamètre et prélèvement d'échantillon, (c): dessiccation à l'étuve à 105°C pendant 24h. (Gadouri.2017).

III.3.2.1.4 Détermination de l'indice de plasticité

D'après Atterberg. (1911), l'indice de plasticité est la gamme des teneurs en eau, à l'intérieur de laquelle le sol se comportait comme un matériau plastique. L'indice de plasticité (IP) est donc égal à la différence entre les valeurs de la limite de liquidité et de la limite de plasticité.

$$I_p = W_l - W_p$$

III-14

III.3.2.2 Compactage

III.3.2.2.1 Principe de l'essai

Il Consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau et le compacter selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de la teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du sol et on établit la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. Les essais de compactage sont réalisés conformément à la norme ASTM D698 (2000). Et les quantités des matériaux utilisés sont résumées dans le (Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-7)

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-10 Quantités des sols et des additifs utilisés avec ou sans présence d'huile moteur pour l'essai de compactage.

Combinaison	Sol (g)	Chaux (g)	Huile moteur (g)
C0HM0	2000	-	-
C4HM0	1920	80	-
C8HM0	1840	160	-
C0HM2	1960	-	40
C0HM4	1920	-	80
C4HM2	1880	80	40
C8HM4	1760	160	80
C8HM2	1800	160	40
C4HM4	1840	80	80

Les caractéristiques de compactage Proctor normal ou modifié d'un sol sont dénommées respectivement la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale. Ces deux dernières sont des caractéristiques très utilisées pour identifier les sols et pour définir les spécifications de compactage qui

sont applicables lorsqu'ils sont utilisés dans la construction des remblais, des couches de forme et des assises de chaussées routières.

Il convient de réduire le sol en une mouture 0/1 mm. L'échantillon sec réduit est répandu dans un bac, homogénéisé et divisé en cinq parts aussi semblables que possible. Chacune de ces parts est ensuite humidifiée en introduisant la quantité d'eau voulue, à l'aide d'un pulvérisateur, tout en maintenant le malaxage (**Fig. Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-9**). Celui-ci peut se faire manuellement ou plus avantageusement à l'aide d'un malaxeur électrique. Les échantillons préparés sans et avec additifs (chaux et huile moteur) sont introduits dans des sacs hermétiques et en les conservant pendant une heure avant l'exécution de l'essai de compactage.



Homogénéisation



Humidification



Malaxage

Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-10 Préparation de la prise d'essai de compactage. (Zoubir, 2009)

Le choix du type de moule (moule Proctor) et de la nature de l'essai à exécuter (essai Proctor normal) étant choisis, on procède au compactage des éprouvettes humidifiées en respectant les modalités d'exécution des essais Proctor normal (**Fig. Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-11**).



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-11 **Compactage du sol. (Zoubir. 2009)**

Après le compactage de la dernière couche, on retire la rehausse, le matériau doit alors dépasser du moule d'une hauteur de 1 cm au maximum. Cet excédent sera arasé soigneusement au niveau du moule. L'ensemble du moule avec le matériau sera pesé. On procède au démoulage de l'éprouvette et on extrait un échantillon représentatif pour la détermination de la teneur en eau. Ces opérations seront répétées sur chacune des six parts de matériau pré humidifié. Pour chaque éprouvette compactée, il convient de calculer la teneur en eau, le poids volumique humide et le poids volumique du sol sec en tenant compte du volume réel du moule utilisé. Les valeurs des masses volumiques du sol sec et des teneurs en eau correspondantes sont portées sur un graphe. On trace ensuite la courbe d'ajustement des points expérimentaux. Cette courbe présente une valeur maximale. Cette dernière est un couple de valeurs dénommées respectivement poids volumique sec maximal et teneur en eau optimale Proctor Normal.

III.3.2.2.2 Détermination de la densité sèche

La densité sèche maximale représente la division entre le poids des grains solide du matériau et volume de sol dont on a besoin sur chantier.

$$\gamma_{dmax} = \frac{P_s}{v}$$

III-15

III.3.2.2.3 Détermination de la teneur en eau

Teneur en eau optimale représente la division entre le poids de l'eau à utiliser dans le chantier et le poids des grains solide du matériau.

$$W_{opt} = \frac{P_w}{P_s}$$

III-16

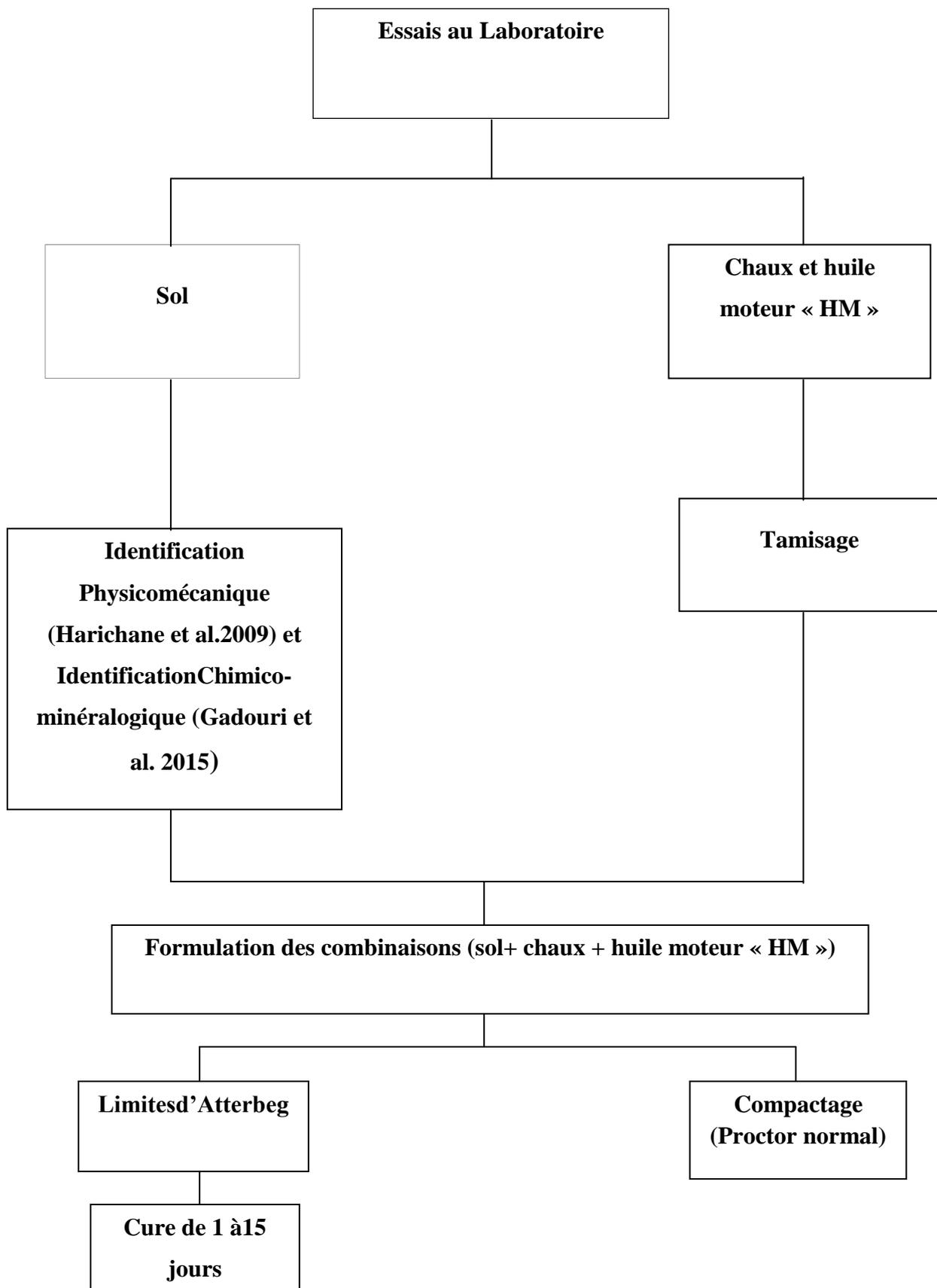


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-12 **Organigramme des essais prévus à effectuer au laboratoire**

III.4 Conclusion

L'étude expérimentale de cette recherche vise à évaluer l'efficacité du traitement à la chaux d'une argile grise provenant de Haouche El-Ghaba(W. Chlef), cette argile sera perturbée avec de l'huile moteur.

Cette étude expérimentale va nous permettre d'évaluer l'effet de la chaux et de l'huile moteur sur les limites d'Atterberg, les caractéristiques de compactage au Proctor normal (W_{opt} et $\gamma_{d_{max}}$) du sol gris choisi.

Chapitre IV

*Présentation et interprétation des
résultats obtenus*

IV.1 Introduction

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

IV.2 Variation des limites d'Atterberg

Les résultats des limites d'Atterberg obtenus pour les différentes combinaisons avec présence de la huile moteur (HM) et également les résultats obtenus par Gadouri et al. (2016) pour les mêmes combinaisons sont reportés sur le tableau VI.1.

Tableau IV.1: Résultats des limites d'Atterberg avec et sans présence de la huile moteur du sol gris très plastique très à différents pourcentages de chaux.

Combinaisons	W _L (%)	W _P (%)	I _P (%)	Références
C0HM0	82.80	32.20	50.60	Gadouri et al. (2016)
C4HM0	64.50	45.50	19.00	
C8HM0	62.10	45.70	16.40	
C0HM2	48.00	19.00	29.00	Présente étude
C4HM2	60.00	34.00	26.00	
C8HM2	67.00	50.00	17.00	
C0HM4	55.00	36.00	25.00	
C4HM4	70.00	48.00	22.00	
C8HM4	75.00	63.00	12.00	

IV.2.1 Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg

Les résultats expérimentaux concernant la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité du sol gris argileux amélioré par la chaux sont présentés dans les deux figures IV.1 et IV.2.

Selon, Gadouri et al. (2016), l'addition de la chaux fait diminuer la limite de liquidité et l'indice de plasticité des échantillons du sol argileux alors qu'elle fait augmenter la limite de plasticité.

La diminution de l'indice de plasticité indique une amélioration dans la maniabilité du sol. Comme indiqué sur les figures, le sol fin a montré une diminution de l'indice de plasticité avec l'augmentation de la période de cure et l'addition de la chaux.

Par ailleurs, plusieurs chercheurs ont montré la même tendance dans leurs travaux de recherche (Attoh Okine, 1995; Bagherpour et al. 2003; Sivapullaiah et al. 2000; Ansary et al. 2006; Bozbey et al. 2010).

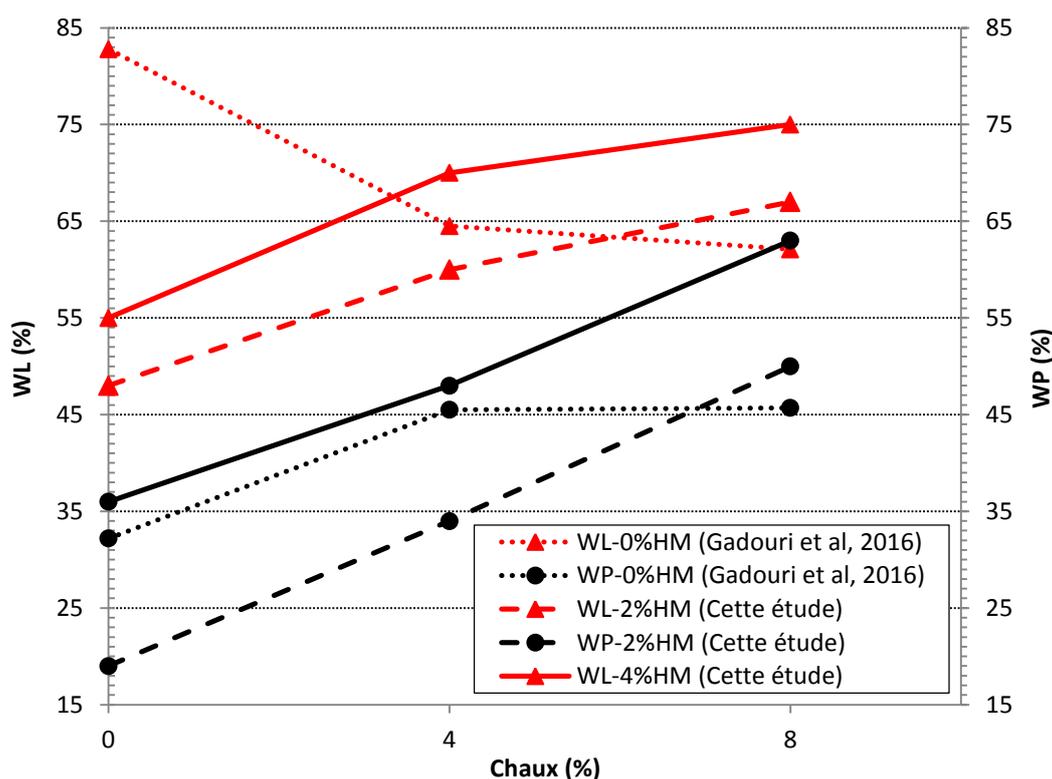


Figure IV-1 L'influence de différents dosages en chaux sur la limite de liquidité (W_L) et de plasticité (W_P) du sol argileux gris traité en présence de 2 et 4% de la huile moteur (HM).

Selon la littérature, Attoh-Okine (1995) a rapporté que la diminution de la limite de liquidité est observée pour les sols composés principalement de l'argile montmorillonitique alors que son augmentation est constatée dans le cas des sols kaoliniques. En outre, Goswami and Singh

(2005) ont indiqué que la façon de l'arrangement des particules ainsi que la présence de cations bivalents favorisent la floculation des particules argileuses et augmentent la limite de liquidité des sols kaoliniques.

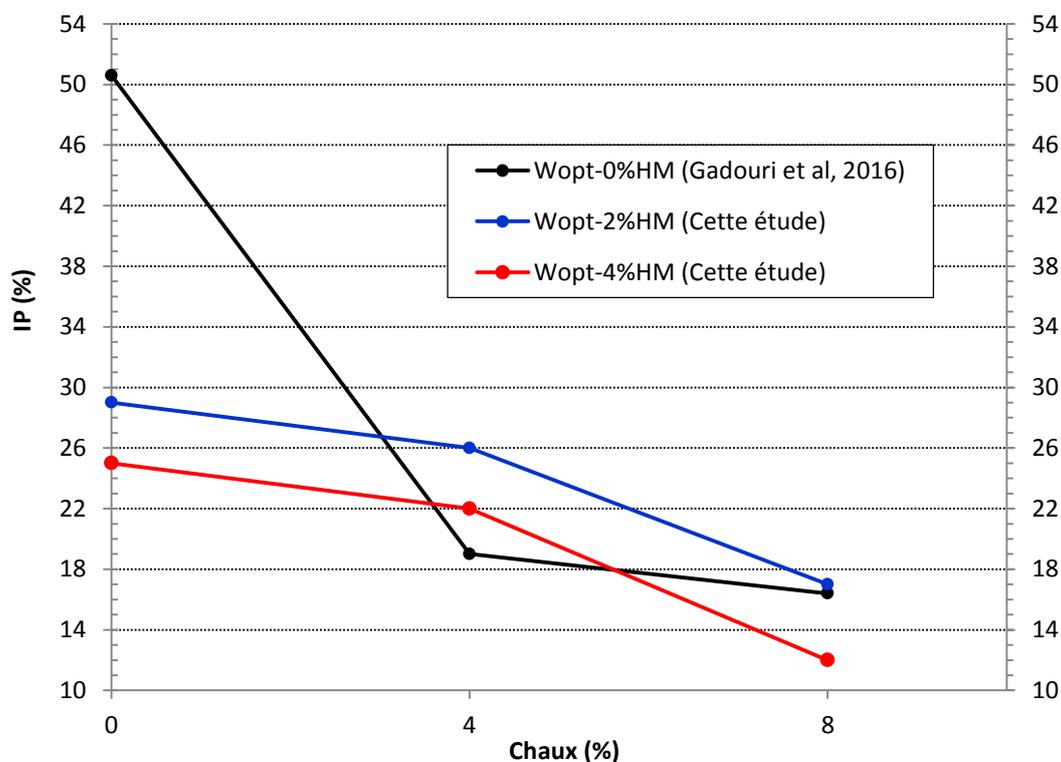


Figure IV-2 L'influence de différents dosages en chaux sur l'indice de plasticité (I_p) du sol argileux gris traité en présence de 2 et 4% de la huile moteur (HM).

IV.2.2 Effet de la huile moteur sur les limites d'Atterberg

Les figures précédentes IV.1 et IV.2 présentent aussi les résultats de la modification des limites d'Atterberg du sol argileux stabilisé à la chaux en présence de différentes teneurs d'huile moteur.

Les résultats obtenus montrant que l'addition de la huile moteur fait augmenter la limite de liquidité et de plasticité des échantillons du sol argileux non traité et traité à la chaux. En plus, les deux limites augmentent avec l'augmentation de la teneur en huile moteur.

La diminution de l'indice de plasticité indique une amélioration dans la maniabilité du sol. Le sol gris traité et non traité a montré une diminution remarquable de l'indice de plasticité si on fait augmenter de la teneur en huile moteur.

Ces résultats sont en parfaite concordance avec d'autres résultats de travaux de recherche antérieurs effectués par différents chercheurs (ex : Sadeeq et al. 2015).

En présence seule de la chaux, l'augmentation de la limite de liquidité est attribuée à la réaction de la chaux avec les particules du sol argileux ce qui se traduit par la formation d'agents de cimentation liant ainsi les particules du sol entre elles, c'est la réaction de modification.

Il est à noter que les changements dans les propriétés géotechniques des sols peuvent être dus à une interaction physique et (ou) physico-chimique entre le sol et le contaminant. Les paramètres importants de l'interaction physique sont la viscosité, la densité et la tension superficielle des huiles contaminantes. L'interaction physique est prédominante dans le cas des sols granulaires, alors que l'interaction physico-chimique peut avoir lieu dans les sols à grains fins comme le cas de la présente étude. Pour les sols à haute plasticité, l'interaction chimique l'emporte sur l'interaction physique. Pour les fluides contaminants organiques non polaires, la constante diélectrique est le paramètre important qui entraîne des changements dans l'épaisseur de la double couche diffusée dans les sols argileux. Une valeur plus faible de la constante diélectrique pour les huiles de pétrole diminue l'épaisseur de la couche diffusée et par conséquent, la structure des argiles a tendance à être plus flocculée. Cela provoque la diminution de l'indice de plasticité (Sadeeq et al. 2015).

VI.3 Variation des caractéristiques de compactage

Les résultats des essais de Proctor normal obtenus pour les différentes combinaisons avec présence de la huile moteur (HM) et également les résultats obtenus par Gadouri et al. (2018) pour les mêmes combinaisons sont reportés sur le tableau VI.2.

Tableau IV.2: Résultats Proctor normal avec et sans présence de la huile moteur du sol gris très plastique très à différents pourcentages de chaux.

Combinaisons	ω_{OPN} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	Références
C0HM0	28.30	13.80	Gadouri et al. (2018)
C4HM0	30.40	13.20	
C8HM0	31.10	12.90	
C0HM2	26.90	14.10	Présente étude
Tableau IV.2 : Continué.			
C4HM2	26.00	14.25	
C8HM2	23.00	14.45	
C0HM4	25.20	14.20	
C4HM4	24.20	14.35	
C8HM4	20.50	14.70	

VI.3.1 Effet de la chaux sur les propriétés de compactage

Les résultats de l'influence de différents dosages en chaux (4 et 8%) sur les propriétés de compactage du sol gris argileux traité en présence de 2 et 4% d'huile moteur sont présentés dans les Figures IV.3 et IV.4.

Selon Gadouri et al. (2018), lorsqu'on ajoute de la chaux au sol gris étudié, la densité sèche maximale diminue et la teneur en eau optimale augmente. Un comportement similaire a été observé par différents chercheurs (Ola, 1977; Rahman, 1986; George et al., 1992; Bell, 1996; Gay et al., 2000; Sivapullaiah et al., 2003; Hossain et al., 2007; Kavak et al., 2007; Manasseh et al., 2008; Bozbey et al., 2010; Solanki et al., 2009; Harichane et al., 2011; Gadouri et al., 2019). Ce comportement est peut être expliqué par l'une des raisons suivantes :

- L'effet de la chaux qui entraîne l'agrégation des particules par le procédé complexe d'échange cationique aboutissant à une modification de la granulométrie du sol et provoquant par conséquent les particules du sol à occuper de plus grands espaces ;
- La faible densité spécifique de la chaux par rapport à celle des sols naturels testés conduit à diminuer la densité sèche maximale des sols stabilisés ;

- L'effet des réactions pouzzolaniques qui se produisent entre les particules d'argile (principalement l'alumine et la silice) et le calcium (apporté par la chaux) dans les sols sont responsables de l'augmentation de la teneur en eau optimale vu que ce processus augmente l'affinité du sol à l'eau

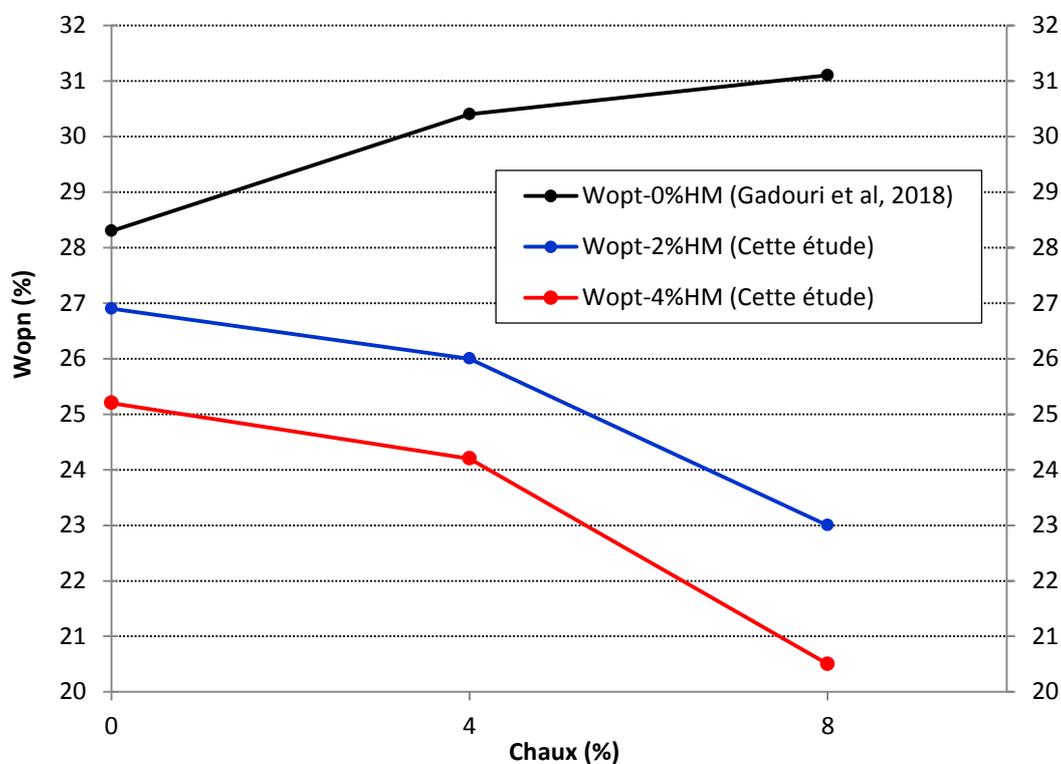


Figure IV-3 L'influence de différents dosages en chaux sur la teneur en eau optimale (Wopt) du sol argileux gris traité en présence de 2 et 4% d'huile moteur.

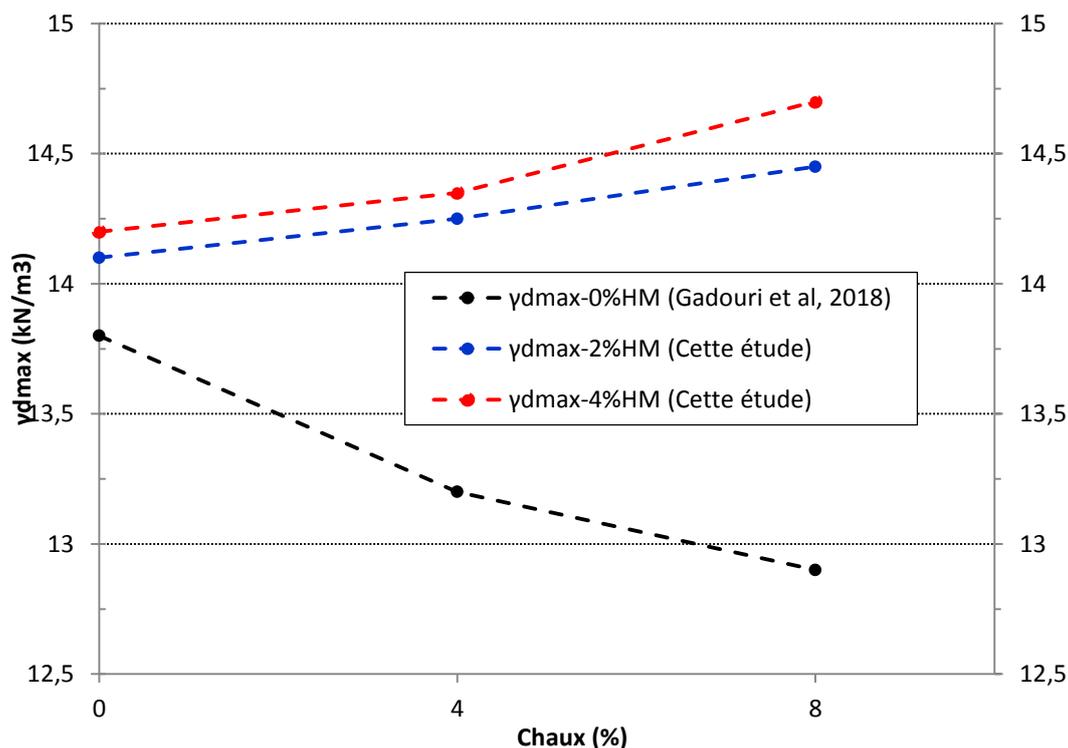


Figure IV-4 L'influence de différents dosages en chaux sur la densité sèche maximale (γ_{dmax}) du sol argileux gris traité en présence de 2 et 4% d'huile moteur.

IV.3.2 Effet de la huile moteur sur les propriétés de compactage

Les résultats expérimentaux concernant les caractéristiques de compactage de Proctor normal sont présentés dans les figures précédentes IV.3 et IV.4; lesquelles l'effet de la chaux, sur les caractéristiques de compactage (densité sèche maximale et teneur en eau optimale) du sol argileux étudié avec présence d'huile moteur.

En présence d'huile moteur (HM), les résultats montrent que ce dernier (HM) fait augmenter considérablement la densité sèche maximale et fait diminuer la teneur en eau optimale. L'augmentation ou la diminution de ces deux propriétés est très prononcée si on fait augmenter la teneur en huile moteur. Le même comportement a été observé par (Sadeeq et al. 2015).

L'augmentation continue de la densité sèche maximale a été attribuée à l'effet lubrifiant dû à la présence d'huile moteur qui facilite le compactage et réduit la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la densité maximale. Cette augmentation de la densité sèche maximale avec l'ajout d'huile moteur peut également être due à des réactions d'échange de cations et elle pourrait également être due au fait que l'huile est un fluide occupant les vides au sein de la matrice du sol (Osinubi, 2000 ; Oriola and Moses 2010).

La diminution de la teneur en eau optimale à mesure que la teneur en huile moteur augmente peut être due au fait que l'huile étant un fluide avec des caractéristiques lubrifiantes a tendance à faciliter le glissement des particules de sol les unes par rapport aux autres, ce qui a permis d'atteindre des densités plus élevées à une teneur en eau plus faible. La tendance observée dans la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale est en accord avec les résultats obtenus par Lees et al. (1982).

IV.4 Conclusion

En se basant sur les résultats des tests effectués, les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- L'addition de la chaux seule fait diminuer la limite de liquidité et l'indice de plasticité mais elle fait augmenter la limite de plasticité du sol argileux étudié ;
- L'augmentation de la limite de liquidité est attribuée à la réaction de la chaux avec les particules du sol argileux ce qui se traduit par la formation d'agents de cimentation liant ainsi les particules du sol entre elles ;
- La huile moteur, en présence ou en absence de la chaux, fait diminuer l'indice de plasticité alors qu'elle fait augmenter la limite de liquidité et de plasticité ;
- Pour les fluides contaminants organiques non polaires (huile moteur), la constante diélectrique est le paramètre important qui entraîne des changements dans l'épaisseur de la double couche diffusée dans les sols argileux. Ce paramètre est le responsable sur la variation (diminution ou l'augmentation) de l'indice de plasticité ;
- L'addition de la chaux seule fait diminuer la densité sèche maximale mais elle fait augmenter la teneur en eau optimale sol argileux traité ;
- L'effet de la chaux qui entraîne l'agrégation des particules par le procédé complexe d'échange cationique aboutissant à une modification de la granulométrie du sol et provoquant par conséquent les particules du sol à occuper de plus grands espaces ;
- La faible densité spécifique de la chaux par rapport à celle des sols naturels testés conduit à diminuer la densité sèche maximale du sol stabilisé ;

- L'effet des réactions pouzzolaniques qui se produisent entre les particules d'argile (principalement l'alumine et la silice) et le calcium (apporté par la chaux) dans les sols sont responsables de l'augmentation de la teneur en eau optimale vu que ce processus augmente l'affinité du sol à l'eau ;
- L'augmentation continue de la densité sèche maximale a été attribuée à l'effet lubrifiant dû à la présence d'huile moteur qui facilite le compactage et réduit la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la densité maximale.
- La diminution de la teneur en eau optimale à mesure que la teneur en huile moteur augmente peut être due au fait que l'huile étant un fluide avec des caractéristiques lubrifiantes a tendance à faciliter le glissement des particules de sol les unes par rapport aux autres, ce qui a permis d'atteindre des densités plus élevées à une teneur en eau plus faible.

Conclusions générales, recommandations et perspectives

Conclusion générale

Une étude expérimentale approfondie a été effectuée au niveau du Laboratoire géotechnique faculté Khmis Miliana afin d'évaluer quantitativement les effets apportés par la présence de différents teneurs en huile moteur, sur les limites d'Atterberg (W_L , W_P et I_P), et les propriétés de compactage (W_{opt} et γ_{dmax}), du sol argileux gris (SG) traité avec l'addition de la chaux à différentes périodes de cure. A la lumière des résultats des tests effectués, les conclusions suivantes peuvent être dégagées:

- L'addition de la chaux seule fait diminuer la limite de liquidité et l'indice de plasticité mais elle fait augmenter la limite de plasticité du sol argileux étudié ;
- L'augmentation de la limite de liquidité est attribuée à la réaction de la chaux avec les particules du sol argileux ce qui se traduit par la formation d'agents de cimentation liant ainsi les particules du sol entre elles ;
- La huile moteur, en présence ou en absence de la chaux, fait diminuer l'indice de plasticité alors qu'elle fait augmenter la limite de liquidité et de plasticité ;
- Pour les fluides contaminants organiques non polaires (huile moteur), la constante diélectrique est le paramètre important qui entraîne des changements dans l'épaisseur de la double couche diffusée dans les sols argileux. Ce paramètre est le responsable sur la variation (diminution ou l'augmentation) de l'indice de plasticité ;
- L'addition de la chaux seule fait diminuer la densité sèche maximale mais elle fait augmenter la teneur en eau optimale sol argileux traité ;
- L'effet de la chaux qui entraîne l'agrégation des particules par le procédé complexe d'échange cationique aboutissant à une modification de la granulométrie du sol et provoquant par conséquent les particules du sol à occuper de plus grands espaces ;
- La faible densité spécifique de la chaux par rapport à celle des sols naturels testés conduit à diminuer la densité sèche maximale du sol stabilisé ;
- L'effet des réactions pouzzolaniques qui se produisent entre les particules d'argile (principalement l'alumine et la silice) et le calcium (apporté par la chaux) dans les sols sont responsables de l'augmentation de la teneur en eau optimale vu que ce processus augmente l'affinité du sol à l'eau ;

- L'augmentation continue de la densité sèche maximale a été attribuée à l'effet lubrifiant dû à la présence d'huile moteur qui facilite le compactage et réduit la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la densité maximale.
- La diminution de la teneur en eau optimale à mesure que la teneur en huile moteur augmente peut être due au fait que l'huile étant un fluide avec des caractéristiques lubrifiantes a tendance à faciliter le glissement des particules de sol les unes par rapport aux autres, ce qui a permis d'atteindre des densités plus élevées à une teneur en eau plus faible.

Recommandations

- Il est à recommander d'effectuer des études sur l'élément perturbateur (huile usagé) traité à la chaux. D'autre part, du point de vue économique, l'huile usagée disponible avec des quantités importantes et moins cher que l'huile moteur.

Perspectives

- Pour les futures études, il sera important d'approfondir la recherche sur les effets qui peuvent être apportés par d'autres éléments perturbateurs sur les sols traités autre que l'huile moteur à savoir : les chlorures, les phosphates, les nitrates, les matières organiques...etc. De plus, les fortes différences dans les valeurs de la température entre le Nord et le Sud de l'Algérie et notamment durant la saison d'été nécessitent de prendre en considération l'effet de la température sur les sols améliorés avec ou sans présence des éléments perturbateurs de prises.
- Il a été démontré que l'huile moteur fait améliorer considérablement les propriétés géotechniques des sols argileux stabilisés. Donc, il sera très utile d'élargir l'investigation sur d'autres types de sols mais cette-fois-ci avec l'utilisation du gypse naturel en tant qu'additif puisqu'il est disponible en grandes quantité sur le territoire national.
- Vu l'intensité des réseaux routiers construits actuellement en Algérie ainsi que les grandes quantités de remblai présentant des caractéristiques mécaniques insuffisantes ou médiocres, il sera donc très nécessaire de développer des liants hydrauliques pour ce type de projet à base du Gypse-ciment. Pour cela, il faudra faire une étude approfondie sur les différentes teneurs des mélanges de Gypse-ciment afin d'optimiser son effet et par conséquent, de recommander les fractions de Gypse-ciment adéquates pour le traitement des sols fins argileux.

Références Bibliographiques



Références Bibliographies

ALLAM.O. (2011). mémoire de magister.. université de TLEMCEN, Algerie.

Afès, M. and Didier, G. (2000). Stabilization of (Algeria).Bulletin of Engineering Geology and the Environment, doi:

10.1007/s100649900022.

Al-Mukhtar, M., Khattab, S., and Alcover, J. F., 2012. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. Engineering .

Al-Mukhtar, M. (2012). Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. (pp. 17–27).

AZZOUZ .F.Z. (2006). mémoire de magister. *Contribution a l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen.* université de Tlemcen, Algérie.

Auto butler.fr . (2017, avril 11).

BELABBACI, Z. (2014). thèse de doctorat . *STABILISATION DES SOLS GONFLANTS* (pp 5-15).

BELL.F.G. (1988). *Stabilization and Treatment of Clay Soils with Lime»,Part 1. Basic Principles, Ground Engineering,Vol 21 n1* (pp. 10-15).

CABANE, N. (2004). thèse de doctorat, école nationale supérieure des mines. Dans *Sols traites à la chaux et aux liants hydrauliques:Contribution a l'identification et a l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation». Saint-Etienne, France.*

CultureSciences.Chimie. (s.d.). les carburants: une source d'énergie chimique. *culturesciences.chimie.ens.fr* .

Canadian environment. NRCC No. 15015, Comité associé sur les critères scientifiques concernant l'état de l'environnement,Conseil.

Delisle, C. e. (1977). les sulfates . *water-sulphate-sulfate-eau-fra.pdf* (p. 1). Canada (Ottawa): The effects of sulphur on water and aquatic life in Canada. Dans : Sulphur and its inorganic derivatives in the

- Gaafer, M. B. (2015). Soil Improvement Techniques. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 6, No. 12, , 217–222.
- Gabr, A. (. (2012). The Uncertainties of Using Replacement Soil in Controlling Settlement. *The Journal American of Science*, Vol. 8, No. 12 , 662–665.
- Gadouri, H. (2017). thèse final de doctorat . Dans *Influence de la présence des sulfates sur le traitement des sols argileux par des ajouts minéraux* (pp9-208).
- G, al. e. (2015). Soil Improvement Techniques. *International Journal of Scientific & Engineering Research* Vol. 6, No. 12 , 217–222.
- HANICHI, Z. (2005). Mémoire de fin d'étude université de fin d'étude. *Optimisation des paramètres de fonctionnements d'une débutaniseure*. université de BOUMERSAS.
- J, W. (2005). thèse de doctorat. *Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses*». france .
- J, C. (2000). Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques Application à la réalisation des remblais et des couches de forme Guide technique. *La chaux et ses utilisations* (p. 17).
- J. A. Sadeeq, J. Ochepo and A. B. Salahudeen (2015). “Assessment of Bagasse Ash Effect on the California Bearing Ratio of Used Oil Contaminated Lateritic Soils”. *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)*, Vol. 34 No. 2, April 2015, pp. 223 – 231.
- J, W. (2005). thèse de doctorat . *Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses*. france
- Kinuthia, J. W. (1999). Effects of monovalent and divalent metal sulphates on consistency and compaction of lime-stabilized kaolinite . Dans *Applied Clay* Vol. 14, No. 1 (pp. 27-45).
- Kinuthia, J.M., Wild, S. and Jones, G.I. (1999). Effects of monovalent and divalent metal sulphates on consistency and compaction of lime-stabilized kaolinite. *Applied Clay Science*, Vol. 14, No. 1, pp. 27–45, doi: PII S0169-1317_98.00046-5.
- Lees, G., Abdelkader, M. O. and Hamdani, S. K. (1982). “Sodium chloride as additive in lime- soil stabilization” *Journal Institute of Highway Engineers.*, 29, Vol; No(11), pp.8-16.
- Les nitrates . (2007). *ORS RA Nitrates* (p. 1).

- M, P. (AFNOR en août 1999). *Sols reconnaissance et essais* (p. 11).
- NF P 94-049-1. *Sols reconnaissance et essais , Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux ,Partie 1 Méthode de la dessiccation au four à micro-ondes.*
- NF P 94-049-2. *Sols reconnaissance et essais , Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux , Partie 2 Méthode à la plaque chauffante ou panneaux rayonnants.*
- NF P 94-050. *reconnaissance et essais , Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux ,Méthode par étuvage.*
- NF P 94-051. *Sols reconnaissance et essais ,Détermination des limites d'Atterberg , Limite de liquidité à la coupelle , Limite de plasticité au rouleau.*
- NF P 94-052-1. *Sols reconnaissance et essais , Détermination des limites d'Atterberg ,Partie 1 Limite de liquidité , Méthode du cône de pénétration.*
- NF P 94-053. *Sols reconnaissance et essais , Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire , Méthodes de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau. .*
- NF P 94-054. *Sols reconnaissance et essais ,Détermination de la masse volumique des particules solides des sols ,Méthode du pycnomètre à eau. .*
- NF P 94-059. *Sols reconnaissance et essais ,Détermination des masses volumiques minimale et maximale des sols non cohérents.*
- NF P 94-068. *Sols reconnaissance et essais ,Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux , Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche.*
- Nimbalkar, C. e. (2005). *geotechnique 2005-icevirtuallibrary.com*. Récupéré sur Soil dynamics Das.
- (NF P 94-057). *Sols , reconnaissance et essais , Analyse granulométrique des sols , Méthode par sédimentation. .*
- O,S. (2017-2018). Mémoire de fin d'étude. EFFET DU TRAITEMENT DES SOLS LIMONEUX PAR LA CHAUX SUR LES CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE (pp6-7).
- Osinubi, K. J. (2000). "Laboratory trial of soil stabilization of Nigerian black cotton soils" Nigerian Society of Engineers Technical Transactions, Vol. 35, No 4 pp 13 – 21.

Oriola, F., and Moses, G. (2010). "Groundnut Shell Ash Stabilization of Black Cotton Soil". *Electron Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 15, pp. 415-428.

PAREZ, e. a. (AFNOR en août 1999.). Détermination de la teneur en carbonate ,Méthode du calcimètre. *Sols reconnaissance et essais* (pp11-300).

Radhakrishnan G., R. G. (2010). Study of Consolidation Accelerated by Sand Drains. *Indian Geotechnical Conference* (pp. 313–314.). India.: IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay.

Rhone-Alpes .(2000). Les produits de traitement. *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques Application à la réalisation des remblais et des couches de forme Guide technique* (p. 18).

Sols : reconnaissance et essais , Détermination des limites d'Atterberg , Limite de liquidité à la coupelle , Limite de plasticité au rouleau. (s.d.)

Tremblay H., Duschene J., Locat J., Leroueil S., (2002), Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement, *Canadian Geotechnical Journal*, J.39: pp.535- 546.

WAKIM, J. (2005). thèse de doctorat . Dans *Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses*. france .

XP P 94-060-1. *Sols reconnaissance et essais ,Essai de dessiccation , Partie 1, Détermination conventionnelle de la limite de retrait sur le passant à 400 mm d'un matériau.*

XP P 94-202. *Sols reconnaissance et essais ,Prélèvement des sols et des roches , Méthodologie et procédures.*