



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

Etude de l'influence du gypse sur le
comportement physico-mécanique d'un sol
argileux : (Cas du tronçon d'autoroute Harchoun-
Khemis Miliana du PK-167 au PK-190)

Réalisé par :

Mlle. BOUGUERRA Hadjer
Mlle. MEBDOU Wissam

Déposé le: 22/06/2022

Encadré par :

Dr. GADOURI Hamid	MCA	Université Khemis-Miliana	Promoteur
Dr. MEZIANI Brahim	MCB	Université Khemis-Miliana	Co-promoteur

Expertisé/examiné à distance par :

Dr. HADJ MOHAMED Nacéra	MCB	Université Khemis-Miliana	Présidente
Dr. KELLOUCHE Yasmina	MCA	Université Khemis-Miliana	Examinatrice

Année universitaire : 2021/2022

DEDICACE

*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 mes sœurs Chaima, Hayat, Nour El Houda
Et mes frères Issam et Hamza.*

A toute ma famille paternelle et maternelle

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

Hadjer

DEDICACE

Je tiens à remercier ma mère, mon père et mes frères Ferial

Et Inass.

Je remercie également mon binôme Bouguerra Hadjer pour sa patience et son travail continu pour terminer le travail demandé.

A ceux qui m'ont aidé Younes Fellah et mon oncle Ahmed

Wissam

Remerciements

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, d'avoir nous proposé un sujet ambitieux et motivant, leur appui constant et son encouragements, pour nous avoir fait confiance tout au long de ce projet, pour son encadrement bienveillant et pour ses critiques constructives et son intérêt qu'il a porté tout au long de l'élaboration de ce projet de mémoire.

Egalement, notre profonde gratitude est adresser à notre Co-promoteur de mémoire **Dr. MEZIANI Brahim**, Enseignant chercheur à l'Université de Khemis-Miliana, d'avoir nous aidé dans la réalisation de notre programme expérimentale et son encouragements et ses conseils d'or, pour sa patience, sa générosité et sa disponibilité au cours de notre formation,.

Il nous est agréable de remercier sincèrement **Dr. HADJ MOHAMED Nacéra**, Enseignante chercheur à l'Université de Khemis Miliana d'avoir accepté de présider le jury.

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

Nous tenons à remercier vivement **Mme. BOUMAZONA Hadjer**, Ingénieur Géotechnicienne au sien du laboratoire géotechnique de l'université de Khemis-Miliana pour sa collaboration et son aide à la réalisation du programme expérimental entrepris.

Nous tenons à adresser nos plus vifs remerciements à toutes les personnes qui ont par leurs compétences, leur présence et leurs commentaires, contribué à l'élaboration et à la bonne conduite de ce travail de mémoire.

ملخص

أجريت الدراسة الحالية لتقييم تأثير الجبس المستخدم كمادة مضافة على الخصائص الجيوتقنية (حدود أتربارج وخصائص الضغط) لتربة طينية رمادية مثبتة بالنسب 0, 4 و 8% من الجير. تم إضافة الجبس المستخدم إلى التربة الطينية بنسب مختلفة 0، 2، 4 و 6% نسبة إلى التربة الجافة. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن مؤشر اللدونة انخفض مع زيادة المادة المضافة (الجبس) بمفردها أو بكميات مختلفة مع الجير. ومع ذلك، فإن إضافة الجبس أو الجير إلى عينات التربة الطينية الطبيعية أثبتت تأثيرها الإيجابي من خلال تعديل تصنيفها، خاصة في حالة وجود الجبس. بالإضافة إلى ذلك لوحظ انخفاض في الكثافة الجافة القصوى مع ارتفاع المحتوى المائي الأمثل وهذا بزيادة محتوى الجير بسبب تفاعل التبادل الكاتيوني الذي تسبب بدوره هو الآخر في تلبد (تجمع) جزيئات التربة في الطين المعالج. كما لوحظ أن الكثافة الجافة القصوى تزداد مع زيادة محتوى المادة المضافة المستخدمة بينما نجد أن المحتوى المائي الأمثل يقل مع زيادة محتوى الجير المضاف ولكنه يزداد مع زيادة محتوى الجبس.

الكلمات المفتاحية: تربة طينية رمادية، الجير، الجبس، الخصائص الجيوتقنية، علاج، تبادل الأيونات.

Résumé

La présente étude a été réalisée pour évaluer l'effet du gypse utilisé comme additif sur les propriétés géotechniques (Les limites d'Atterberg et les propriétés de compactage) d'un sol argileux gris (SG) stabilisé avec 0, 4 et 8% de chaux. Le gypse utilisé a été ajouté au (SG) avec 0, 2, 4 et 6% en poids du sol sec. Les résultats obtenus ont montré que l'indice de plasticité (IP) du (SG) diminuait avec l'augmentation de l'additif utilisé (gypse) seul ou avec différentes quantités de chaux. Cependant, l'ajout du gypse ou de la chaux aux échantillons de SG naturel s'est avéré avoir un effet positif en faisant modifier leur classification, notamment dans le cas de la présence de gypse. De plus, la densité sèche maximale (γ_{max}) a diminué et la teneur en eau optimale (ω_{opt}) a augmenté à mesure que la teneur en chaux augmentait en raison de la réaction d'échange cationique qui a provoqué de sa part la floculation des particules du sol argileux traité. En outre, il a été constaté que la (γ_{max}) augmentait avec l'augmentation de la teneur en additif utilisé, tandis que la (ω_{opt}) diminuait avec l'augmentation de la teneur en chaux additionné, mais elle augmentait avec l'augmentation de la teneur en gypse.

Mots-clés : Sol argileux gris (SG) ; Chaux (C) ; Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ; Propriétés géotechniques ; Traitement ; Echange cationique.

Abstract

The present study was carried out to evaluate the effect of gypsum used as an additive on the geotechnical properties (Atterberg limits and compaction properties) of a gray clayey soil (*GS*) stabilized by **0, 4 and 8%** of lime. The gypsum used was added to the (*GS*) by **0, 2, 4 and 6%** by weight of the dry soil. The obtained results showed that the plasticity index (PI) of the (*GS*) decreased with the increase of the additive used (gypsum) alone or with different amounts of lime. However, the addition of gypsum or lime to natural they (*GS*) samples were found to have a positive effect by modifying their classification, especially in the case of the presence of gypsum. In addition, the maximum dry density (γ_{max}) decreased and the optimum moisture content (ω_{opt}) increased as the lime content increased due to the cation exchange reaction which caused the soil particles to flocculate on its part. Furthermore, it was found that the γ_{max} increased with the increase in the content of additive used, while the ω_{opt} decreased with the increase in the content of added lime, but it increased with the increase in the content of gypsum.

Keywords: Gray clayey soil (*GS*); Lime; Gypsum($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); Geotechnical properties; Treatment; Cation exchange.

Table des Matières

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
ملخص	III
Résumé.....	IV
Abstract.....	V
Table des matières.....	VI
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	VIII
Liste des notations.....	IX

Introduction Générale

1 Cadre général de l'étude.....	2
2 Objectifs de recherche.....	2
3 Plan de travail.....	3

Chapitre 1

Techniques d'Amélioration des Sols Instables

1.1 Introduction.....	4
1.2 Définition d'un sol.....	4
1.3 Les mauvais sols	4
1.3.1 Les argiles	5
1.3.2 Les limons	5
1.3.3 Les marnes	5
1.4 Identification et classification des sols	6
1.4.1 Identification des sols	6

1.4.2 Paramètres de nature.....	6
1.4.3 Paramètres d'état	8
1.4.4 Paramètres mécaniques de comportement	9
1.4.5 Paramètres hydrogéologiques	9
1.4.6 Paramètres traduisant la sensibilité ou l'évolution des sols.....	9
1.4.7 Identification des sols médiocres (instables).....	10
1.5 Classification des sols	10
1.5.1 Classification selon la granularité.....	10
1.5.2 Classification en fonction d'autres paramètres.....	12
1.5.3 Classification des sols médiocres.....	12
1.6 Pathologie des sols.....	12
1.6.1 Phénomène de Gonflement.....	12
1.6.2 Définition des argiles.....	13
1.6.3 Minéralogie des argiles.....	13
1.6.4 Structure cristallographique et principaux types d'argiles.....	13
1.6.4.1 Les structures tétraédriques.....	14
1.6.4.2 Les structures octaédriques.....	15
1.6.5 Les principaux types de minéraux argileux.....	15
1.6.6 Tassements.....	16
1.6.7 Glissements.....	16
1.7 Quelques cas pathologiques.....	17
1.7.1 Cas des bâtiments	17
1.7.2 Cas des chaussées.....	18
1.7.3 Cas des voiries et des réseaux divers.....	18
1.7.4 Cas des tunnels.....	19
1.8 Quelques techniques d'amélioration des sols.....	20
1.8.1 Amélioration par remplacement du sol.....	20
1.8.2 Compactage de surface.....	21
1.8.3 Compactage dynamique.....	23
1.8.4 Vibro-compactage.....	25
1.8.5 Pré-chargement ou pré-compression.....	26
1.8.6 Accélération de la consolidation par les drains verticaux.....	26

1.8.7 Inclusion rigide.....	27
1.8.8 Colonne ballastées.....	28
1.8.9 Méthodes chimiques.....	28
1.9 Conclusion.....	28

Chapitre 2

Les éléments perturbateurs et leurs effets sur les sols améliorés

2.1 Introduction.....	32
2.2 Les produits de traitement (les additifs).....	32
2.2.1 Le gypse.....	32
2.2.1.1 Le gypse naturel.....	33
2.2.1.2 Le gypse synthétique.....	34
2.2.1.3 Caractérisation de gypse.....	34
2.2.2 La chaux.....	34
2.2.3 Les ciments.....	35
2.3 Les éléments perturbateurs.....	36
2.3.1 Définition d'un élément perturbateur.....	36
2.3.1.1 La matière organique.....	36
2.3.1.2 Les chlorures.....	37
2.3.1.3 Les phosphates.....	37
2.3.1.4 Les nitrates.....	38
2.4 Effets des additifs sur les sols améliorés avec et en absence des perturbateurs.....	38
2.4.1 Effet de la chaux.....	38
2.4.1.1 Plasticité.....	36
2.4.1.2 Compactage.....	41
2.4.1.3 La résistance au cisaillement.....	42
2.4.2. Effet de ciment.....	44
2.4.2.1 Plasticités	44
2.4.2.2 Compactage.....	45
2.4.2.3 La résistance au cisaillement.....	47
2.4.3 Effet de gypse.....	48
2.5 Conclusion.....	49

Chapitre 3

Etude Expérimentale

3.1 Introduction.....	51
3.2 Matériaux utilisés et préparation.....	51
3.2.1 Sols naturels.....	51
3.2.1.1 Lieu de prélèvement.....	51
3.2.1.2 Préparation.....	52
3.2.1.3 Identification et caractérisation.....	52
3.2.2 Chaux.....	54
3.2.2.1 Définition	54
3.2.2.2 Chaux utilisée	55
3.2.3 Produits chimiques	56
3.3 Déroulement des essais.....	57
3.3.1 Combinaison des échantillons.....	57
3.3.2 Propriétés étudiées.....	58
3.3.2.1 Limites d'Atterberg.....	58
3.2.2.1.1 Principe des limites d'Atterberg.....	58
3.2.2.1.2 Détermination de la limite de liquidité.....	59
3.2.2.1.3 Détermination de la limite de plasticité.....	60
3.3.2.1.4 Détermination de l'indice de plasticité.....	61
3.3.2.2 Compactage.....	61
3.3.2.2.1 Principe de l'essai.....	61
3.3.2.2.2 Détermination de la densité sèche.....	65
3.3.2.2.3 Détermination de la teneur en eau.....	65
3.4 Conclusion	66

Chapitre 4

Présentation et interprétation des résultats obtenus

4.1 Introduction.....	68
4.2 Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg	68
4.2.1 Effet sur la limite de liquidité et de plasticité.....	68
4.2.2 Effet sur l'indice de plasticité.....	69
4.3 Effet de la chaux sur les propriétés de compactage.....	70
4.3.1 Effet sur la teneur en eau optimale.....	70
4.3.2 Effet sur la densité sèche maximale.....	71
4.4 Effet de Gypse sur les limites d'Atterberg.....	72
4.4.1 Effet sur la limite de liquidité et de plasticité.....	72
4.4.2 Effet sur l'indice de plasticité.....	72
4.5 Effet de gypse sur les propriétés de compactage	73
4.5.1 Effet sur la teneur en eau optimale.....	73
4.5.2 Effet sur la densité sèche maximale.....	74
4.6 Effet de gypse et de la chaux sur la classification du sol traité.....	75
4.7 Conclusion.....	76

Conclusions Générales

1 Conclusions générales.....	79
2 Recommandations.....	80
3 Perspectives.....	81
Références Bibliographiques.....	83
Annexes.....	-

Liste des figures

Fig. 1.1 — Schéma des relations entre les paramètres de nature et d'état du sol (XP P 94-011)	07
Fig. 1.2 — Classification triangulaire, (XP P 94-011)	10
Fig. 1.3 — Structure du tétraèdre, (a) : Tétraèdre de silice (Grim, 1959), (b) : vue isométrique d'un feuillet de silice en tétraèdre (Grim, 1959), (c) : schéma du feuillet de silice (Lambe, 1953).....	13
Fig. 1.4 — Structure de l'octaèdre, (a) : octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (Grim, 1959), (b) : vue isométrique d'un feuillet en octaèdre (Grim, 1959), (c) : schéma du feuillet en octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (Lambe, 1953)	14
Fig. 1.5 — Structure des feuillets de kaolinite et de montmorillonite (Mitchell, 1976).....	15
Fig. 1.6 — Dommages structurels dus au soulèvement de terrain au Maroc.....	16
Fig. 1.7 — Formes et directions de fissuration, (Mouroux et al, 1987).....	17
Fig. 1.8 — fissuration longitudinale due au retrait-gonflement de sol (A) en France (B) en Madagascar.....	17
Fig. 1.9 — Comportement d'un tunnel en milieu gonflant	19
Fig. 1.10 —Stabilisation par compactage de surface (cas d'une digue de barrage en terre de Kef-Eddir construit à Tipaza en 2009, Algérie) (hamid, 2017).....	21
Fig. 1.11 — Compactage de surface aux références de compactage d'une chaussée routière.....	22
Fig. 1.12 —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).....	23
Fig. 1.13 — Maillage du compactage dynamique.....	24
Fig. 1.14 — Densification par vibro-compactage (Cas d'un sable lâche ayant 5m d'épaisseur d'un hall industriel construit en Belgique). (Gadouri, 2017).....	25
Fig. 1.15 — Amélioration d'un sol mou par la technique de pré-chargement (Gadouri, 2017).....	26
Fig. 1.16 — Amélioration des sols 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).....	27
Fig. 1.17 — Principe de renforcement des sols compressibles par inclusion rigide. (Gadouri, 2017).....	27

Fig. 1.18 — Principe de renforcement des sols par colonnes ballastées. (Gadouri, 2017).....	28
Fig. 2.1 — Effet du dosage en chaux sur les limites d'Atterberg de l'argile (Rogers et Glendenning, 1996).....	37
Fig. 2.2 — Effet des sulfates monovalents et divalents sur les limites d'Atterberg d'une Kaolinite traitée à 6% chaux, (Kinuthia et al, 1999).	38
Fig 2.3 —Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage Bulletin CRR, Cité par (AZZOUZ, 2006).....	40
Fig 2.4 — 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 eau Optimale, (Kinuthia et al, 1999).....	40
Fig 2.5 —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).....	41
Fig. 2.6 —Variation des limites d'Atterberg avec l'addition du ciment (Portelinha et al, 2012).....	42
Fig 2.7 — Effet du ciment sur les limites d'Atterberg d'un sol peu plastique, (Asgari et al, 2015).....	43
Fig 2.8 — Evolution des caractéristiques de compactage (Al-Homidy et al, 2016).....	44
Fig 2.9 —Variation de la résistance au cisaillement d'une argile organique très plastique Traitée au ciment après différentes périodes de cure, (A) : sol non traité, (B) : sol traité avec 10% de ciment, (Ho and Chan, 2011).....	45
Fig.2.10 —Effet apporté par l'utilisation de gypse comme additif sur la résistance à la Compression non confinée d'un sol peu plastique traité à la chaux, (Aldaood et al, 2014). 46	
Fig. 3.1 -Prélèvement du sol argileux gris (SG) à partir d'un projet de remblai (Haouche El-Ghaba).....	48
Fig.3.2 -Moyens utilisés pour la préparation des sols, (a) : concasseur, (b) : broyeur	49
Fig. 3.3 — Préparation de sol pour les essais au laboratoire, (a) : Sol après concassage, (b) : Sol après broyage et tamisage au tamis 1 mm.....	49
Fig. 3.4 — Le diagramme diffractométrique présentant la composition minéralogique du sol étudié (argile gris).....	51

Fig. 3.5 — Cycle de production de la chaux.....	52
Fig. 3.6 — Emballage utilisé pour la Chaux vive de Saïda.....	53
Fig. 3.7 — Gypse utilisée dans l'étude expérimentale.....	54
Fig. 3.8 — 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 Lèves à 13mm (c) : prélèvement d'échantillon et dessiccation à l'étuve.....	57
Fig. 3.9 — 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.....	58
Fig. 3.10 — Préparation de la prise d'essai de compactage.....	60
Fig. 3.11 — compactage du sol.....	61
Fig.3.12 — Organigramme des essais prévus à effectuer au laboratoire.....	62
Fig. 4.1 — Effet de différent pourcentage de la chaux sur WL et WP de sol gris argileux.....	65
Fig. 4.2 — Effet de différents pourcentages de la chaux sur l'indice de plasticité du sol gris	65
Fig.4.3 — Effet de changement de l'ajout de la chaux sur la teneur en eau optimale du sol gris.....	67
Fig.4.4 — Effet de différents pourcentages étudié de la chaux sur la densité sèche maximale du sol gris	67
Fig. 4.5 — Effet de différents pourcentages de gypse sur de liquidité et de plasticité de sol gris.....	68
Fig. 4.6 — Effet de différents pourcentages de gypse sur l'indice de plasticité de sol gris étudié.....	69
Fig. 4.7 — Effet de changement de pourcentages de l'ajout de gypse sur la teneur en eau optimale du sol gris.....	70
Fig. 4.8 — Effet de différent pourcentage de gypse sur la densité sèche maximale du sol gris argileux.....	70
Fig. 4.9 — Effets de Gypse sur la classification SG stabilisé à la chaux.....	71

Liste des tableaux

Tableau 1.1 — Profondeur efficace du traitement fonction de l'énergie unitaire du compactage (Jean-Pierre Magnan, 2010).....	25
Tableau 2.1 --- Les perturbateurs et leurs effets cités par le GTS. (LCPC-SETRA, 2000).....	34
Tableau 2.2 --- Effet du sulfate de sodium et de calcium sur limite de liquidité d'une montmorillonite traitée à 6% chaux, (Sivapullaiah et al, 2000).....	39
Tableau 3.1 — Caractéristiques physico-mécaniques du sol. (Harichane et al. 2011a).....	50
Tableau 3.2 — Propriétés chimiques des sols étudiés. (Harichane et al, 2011a).....	50
Tableau 3.3 — Propriétés minéralogiques des sols étudiés. (Harichane et al, 2011a).....	51
Tableau 3.4 — Propriétés physiques et chimiques des ajouts utilisés. (Harichane et al, 2011b)	53
Tableau 3.5 — Caractéristiques physico-chimiques de gypse utilisée	54
Tableau 3.6 — Combinaisons des échantillons des sols stabilisés avec ou sans présence de gypse pour les limites d'Atterberg et le compactage (en pourcentage).....	54
Tableau 3.7 — Quantités des sols et des additifs utilisés le Gypse avec ou sans la chaux pour les limites d'Atterberg	56
Tableau 3.8 — Quantités des sols et des additifs utilisés le gypse avec ou sans la chaux pour l'essai de compactage.....	59

Liste des abréviations et symboles

W	:	%	La teneur en eau
ASTM	:	-	Société américaine pour les essais des matériaux
NF	:	-	Norme française
CaSO ₄ .2H ₂ O	:	-	gypse
Eu	:	T.m	énergie unitaire
Ω_{opt}	:	%	Teneur en eau optimale
Γ_{dmax}	:	KN/m ³	Densité sèche maximale
NC	:	-	Nombre de chocs
P	:	-	la masse volumique humide
e_{min}	:	-	l'indice des vides minimales
e_{max}	:	-	l'indice des vides maximal
ρ_w	:	t/m ³	la masse volumique
ρ_s	:	t/m ³	la masse volumique des particules
IP	:	%	L'indice de plasticité
W _P	:	%	limites de plasticité
W _L	:	%	limites de liquidité
C _U	:	mm	le facteur d'uniformité
D _{max}	:	mm	la dimension des plus gros éléments
CaCO	:	-	Carbonate de calcium
LCPC	:	-	Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées

Introduction Générale

- 1. Cadre général de l'étude*
- 2. Objectifs de recherche*
- 3. Plan de travail*

Introduction générale

L'indisponibilité des sols de bonne qualité pour le développement des réseaux routiers, autoroutes, voies ferrées, zones industrielles et ouvrages hydrauliques impose parfois la construction sur des sols de mauvaises qualités (argile gonflante, tourbe, sol organique ...etc.).

Tous ces sols ont une plasticité élevée avec une faible capacité portante et faible perméabilité, il a donc fallu les améliorer pour les rendre acceptables pour la construction.

Ces limitations peuvent être surmontées en améliorant les caractéristiques techniques des sols par diverses méthodes mécaniques ou chimiques, puis les processus de stabilisation du sol.

D'autre part, l'utilisation d'additifs minéraux pour stabiliser les sols argileux de nombreux avantages sous trois aspects : technique, économique et écologique. De tels ajouts à la chaux et /ou ciment sont utilisés depuis longtemps comme stabilisateurs de sols comme les cendres volantes, les fumées de silice, le calcaire, les scories... etc.

Par ailleurs, ces ajouts sont généralement ajoutés aux sols argileux pour améliorer leurs propriétés géotechniques (physiques et mécaniques). Ce procédé est utile pour réduire la plasticité et augmenter la résistance du sol argileux étudié.

En revanche, la présence de certains composés chimiques dans les stabilisants (additifs minéraux), le sol, l'eau de gâchage et/ou dans la nappe phréatique présente des effets complexes liés à la perturbation des échanges cationiques et aux interactions pouzzolaniques alors se sont des (perturbateurs).

L'importance de cette perturbation augmente de plus en plus et elle est causée par plusieurs facteurs, à savoir : la nature du sol décanté, le type et la concentration des composés chimiques intervenant dans le régime décanté, la dose et le type de liant utilisé, la température de conservation et enfin la période de transformation.

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.

❖ Objectifs du travail

Les objectifs visés par ce travail sont :

L'objectif principal de ce mémoire de Master est d'étudier l'influence et les changements apportés par l'addition du gypse/chaux, en tant qu'un additif minéral, sur certaines propriétés

Géotechniques des sols argileux provenant du tronçon d'autoroute Est-Ouest reliant la ville de Harchoun et celle de Khmis-Miliana.

❖ **Plan de travail**

Le présent mémoire s'articule sur :

- **Une introduction générale** qui présente la problématique et définit les objectifs à atteindre ;
- **Le premier chapitre**, comporte deux parties, la première partie, donne un aperçu de l'identification et classification des sols pauvres et la deuxième partie est un aperçu sur les différentes techniques d'amélioration des sols.
- **Le deuxième chapitre** présente une revue de la littérature sur les effets de différents additifs minéraux sur les sols stabilisés avec et sans présence de composés chimiques.
- **Le troisième chapitre**, présenter divers matériaux sélectionnés pour notre travail (prélèvement, préparation échantillons et calcul des quantités de matériaux à utiliser...etc.) ainsi que des objectifs et le principe des différents tests prévus.
- **Le quatrième chapitre** présente une discussion des différents résultats expérimentaux des effets et modifications par présence de gypse et de chaux sur les limites d'Atterberg et les propriétés de compactage des sols argileux hyper très plastiques stabilisé avec du gypse et de la chaux.

Enfin, on terminera par un rappel des conclusions générales, recommandations et perspectives pour les futurs travaux de recherche.

Chapitre 1

Techniques d'Amélioration des Sols Instables

- 1.1. *Introduction*
- 1.2. *Définition d'un sol*
- 1.3. *Les mauvais sols*
- 1.4. *Identification des sols*
- 1.5. *Classification des sols*
- 1.6. *Pathologie des sols*
- 1.7. *Quelques cas pathologie*
- 1.8. *Quelques techniques
d'amélioration des sols*
- 1.9. *Conclusion*

1.1 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 construits, qui sont souvent les 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](#)).

1.2 Définition d'un sol

Le sol est un matériau complexe et variable. Il est hétérogène minérale et organique et est constitué de grains et de pores. Le sol est donc un matériau à trois phases, phase solide, phase liquide, phase gazeuse.

Chaque phase joue un rôle bien précis dans le comportement du sol :

- d'éléments solides : provenant de la désagrégation mécanique et/ou chimique d'une roche mère. On distingue les minéraux non argileux ($>2\mu\text{m}$ et ayant le même comportement que la roche mère : sols pulvérulents), les minéraux argileux (kaolinite, illite et montmorillonite) et les sols organiques (vases et tourbes)
- d'eau : existe sous plusieurs formes (eau de constitution, eau inter feuilletée et libre).
- de gaz : contenu dans les vides. C'est l'air pour un sol sec ou mélange d'air et de vapeur d'eau un sol humide ([Meftah, 2008](#)).

1.3 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.

1.3.1 Les argiles

Les argiles sont des roches sédimentaires à grains fins, de taille inférieure à 5µm, 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 leur qualités d'absorption.

Elles absorbent l'eau et forment une pâte imperméable (perméabilité inférieure à 0,2 mm /h), appelée couramment terre glaise, colorée par des oxydes de fer en ocre, rouge, vert, Les argiles peuvent être gonflantes, notamment celles de la famille des Montmorillonites lorsqu'elles absorbent 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.

1.3.2 Les limons

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.

1.3.3 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.

D'une façon générale, les marnes sont une assise de fondations très bonne en l'absence du gypse. En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse, avec risque de formation de Karsts.

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

Nous pouvons conclure que l'évolution des sols fins est due à la présence des minéraux argileux dans les sols tels que : les marnes, les argiles... etc., qui manifestent une grande sensibilité à l'air (retrait, fissuration désagrégation progressive des couches de sols) et une forte affinité à l'adsorption de l'eau (gonflement, déconsolidation, perte des caractéristiques mécaniques). (Gadouri, 2017).

1.4 Identification et Classification des sols

1.4.1 Identification des sols

Les paramètres servant à identifier un sol sont issus d'analyses 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.

1.4.2 Paramètres de nature

a) Constituants minéraux et organiques

➤ Carbonatés

La teneur en carbonates C_{ca} est obtenue à partir de l'essai décrit dans la norme (NF P 94-048)

➤ Matières organiques

Les essais permettant de déterminer une teneur en matières organiques font l'objet des normes (NF P 94-055, P 94-058 et XP P 94-047)

- **Autres** (silicates, etc.).

b) Granularité

La détermination de la granularité se fait par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments sont supérieurs à 80 µm (NF P 94-056) et par sédimentation pour les éléments inférieurs ou égaux à 80 µm (NF P 94-057).

Elle comporte ;

- La recherche de la dimension des plus gros éléments contenus dans le sol (d_{max}) ;
- 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 :

- Le pourcentage de tamisât à 2 mm, à 80 µm ;
- Les dimensions d_N pour N fixé
- Le facteur d'uniformité

$$(C_U = d_{60}/d_{10}) \quad (1.1)$$

- Le facteur de courbure

$$C_C = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}} = \left(\frac{d_{30}}{d_{60}}\right)^2 C_U \quad (1.2)$$

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 inférieur ou « gale à d.

c) Limites d'Atterberg :

Les limites de liquidité W_L (NF P 94-051 – NF P 94-052-1), de plasticité W_P (NF P 94-052), 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 ;

d) Plasticité :

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

$$I_P = W_L - W_P \quad (1.3)$$

e) 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) ;

f) La masse volumique des particules ρ_s (NF P 94-054) ;

g) La masse volumique ρ_w de l'eau interstitielle ;

h) L'indice des vides maximal e_{\max} , indice des vides minimal e_{\min} .

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

i) Equivalent de sable E_s .

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 5mm (P 18-598).

1.4.3 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.

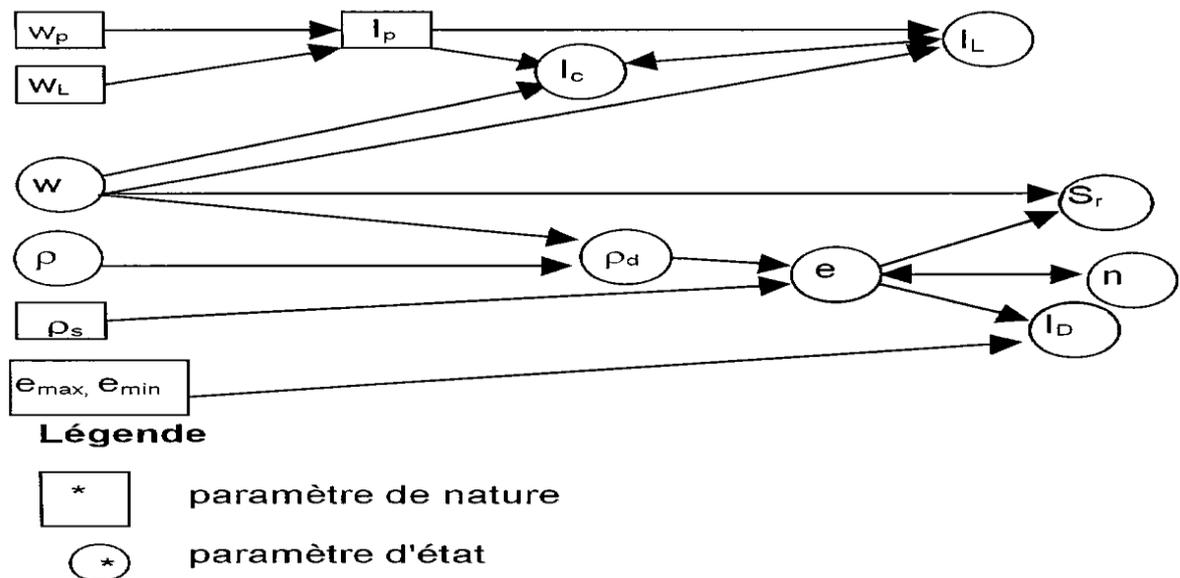


Figure 1.1 - Schéma des relations entre les paramètres de nature et d'état du sol (XP P 94-011).

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 (NF P 94-049-1 et NF P 94-049-2) ;

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

$$W_{sat} = e * \frac{\rho_w}{\rho_s} \quad (1.4)$$

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

$$I_D = (e_{max} - e) / (e_{max} - e_{min}) \quad (1.5)$$

- l'indice de consistance I_C pour les sols fins :

$$I_C = (W_L - W) / I_P \quad (1.6)$$

1.4.4 Paramètres mécaniques de comportement

Les caractéristiques mécaniques sont déterminées :

- soit directement en place :
- pression limite P_1 et module pressiométrique E_M (NF P 94-110) ;
 - résistance statique de pointe q_c mesurée au pénétromètre statique (NF P 94-114) ;
 - déformabilité issue d'essai à la plaque ;
 - 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 (XP P 94-090-1) ;

- La cohésion effective et l'angle de frottement interne (NF P 94-074 et NF P 94-071) ;
- La résistance à la compression uniaxiale R_C (NF P 94-077) ;
- Le gonflement (XP P 94-091) ;
- Le comportement à la dessiccation (XP P 94-060-2) ;
- La cohésion non drainée c_u obtenue à partir d'essais de cisaillement à l'appareil triaxial (NF P 94-074) ou au scissomètre de laboratoire (NF P 94-072).

1.4.5 Paramètres hydrogéologiques

La perméabilité est déduite d'essais en place (NF P 94-130, NF P 94-132) ou en laboratoire.

Les principaux paramètres régissant l'écoulement des eaux souterraines sont la transmissivité, la perméabilité, le coefficient d'emmagasinement et la porosité efficace. Certains paramètres sont indispensables pour connaître les débits exploitables par un forage. Ils peuvent être déterminés au laboratoire ou sur le terrain. Notamment lors de test de pompages dans un puits.

1.4.6 Paramètres traduisant la sensibilité ou l'évolution des sols

- la solubilité ;
- la sensibilité (aux chocs mécaniques, au remaniement, etc.) ;

- la gélivité ;
- la dégradabilité (NF P 94-067)
- la décomposition des sols organiques (NF P 94-058)

1.4.7 Identification des sols médiocres (instables)

Les sols fins mous sont souvent soumis à des contraintes, ce qui entraîne diverses déformations sous charges imposées, et leur capacité portante est trop faible pour supporter, à savoir des tassements excessifs et une instabilité de travail

1.5 Classification des sols

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 sont 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.

1.5.1 Classification selon la granularité

— 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 1.2). 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.

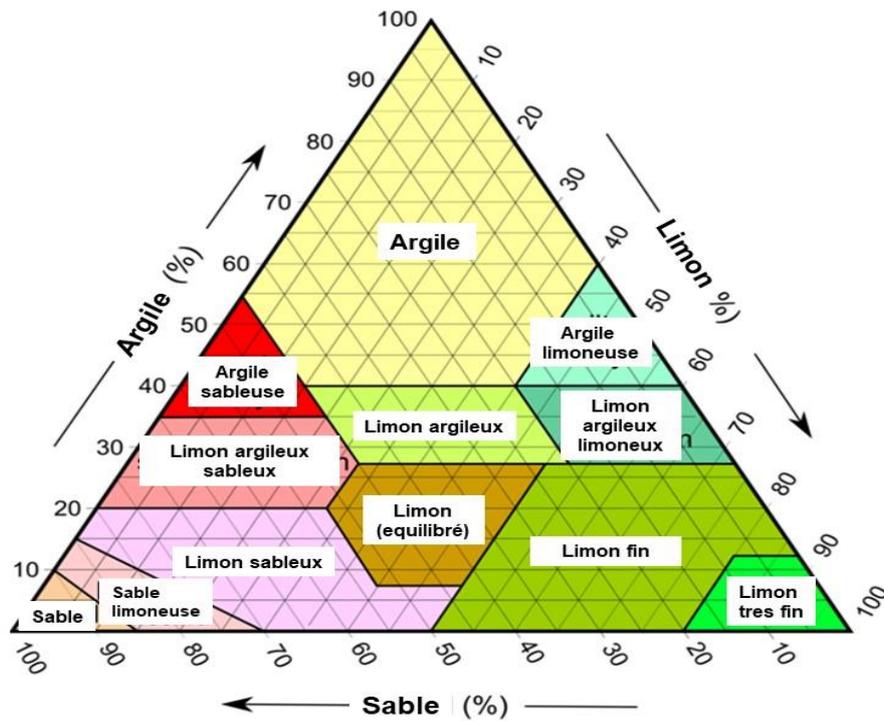


Figure 1.2 - Classification triangulaire, (XP P 94-011)

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 (XP P 18-540) ;
- Classification des matériaux à usage routier (NF P 11-300)

1.5.2 Classification en fonction d'autres paramètres

- **Selon la teneur en matières organiques** (NF P 11-300). Elle fournit une classification des sols organiques et des sols non organiques.
- **Selon la sismicité** (XP ENV 1998-1-1). Elle donne une classification des sols de fondation.
- **Selon la valeur de bleu du sol** (NF P 11-300).

1.5.3 Classification des sols médiocres

Les sols fins en générale et l'argile en particulier sont constitués de minéraux qui se trouvent dans le sol et ces composants sont : l'alumine, la silice ainsi que l'eau, et parmi d'autres matériaux l'oxyde de fer, la chaux et les matières organiques ... la substance argileuse a fait l'objet de nombreux travaux sur sa nature minérale, si bien que l'on distingue trois grands types d'argiles : la kaolinite, la smectite et l'illite, de sorte que la proportion de chacune varie selon le sol.

1.6 Pathologie des sols

1.6.1 Phénomène de Gonflement

En Algérie l'urbanisation de certains quartiers des villes et la construction des routes se heurtent aux problèmes que posent les gonflements, tassement, et de glissement.

Ce phénomène est lié au changement d'humidité de certains sols très argileux ou tourbeux qui sont capables de fixer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse. Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes et varient en fonction de leur teneur en eau), la variation de volume d'un terrain est consécutif à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle) et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'élément jointifs).

1.6.2 Définition des argiles

Les argiles sont très abondantes dans la nature et couvrent environ 42% du volume de l'écorce terrestre (Levêque, 1984).

Il n'existe pas de définition unique du terme «argile ». Le mot «argile» englobe deux connotations dont l'une liée à la taille des grains et l'autre à la minéralogie. La définition dépend de la discipline concernée.

Le géologue ou le pédologue considère comme «argile» tout minéral de faible granulométrie, la limite étant fixée à 2 ou 4 microns selon les cas (Caillère et al, 1982).

Les céramistes définissant l'argile comme une matière première qui, en présence d'eau, forme une pâte plastique qui durcit après cuisson (Voinovich, 1971).

Pour l'ingénieur du génie civil, le sol argileux désigne un sol qui contient un certain pourcentage de minéraux et dont le comportement est influencé par la présence de ces derniers. Un sol argileux est un sol fin, plastique et cohérent, actif sur le plan électrochimique et dont le comportement est très sensible à la présence de l'eau. L'influence de la proportion en argiles sur les propriétés du sol augmente avec la quantité d'eau. Lorsque la quantité d'argile excède 50% en masse, le comportement du mélange est gouverné par l'effet d'argile (Khattab, 2007).

En géotechnique les sols sont classés suivant leur granulométrie tous sols dont le diamètre moyen est $< 20 \mu\text{m}$ est dit sol argileux ce pendant les tailles particules n'est pas suffisante pour dire que c'est une argile, il faut aussi que ce soit minéralogiquement un phyllo-silicate (texture en feuillets).

1.6.3 Minéralogie des argiles

Les argiles sont les produits de décomposition des roches siliceuses par désagrégation physique et mécanique puis par altération chimique. La famille des minéraux argileux regroupe tous les silicates hydratés appartenant au groupe des phyllo-silicates. Les minéraux argileux sont assimilés à des colloïdes, ce qui signifie qu'ils sont capables de fixer facilement de grandes quantités de phase liquide continue (Caillère et al, 1982).

1.6.4 Structure cristallographique et principaux types d'argiles

L'argile n'est pas un matériau que l'on peut définir par le seul caractère granulométrique de 2 microns, il existe d'une part des roches argileuses compactes (comme les argiles de certaines Marnes) et d'autres part des minéraux très fins qui n'ont pas les propriétés caractéristiques de l'argile.

On ne peut non plus le faire en le considérant seulement comme une roche sédimentaire plus au moins cohérente qui avec l'eau forme une pâte.

En effet, l'argile est une entité minéralogique réelle, caractérisée à la fois par :

- Sa nature chimique (silicate d'aluminium hydraté)
- Sa structure phylliteuse ;
- Son comportement avec l'eau (gonflement, dispersion, hydratation...) (Grim, 1962 ; Mitchell, 1976).

Les chercheurs ont observé qu'il n'existait que deux structures fondamentales :

- Les structures fondamentales tétraédriques ;
- Les structures fondamentales octaédriques.

1.6.4.1 Les structures tétraédriques

Les tétraèdres sont liés ensemble par leurs bases en partageant un ion d'oxygène entre deux tétraèdres pour former une couche tétraédrique (**Fig 1. 3**). La formule générale de cet ensemble est $n [(Si_2O_5)]$.

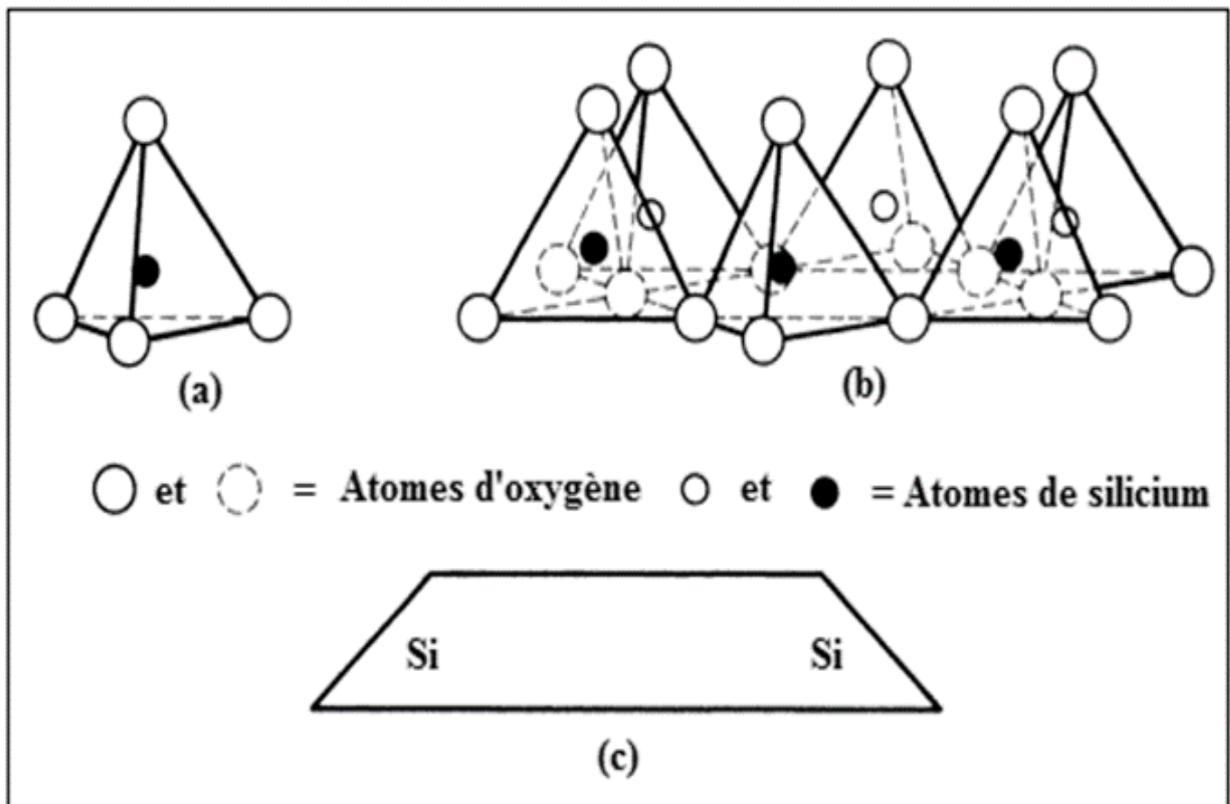


Figure 1.3 - Structure du tétraèdre, (a) : Tétraèdre de silice (Grim, 1959), (b) : vue isométrique d'un feuillet de silice en tétraèdre (Grim, 1959), (c) : schéma du feuillet de silice (Lambe, 1953).

1.6.4.2 Les structures octaédriques

Les unités octaédriques sont liées ensembles de telle sorte que chaque groupement fonctionnel (OH) est partagé entre 3 unités octaédriques. La formule générale de ce groupement est $n [(Al_2(OH)_6)]$ ou $n [Mg_3(OH)_6]$. (**Fig 1. 4**).

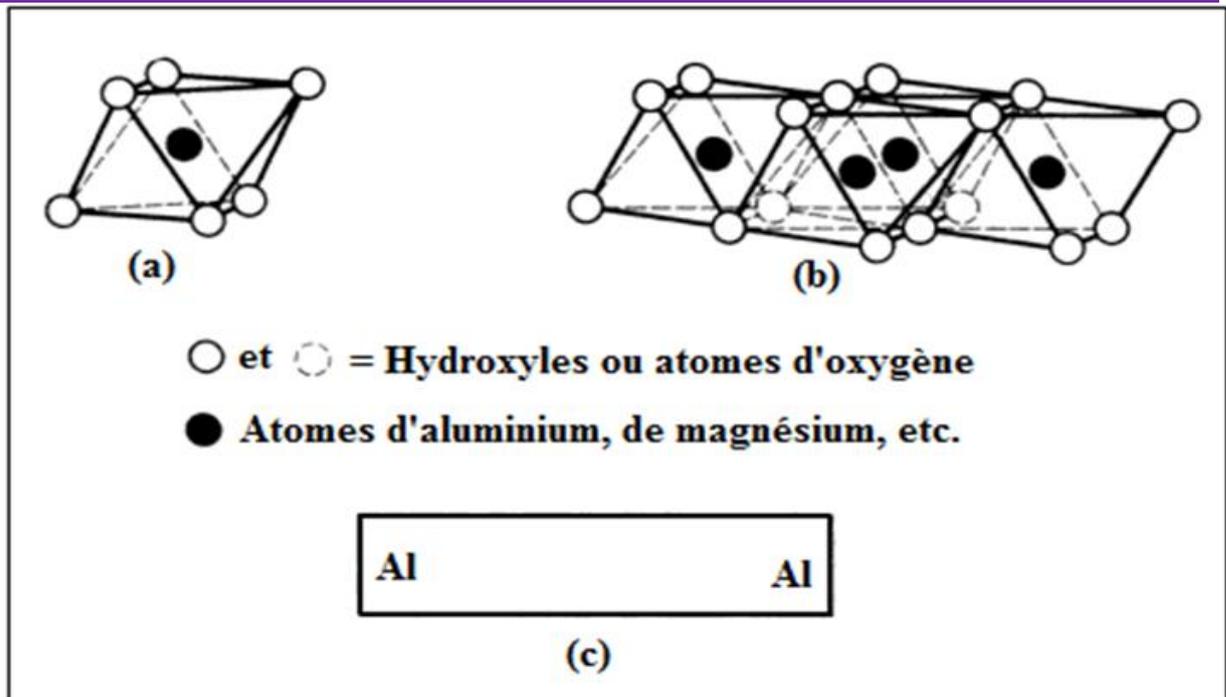


Figure 1.4 - Structure de l'octaèdre, (a) : octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (Grim, 1959), (b) : vue isométrique d'un feuillet en octaèdre (Grim, 1959), (c) : schéma du feuillet en octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (Lambe, 1953).

1.6.5 Les principaux types de minéraux argileux

Parmi les minéraux argileux, les plus connus sont ;

- ❖ La Kaolinite : (Fig 1 .5). Pas de substitution dans les couches. Le feuillet est neutre. La kaolinite se forme dans les sols bien drainés. Par PH acide. Sur tout en climat subtropical et tropical. Ses cristaux sont souvent grands pouvant atteindre 15µm.
- ❖ Les Illites : association d'un feuillet O (alumineux) et deux feuillets T (siliceux). Il peut y avoir des substitutions (remplacement de Si par Al). Des cations (K^+) sont adsorbés dans l'espace inter foliaire afin de compenser le déséquilibre des charges. C'est le minéral ubiquiste par excellence. Sa structure est proche de la muscovite (présentant plus d'eau et moins de K^+).
- ❖ Les Smectites : (Fig 1 .5) l'empilement des feuillets est désordonné ; chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent. Les substitutions d'atomes sont importantes. Ce désordre et la faible charge des feuillets facilitent leur écartement et l'adsorption des molécules variées (eau, cations, molécules organiques). Les smectites,

Ou montmorillonites, sont généralement calciques, plus rarement sodiques. Elles sont formées dans les sols mal drainés plutôt alcalins. Les feuillets de smectites peuvent s'intercaler régulièrement ou irrégulièrement avec d'autres feuillets argileux, souvent illitiques. L'ensemble forme des inter- stratifiés.

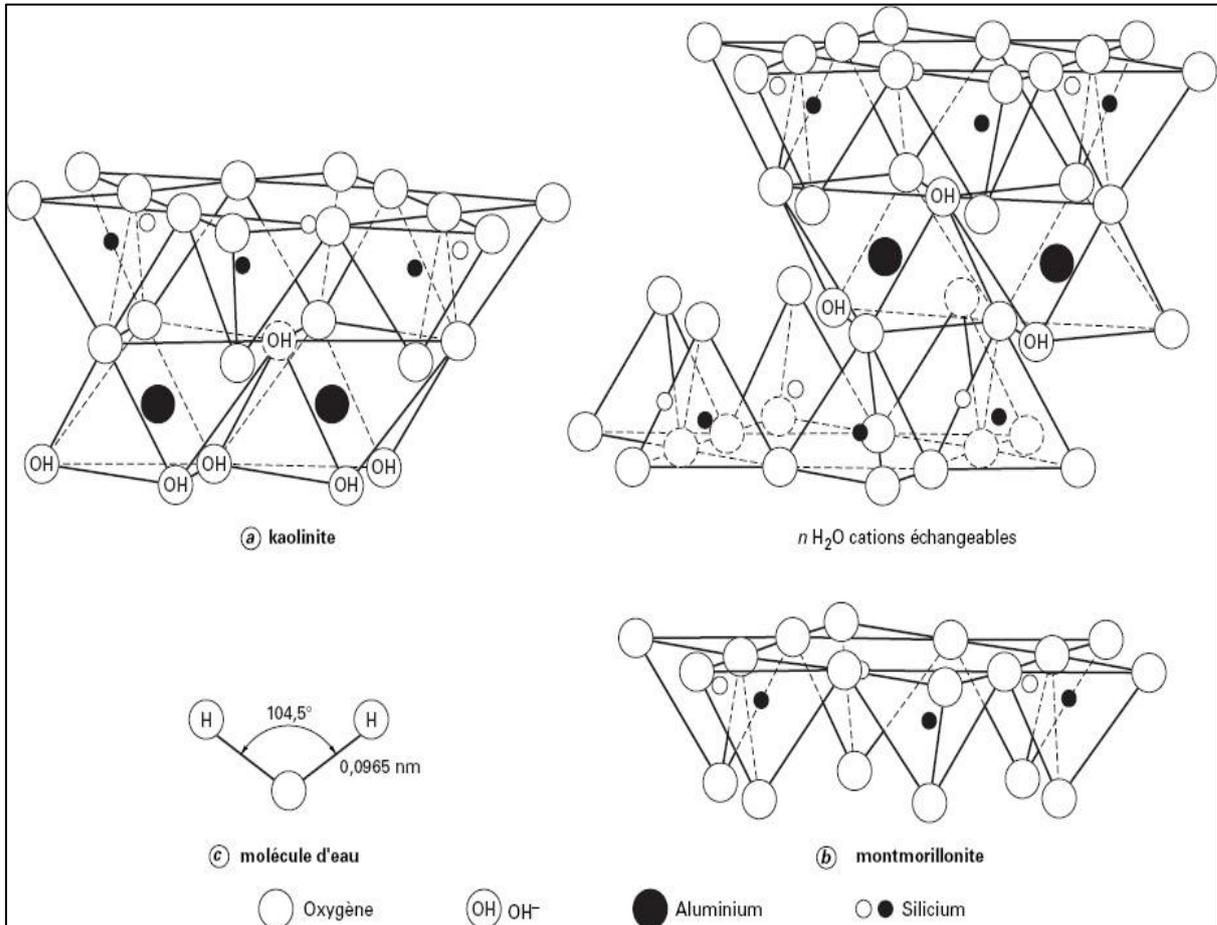


Figure 1.5 - Structure des feuillets de kaolinite et de montmorillonite (Mitchell, 1976)

1.6.6 Tassements

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

1.6.7 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.

1.7 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.

1.7.1 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.



Figure 1.6 - Dommages structuraux dus au soulèvement de terrain (Cas du Maroc).

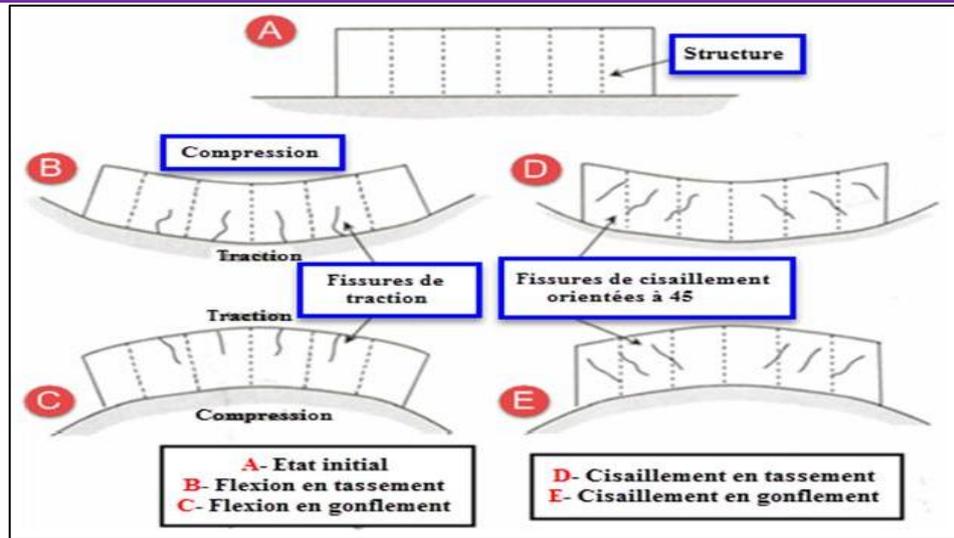


Figure 1.7 - Formes et directions de fissuration, (Mouroux et al, 1987).

1.7.2 Cas des chaussées

La figure (1.8) montre deux exemples de routes fissurées par l'effet du retrait et gonflement du sol de fondation argileux.

La position des fissures dépend de l'étendue de la zone atteinte par les variations de teneur en eau lors des cycles de sécheresse et d'humidification.



Figure 1.8 - Affaissement d'une chaussée routière- Tizi Ouzou (2016)

1.7.3 Cas des voiries et des réseaux divers

Les dommages touchent également les voiries et réseau divers. Les réseaux de drainages peuvent par exemple subir des inversions de pente qui provoquent le débordement des drains alimentant de cette façon le phénomène de gonflement, (Mouroux et al, 1987).

Les principaux facteurs déclenchent le gonflement des ouvrages superficiels sont les suivants :

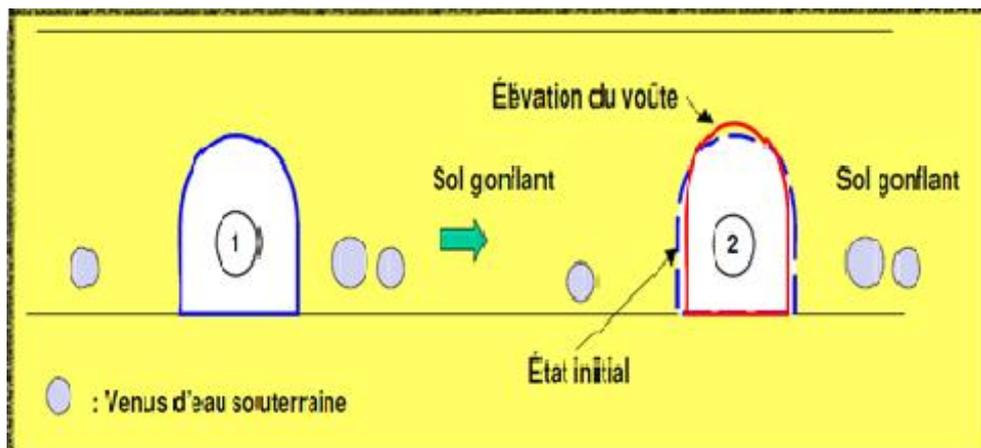
- Les facteurs climatiques (précipitations...)
- La végétation
- L'hydrogéologie
- La topographie (pente, exposition)

1.7.4 Cas des tunnels

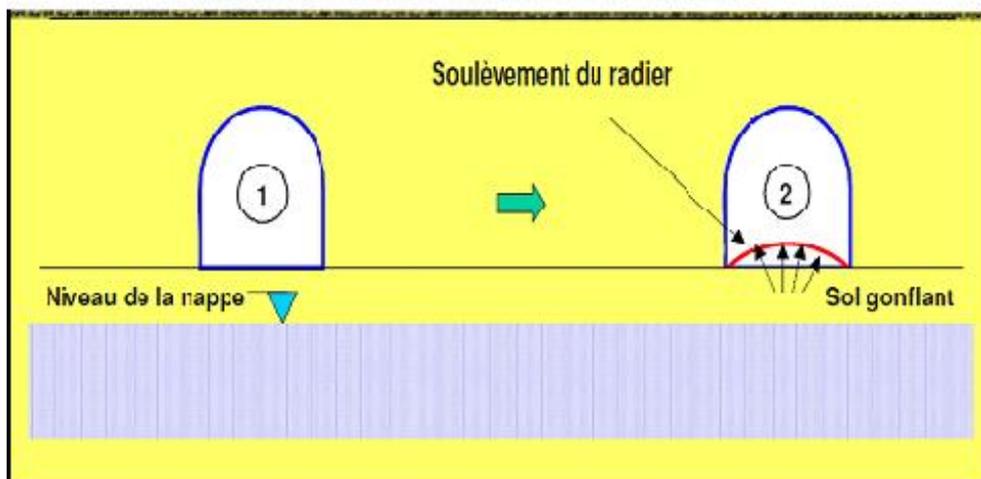
Les tunnels (**Fig 1.9**) en milieu gonflant posent de très importantes difficultés aussi bien lors de leur construction qu'après leur mis en service.

Les désordres caractéristiques qui affectent le plus souvent les tunnels localisés dans un milieu gonflant sont les suivants :

- Soulèvement puis dislocation du radier
- Bombement et convergence des piédroits
- Pincement de la voûte en clé.



Déformation due aux pressions latérales excessives.



Déformation due aux pressions verticales excessives

Figure 1.9 - Comportement d'un tunnel en milieu gonflant.

1.8 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'améliorations 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, vibrocompactage...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, 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.) ;

La résistance au cisaillement des sols compressibles est augmentée pour assurer une meilleure portance. La compressibilité est réduite du fait que la consolidation des sols accélérée dans le cas d'inclusions du gravier ou du sable et une augmentation du coefficient de sécurité à la liquéfaction.

1.8.1 Amélioration par remplacement du sol

D'après ([Gaafer et al, 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 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, (Gabre, 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.

1.8.2 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 1.10 - Stabilisation par compactage de surface (cas d'une digue de barrage en terre de Kef-Eddir construit à Tipaza en 2009, Algérie) (hamid, 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 sols ;
- prévenir la liquéfaction des sols ;
- limiter les variations de volumes indésirables causées, plus souvent, par le phénomène retrait-gonflement.



Figure 1.11 - Compactage de surface aux références de compactage 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 1.7) et Teneur en eau optimale (équation 1.8) déterminées au niveau du laboratoire par l'essai de Proctor modifier(PM) à savoir :

$$\gamma_{dmax} = \frac{P_s}{V} \quad (1.7)$$

$$W_{opt} = \frac{P_w}{P_s} \quad (1.8)$$

Où :

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

γ_{dmax} : Densité sèche maximale (KN/m³)

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 (m³).

Remarque :

Les deux paramètres **Wopt** et γ_{dmax} et le volume **V** sont connus, donc on pourra calculer le poids du sol (**Ps**) et le poids de l'eau (**Pw**) qui correspond aux références de compactage.

La vérification des quantités du sol (**Ps**) et de l'eau (**Pw**) peut se faire par l'utilisation des équations

Suivantes (équations 1.9, 1.10 et 1.11) :

$$Ph = Ps + Pw \quad (1.9)$$

$$\gamma_h = \frac{Ph}{V} \quad (1.10)$$

$$\gamma_{dmax} = \frac{\gamma_h}{1+W_{opt}} \quad (1.11)$$

Où :

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

γ_{dmax} : Poids volumique humide du matériau à utiliser comme remblai (kN/m³).

1.8.3 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 1.12 - 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 pesant de 10 à 35 tonnes, ou voire plus (**Fig1.12**). Les impacts sont répétés selon un maillage défini en fonction du site à traiter et du futur ouvrage (**Fig1.13**). 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.).

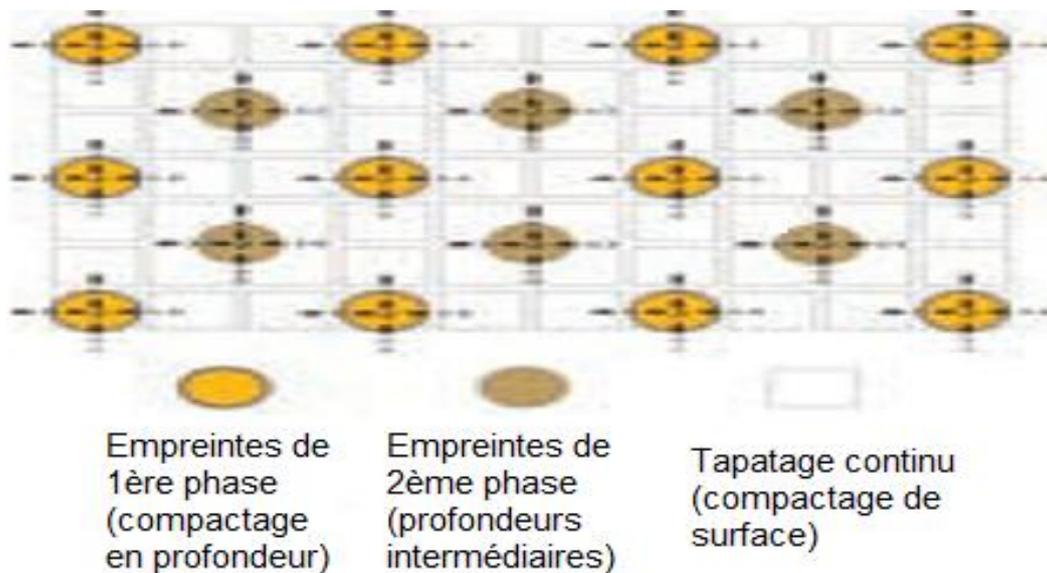


Figure 1.13 - Maillage du compactage dynamique

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 1.1**) dépend de l'énergie unitaire du compactage calculée par l'équation suivante :

$$E_u = W * H$$

(1.12)

Où :

Eu : énergie unitaire (T.m)

W : Poids de la masse (t)

H : Hauteur de chute (m)

Tableau 1.1 - 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

1.8.4 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 : Dr = 60% à 80%



Figure 1.14 - Densification par vibro-compactage (Cas d'un sable lâche ayant 5m d'épaisseur d'un hall industriel construit en Belgique). (Gadouri, 2017).

1.8.5 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.

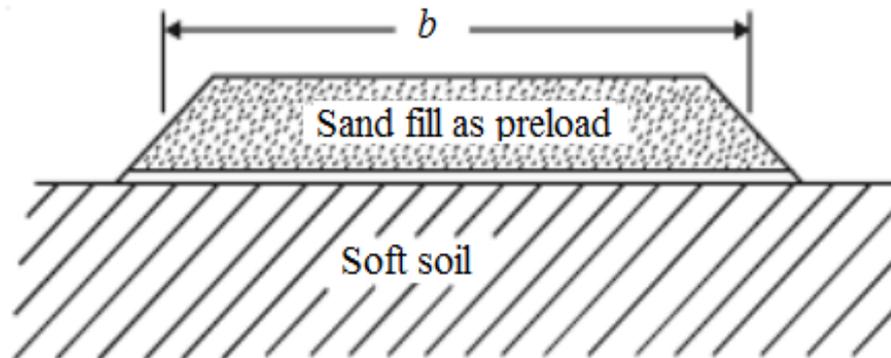


Figure 1.15 - Amélioration d'un sol mou par la technique de pré-chargement (Gadouri, 2017)

1.8.6 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).

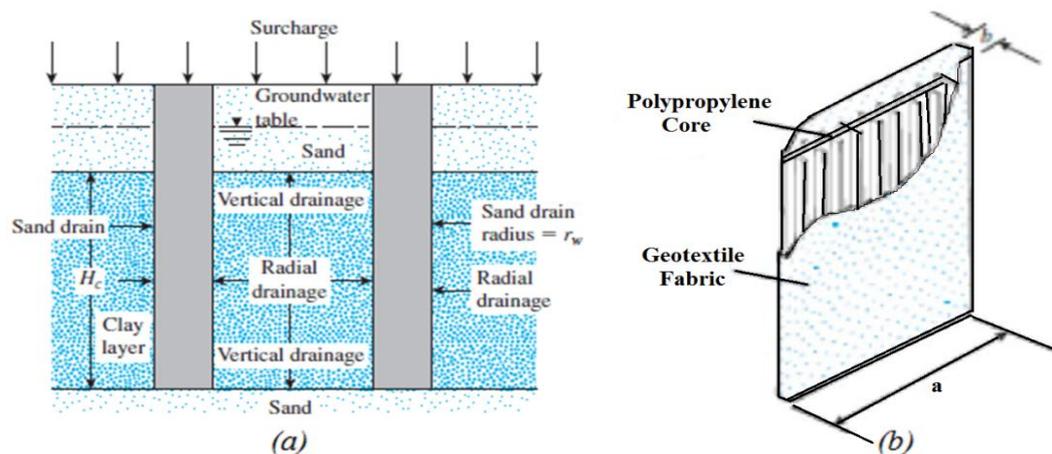


Figure 1.16 - Amélioration des mous par la technique de l'Accélération de la consolidation par les drains verticaux, (a) : drains de sable verticaux, (b) : drains verticaux préfabriqués (Gadouri, 2017).

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.

1.8.7 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.

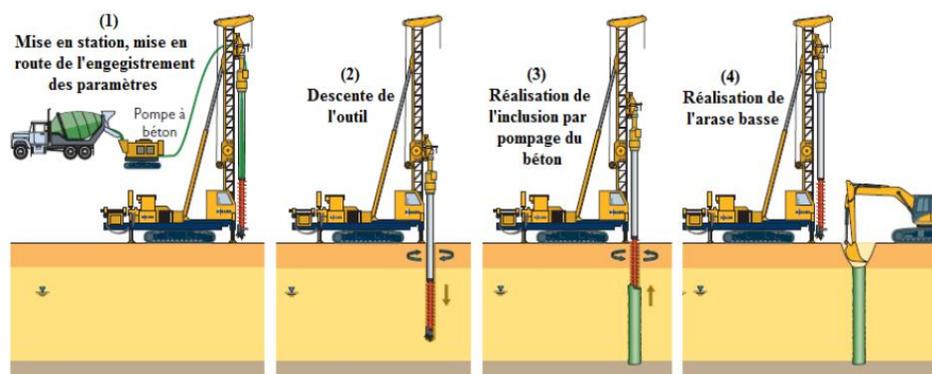


Figure 1.17 - Principe de renforcement des sols compressibles par inclusion rigide. (Gadouri, 2017)

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.

1.8.8 Colonne 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.

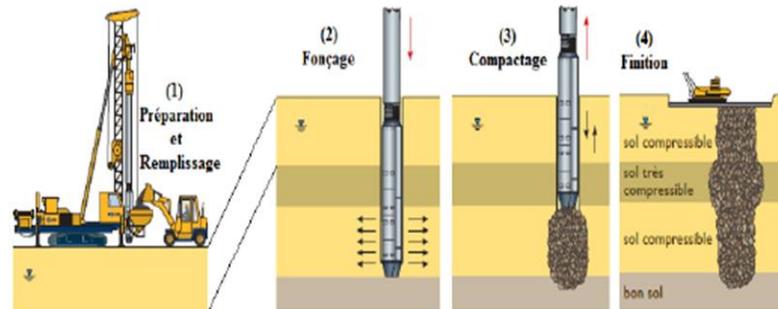


Figure 1.18 - Principe de renforcement des sols par colonnes ballastées. (Gadouri, 2017).

1.8.9 Méthodes chimiques

La stabilisation chimique est une technique intéressante pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux. Aujourd'hui les divers produits et techniques font partie d'une pratique courante des grands ouvrages du Génie Civil à l'échelle mondiale. Le recours massif à cette technique qui valorise les matériaux en place ce qui entraîne une

Diminution notable des coûts est due principalement aux facteurs suivants tels que la raréfaction des gisements naturels de matériaux nobles, le souci écologique croissant imposant de préserver d'une part les ressources naturelles existantes et de limiter d'autre part la mise en dépôt des matériaux impropres à la réutilisation en remblais ou en couches de forme. La stabilisation chimique fait appelle à l'utilisation des additifs minéraux tels que la chaux, le ciment, la fumée de silice...etc.

1.9 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. Dans le chapitre suivant, nous allons traiter les effets apportés par l'addition des additifs minéraux sur le traitement des sols argileux.

Chapitre 2

les éléments perturbateurs et leurs effets sur les sols améliorés

- 2.1. *Introduction***
- 2.2. *Les produits de traitement (les additifs)***
- 2.3. *Les éléments perturbateurs***
- 2.4. *Les effets des additifs sur les sols améliorés avec et en absence des perturbateurs***
- 2.5. *Conclusion***

2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons abordé plusieurs techniques, et maintenant nous nous intéressons à la recherche d'une méthode de traitement du sol par des méthodes physico-mécaniques on utilisant des additifs. Dans cette partie nous allons introduire (gypse, chaux, ciment). Bien que nous le divisions en deux parties

La première partie est dédiée à l'affichage des différents apports minéraux utilisés dans le traitement des sols ainsi que les différents traitements des éléments irritants, puis nous exposons les différents effets provoqués par les apports minéraux et les éléments perturbateurs sur les sols.

2.2 Les produits de traitement (les additifs)

Le traitement des sols au gypse et à la chaux est un exemple typique de la méthode chimique d'améliorer les propriétés physico-mécanique du sol. Le principe de la technologie repose sur processus physico-chimique de la réaction entre la chaux, l'argile, le gypse et les minéraux argileux ajoutés dans les sols traités, entraînant des effets à court terme (améliorer) et à long terme (stabilisation) sur la terre.

En revanche, l'utilisation d'additifs minéraux pour stabiliser les sols argileux est susceptible d'être prometteuse. De tels ajouts au ciment et/ou à la chaux sont utilisés depuis longtemps comme stabilisateurs de sols comme les calcaires, les cendres volantes, fumées de silice, scories ...etc.

Par ailleurs, ces ajouts sont généralement ajoutés aux sols argileux pour améliorer leurs propriétés géotechniques (physique et mécanique). Ce procédé est utile pour réduire la plasticité et augmenter la résistance du sol argileux étudié. D'autre part, le gypse naturel ou synthétiquement modifié peut être utilisé comme additifs minéral pour améliorer les propriétés géotechniques des sols meubles. En fait, il existe peu d'études consacrées à l'étude du comportement physique et mécanique des sols meubles stabilisés au gypse.

2.2.1 Le gypse

Le Gypse constitue la matière première du plâtre qu'on le nomme le : « di-hydrate de sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Déshydraté par une cuisson au four et se transforme en plâtre ou héli-hydrate de sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$).

Les caractéristiques physiques qui sont (la température, la pression et l'environnement...etc. et c'est la structure de l'hémi-hydrate obtenu en (α ou β) vont dépendre des conditions de cuisson.

Le Gypse est constitué essentiellement de Sulfate de Calcium à deux molécules d'eau de formules ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) ce qui correspond à environ 79% de Sulfate de calcium associé à 20.93% d'eau. Le gypse commercial cependant, atteint rarement cette composition théorique car non seulement il contient fréquemment des impuretés de diverses sortes telles que (Calcaire, Argile, Sable, Silice, Magnésie, etc.), mais sa teneur en eau peut également varier (Teoka et al, 2000).

Il existe deux grandes catégories de Gypses qui sont :

- Les Gypses naturels
- Les Gypses synthétiques

2.2.1.1 Le gypse naturel

Le gypse appartient à la famille des évaporites qui sont des roches sédimentaires les plus solubles dans l'eau. On considère généralement que le gypse résulte de l'évaporation de l'eau des lagunes marines sursaturées. Les gisements les plus importants datent de l'ère secondaire ou tertiaire. Le gypse est présenté en quantités relativement importantes dans la nature. Il existe de nombreux gisements dans le monde : en France, au Mexique, en Espagne etc...

Le gypse se cristallise dans le système monoclinique. À l'échelle moléculaire, il présente une structure feuilletée composée d'une couche d'eau et deux couches de sulfate de calcium. Les principales variétés que l'on rencontre dans la nature sont

- ❖ **Sous forme macro cristallisée** : le Gypse lamellaire, le fer de lance et le gypse lenticulaire.
- ❖ **Sous forme micro cristallisée** : l'albâtre, le gypse fibreux, le gypse saccharoïde et le gypse éolien.

Le Gypse exploité dans l'industrie plâtrier est une roche cristallisée à grains généralement fin (gypse saccharoïde). Il est rarement pur à cause des impuretés en nombre et proportion variables d'une carrière à l'autre qui sont argile, calcaire, silice, dolomite, anhydrite, etc...

2.2.1.2 Le gypse synthétique

Le Gypse de synthèse (synthétique) est le produit essentiel d'une réaction chimique industrielle. Sa production est limitée à cause des impuretés ainsi que pour des raisons techniques et économiques (cout de production trop élevé).

Les principales sources de Gypse chimique sont :

- **La fabrication de l'acide phosphorique (phosphogypse)** : par attaque du phosphate naturel.



- **La fabrication d'autres acides minéraux** : (acide borique, brogypse, acide fluorhydrique, fluor Gypse) ou organique, organo-Gypse (acide citrique, tartrique, etc...)



- **La fabrication de l'oxyde de titane (TiO₂)** : conduit également à une production de Gypse appelé titan gypse.
- **La désulfuration des gaz et fumées** : l'oxydation de l'anhydride sulfureux SO₂ (anhydridesulfurique) puis sa réaction avec de la chaux

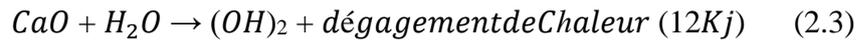
2.2.1.3 Caractérisation de gypse

Le gypse est amorphe et sa densité varie de 2.31 à 2.33. Il est sous forme de cristalline dans les variétés granulaires (saccharoïdes) ou molles (albâtre), dans les grands cristaux prismatiques (pieds à baïonnette ou tiques), en cristaux laminaires ou fibreux. ([Mateau P](#))

2.2.2 La chaux

La chaux est le stabilisant le plus largement utilisé dans la pratique de l'ingénierie depuis les temps les plus reculés et s'applique sur une vaste gamme de sols ([Petry et al, 2002](#)) Elle est considéré comme très efficace pour réduire le potentiel de gonflement et la plasticité et augmenter la maniabilité des sols expansifs. Elle procure également un gain de résistance considérable des sols traités avec le temps.

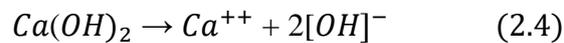
La chaux réagit avec les sols aux niveaux physico-chimique et microstructural elle modifie les propriétés comme mentionné ci-dessus ([Madhyannapu, 2007](#)). La chaux destinée à l'amélioration des sols est généralement utilisée sous forme de chaux vive (CaO) ou de chaux hydratée (Ca(OH)₂). La chaux est également utilisée dans l'agriculture sous forme de calcaire (CaCO₃). La chaux vive (CaO) est fabriquée par des procédés chimiques transformant le carbonate de calcium (Ca CO₃) en oxyde de calcium (CaO). Lorsque la chaux vive réagit avec l'eau, elle se transforme en chaux hydratée comme suit :



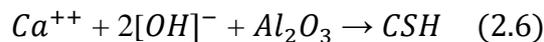
La chaux hydratée ($Ca(OH)_2$) réagit avec les particules d'argile et les transforme en un matériau résistant en raison de réactions chimiques (Rodriguez, 2008), par un processus composé de deux étapes :

- Un échange de cations : une floculation / agglomération entraîne un changement de texture et de plasticité. Les particules de sol floculées sont plus grosses et plus friables.
- Les réactions pouzzolaniques qui dépendent du temps, de sorte que des gains de résistance apparaissent lorsque les particules de sol sont

Cimentées ensemble (Unruh, 2010). Les réactions pouzzolaniques qui se produisent lors de la stabilisation sont les suivantes (Pillappa, 2007) :



(Silice) (gel)



(Alumine) (gel)

La réaction continue de se produire tant que le pH du mélange sol/chaux est suffisamment élevé pour dissoudre les silicates et les aluminates du sol. (Unruh, 2010).

2.2.3 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 (les produits de traitement, 2000).

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 en fin 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 inférieurs à 0.08 mm, surface spécifique (Blaine)

Comprise entre 2800 et 5000 cm² /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 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.

Une préoccupation essentielle dans la fabrication des ciments et la recherche du la plus grandes 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.

2.3 Les éléments perturbateurs

2.3.1 Définition d'un élément perturbateur

Un élément perturbateur peut être défini comme un parasite qui induit des effets néfastes (indésirables) à la cour et après le traitement du sol. Dans certains cas, cet élément perturbateur importe des effets bénéfiques pour les sols. Les composants 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) résume dans **le tableau 2.1** : l'effet de certains éléments perturbateurs sur le traitement des sols aux liants hydrauliques.

Tableau 2.1 : Les perturbateurs et leurs effets cités par le GTS. (LCPC-SETRA, 2000).

Perturbateurs	Effet sur le traitement des sols
Les matières organiques	Consommation des produits de traitement permettant l'augmentation du pH au détriment des réactions de cimentation.
Les sulfures	Formation d'espèces cristallines Provo- quand un gonflement
Les chlorures	Accélérateurs de prise et formation de phases gonflantes.
Les phosphates	Inhibiteurs ou retardateurs de prise.
Les nitrates	Inhibiteurs ou retardateurs de prise

2.3.1.1 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 de protides, lipides et des

Glucides. Parmi les matières organiques produites on cite : 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 (ralentissement de l'hydratation), sans affecter les résistances (Tremblay et al, 2002)

2.3.1.2 Les chlorures

Les chlorures sont largement répandus dans la nature, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl) ; ils représentent environ 0,05 % de la lithosphère (Ottawa, 1977). Ce sont les océans qui contiennent de loin la plus grande quantité de chlorures dans l'environnement.

Utilisés dans le ciment Portland comme adjuvants, les chlorures apparaissent soit comme accélérateurs de prise (chlorure de calcium utilisé à 1 ou 2%) soit retardateurs de prise (chlorure de magnésium). Dans le cas du chlorure de magnésium, la température ainsi que la concentration déterminent l'effet de ce dernier : pour une pâte de ciment conservée à 12°C, le retard de prise augmente avec la concentration en chlorure. À 20°C et à faible concentration (0,2%), les chlorures sont accélérateurs de prise. à fortes concentrations (0,9%), ils sont retardateurs. A 28°C, les chlorures sont retardateurs quelle que soit leur concentration. (Nilforoushan et Sharp, 1995)

2.3.1.3 Les phosphates

Les phosphates sont des sels de l'acide phosphorique, d'aspect granuleux et forant des concrétions contenant des fragments organiques. 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 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'adoucisseurs 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).

2.3.1.4 Les nitrates

Les nitrates sont des sels dérivés oxygénés de l'azote. La fixation de l'azote atmosphérique et la minéralisation de la matière organique manent, par une succession de réactions biochimiques, à la production d'ions ammonium, nitrite et nitrate, formes principales de l'azote dans les sols. Les apports en fertilisants chimiques et organiques modifient la chimie du sol. Les agriculteurs apportent les nutriments nécessaires aux plantes et une partie de ces produits se minéralise dans les sols. Les sels de nitrate sont très solubles dans l'eau de sorte que leur passage dans la solution de sol se produit immédiatement après leur application, générant de forts gradients d'azote. Le sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, l'urée $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, le nitrate de calcium $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ou le nitrate de potassium KNO_3 sont d'autres formes courantes d'apport d'azote aux sols agricoles.

Dans les matériaux cimentaires, les nitrates sont utilisés comme adjuvants. Le nitrate de calcium $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ est utilisé comme accélérateur de prise. (Aggoun et al, 2008).

D'après Le Borgne, (2010) qui a dopé le limon du Val d'Europe au nitrate d'ammonium (156mg NO_3/kg et 1,56g NO_3/kg) avant son traitement à 1,5% de chaux et 6% de ciment (0,26% et 2,6 % de nitrate). Il montre ainsi que les ions nitrate ne sont pas perturbateurs de la prise et de l'hydratation des liants. En effet, il constate qu'avec cet élément chimique, les résistances mécaniques et le gonflement volumique du matériau solidifié restent acceptables pour une réutilisation en technique routier.

2.4 Effets des additifs sur les sols améliorés avec et en absence des perturbateurs

2.4.1 Effet de la chaux

2.4.1.1 Effet sur la Plasticité

Le traitement des sols plastiques à la chaux a une très longue histoire. Cette technique apparaît depuis l'Antiquité. Les Chinois et les Romains sont les premiers qui ont utilisés cette forme d'amélioration des sols et cela pour la construction de la Grande Muraille de Chine et celle de grandes voies de communication (Dowell Mc, 1959).

a. Effet sur la Plasticité en absence des Sulfate :

Le premier test de la stabilisation des sols a été réalisé aux États-Unis en 1904 et la chaux a été premièrement utilisée comme un agent stabilisant dans la construction pratique des Autoroutes en 1924 (Clare et al, 1957).

- Le processus physico-mécanique incité par la chaux : Lors de l'incorporation de chaux à un sol humide, trois processus physique-chimique essentiels se produisent :
 1. l'hydratation et l'ionisation de la chaux.
 2. la modification de la capacité d'échange cationique (CEC) (Diamond et Kinter .1965) menant à la floculation / agglomération des particules argileuse (Herzog et Michell-1963).
 3. le développement des réactions pouzzolaniques : réaction entre la chaux la silice. (SiO₂) et l'alumine (Al₂O₃) contenus dans les particules du sol créant des produits cimentaires (C- S-H, C-A-S-H) qui lient les particules de sol entre elles (Eades et Grim, 1960, Diamond et al, 1964).
- L'addition de la chaux conduit à une augmentation importante de la limite de plasticité (WP) du sol sans modification significative de la limite de la liquidité (WL). Il y a donc une diminution de l'indice de plasticité (IP) (GTS-2000). A noter pourtant que Rogers et Glendenning (1996) ont montré pour l'argile de Londres une diminution de l'indice de plasticité avec une forte augmentation de la limite de plasticité et une faible augmentation de la limite de liquidité quand le dosage en chaux augmente (**Fig 2.1**)

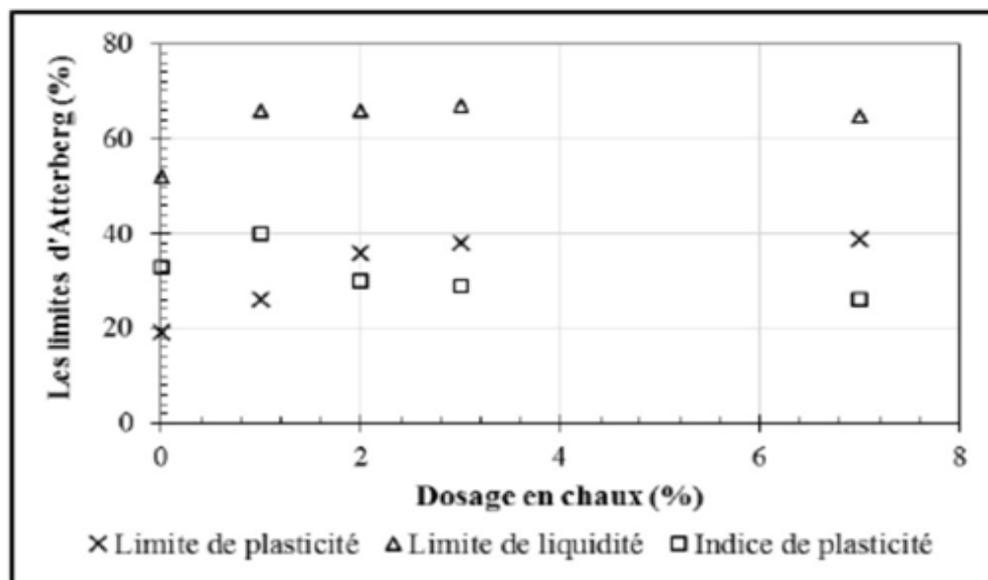


Figure2.1 - Effet du dosage en chaux sur les limites d'Atterberg de l'argile (Rogers et Glendenning, 1996)

Les travaux effectués par George et al (1992) ont permis d'observation qui lorsqu'un sol est traité avec la chaux il y a une diminution notable de l'indice de plasticité, de plus la limite de liquidité présente une augmentation peu marquée que celle de la limite de plasticité.

Dans la plupart des cas, l'effet de la chaux sur la plasticité du sol est plus ou moins instantané.

b. Effet sur la plasticité en présence des Sulfate :

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 traité à 6% de chaux (**Fig 2.2**). Il 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 et 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.

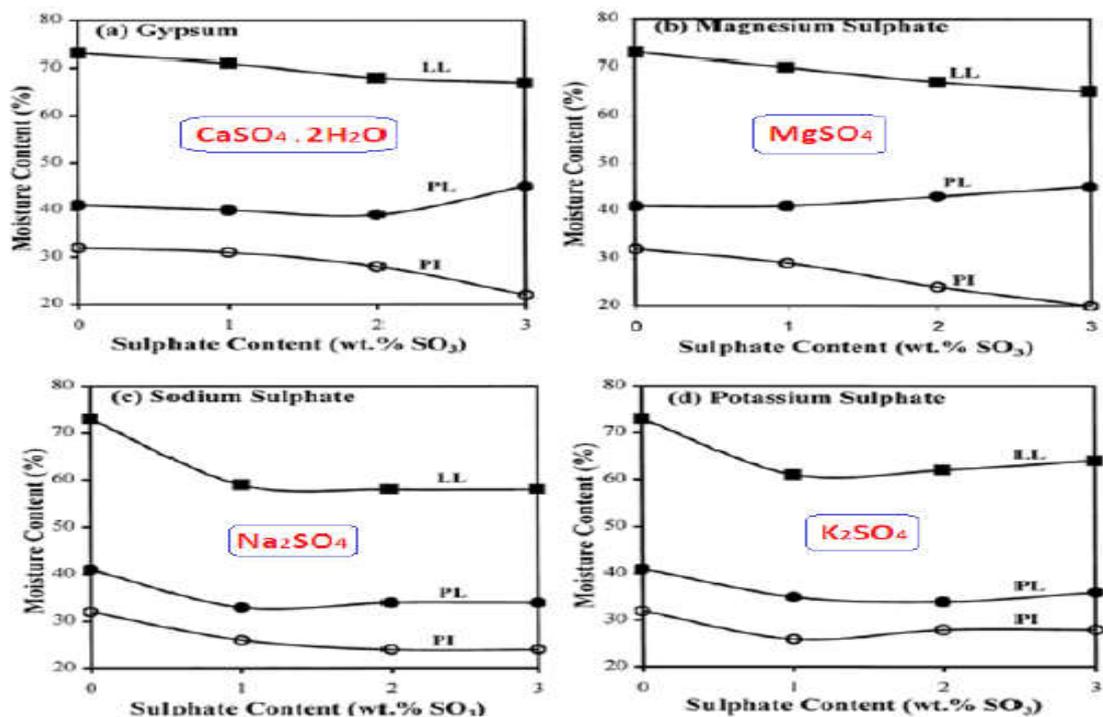


Figure 2.2 - Effet des sulfates monovalents et divalents sur les limites d'Atterberg d'une kaolinite traitée à 6% chaux, (Kinuthia et al, 1999).

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 traité 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 2.2**). 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 de même concentration en sulfate monovalent (Na_2SO_4) décroît initialement pour une faible concentration (1%. SO_3) puis elle augmente avec son augmentation (2et3%. 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 kaolinique.

Tableau 2.2-Effet du sulfate de sodium et de calcium sur 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
Sulfate monovalent (Na_2SO_4)	0.5	78.6
	1.0	78.9
	3.0	72.8
Sulfate divalent (CaSO_4)	0.5	70.0
	1.0	73.0
	3.0	76.0

2.4.1.2 Effet sur le compactage

a. Effet sur le compactage en absence de sulfate

Après traitement, la courbe de compactage Proctor devient plus aplatie. La compacté maximale est moindre, ce qui est traduit par une masse volumique sèche maximale (γ_{opt}) réduite, et une teneur en eau à l'optimum (W_{opt}) plus élevé ([Ormsby-1973](#), [Brandl-1981](#), [Osula-1996](#))

Ils ont vérifié que traitement à la chaux conduit à une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche maximale. ([Mtallib et Bankole, 2011](#)) attribue l'augmentation de (W_{opt}) à l'addition de la chaux dans le sol qui exige plus d'eau pour les réactions (l'hydratation, pouzzolanique) avec la chaux.

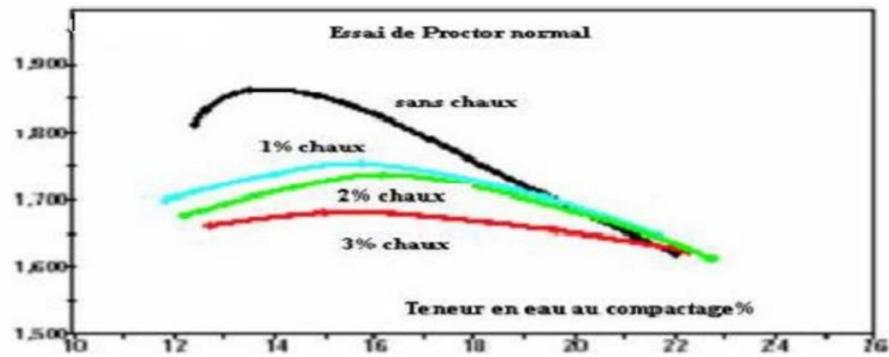


Figure 2.3-Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage
Bulletin CRR, Cité par AZZOUZ, 2006.

b. Effet sur le compactage en présence de sulfate

En présence des sulfates, les résultats dégagés par (Kinuthia et al, 1999) ont montré que les caractéristiques de compactage de kaolinite traité à 6% de chaux sont négativement influencées 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 (Fig2.4) 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).

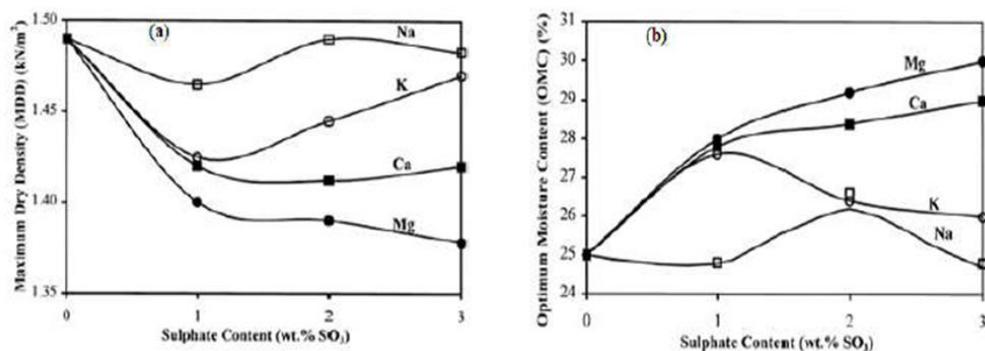


Figure 2.4-Effet des sulfates monovalents et divalents sur les paramètres de compactage d'une kaolinite traitée à 6% de chaux, (a) : la densité sèche maximale, (b) : la teneur en eau optimale, (Kinuthia et al, 1999)

2.4.1.3 Effet sur la résistance au cisaillement

a. Effet sur la résistance au cisaillement en absence de sulfate

De nombreuses études ont été effectuées dans le but de voir l'effet de la chaux sur la résistance au cisaillement des sols instables à traiter. Plusieurs chercheurs (Osula, 1991. Gay et Schad, 2000. Munthar et Hantoro, 2000. Bagherpour et Choobbasti, 2003. Linet al, 2007) ont montré que la stabilisation des sols instables à l'aide de la chaux provoque une augmentation de la résistance au cisaillement de ces sols traités par rapport aux sols naturels. Des travaux

Sont réalisés sur un limon et une argile traitée à différentes teneurs en chaux confirment que l'ajout de chaux conduit à une amélioration des paramètres de cisaillement (l'angle de frottement interne ϕ et la cohésion effective c).

L'augmentation de l'angle de frottement interne dépend de la nature du sol et aussi de la quantité de chaux ajoutée. A partir d'une quantité de chaux, ce paramètre n'évolue plus.

L'augmentation de ce paramètre associée à la formation croissante de composés cimentaires ou à la meilleures cristallisation des composés au cours du temps. En revanche, l'angle de frottement interne ne dépend pas du temps de cure. L'amélioration de ce paramètre est donc

Plutôt attribuée au processus de réorganisation induit par la floculation, qu'à la formation ou la cristallisation des produits cimentaires au cours du temps.

b. Effet sur la résista au cisaillement en présence de sulfate

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-} (Fig2.5).

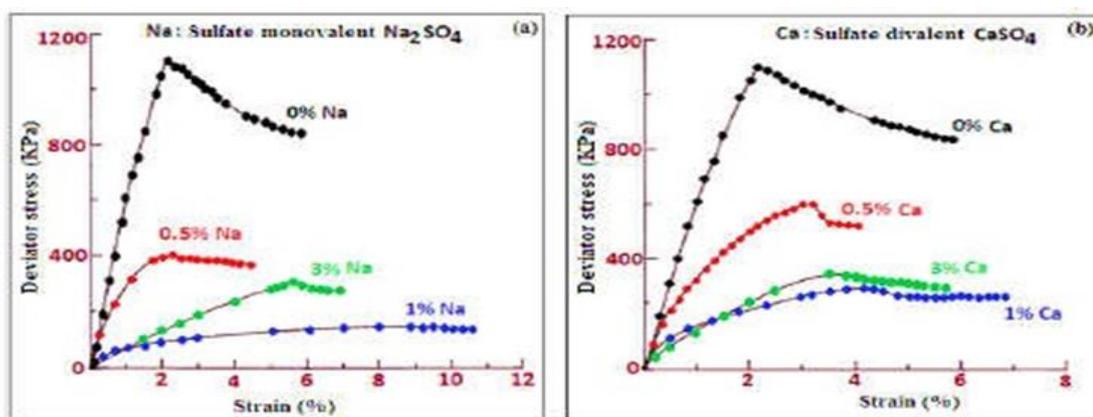


Figure 2.5 - Effet des sulfates sur la résistance au cisaillement d'une montmorillonite traitée avec 6% de chaux après une année de cure (pression de confinement : $PC = 100$ KPa), (Sivapullaiah et al. 2000).

2.4.2. Effet du ciment

2.4.2.1 Effet sur la plasticité

a. Effet sur la plasticité en présence de sulfate

L'incorporation du ciment réduit la plasticité des sols stabilisés. Ces résultats ont été confirmés par plusieurs chercheurs (Basha et al, 2003. Degirmenci et al, 2007. Asgari et al, 2015).

Plusieurs études ont été élaborées par différents chercheurs dont ils ont constaté que l'utilisation du ciment en tant qu'additif fait améliorer considérablement la maniabilité des sols fins argileux et notamment les sols très plastiques (Osula 1991. Aytetni et al, 1998.

Miller et al. 2000, Cokça et al. 2001, Al Rawas et al. 2005, Basha et al. 2005, Kalkan 2006, Eren et al, 2009. Sariosseiri et Muhunthan, 2009. Sarkar et al, 2012. Iorliam et al, 2012. Oza et al, 2013).

De plus, (Gueddouda et al, 2010) ont démontré que l'addition du ciment fait entraîner une diminution importante de l'IP qui se traduit par une bonne maîtrise de la maniabilité du sol stabilisé. Pour cela, l'addition de 4% de ciment est suffisante pour améliorer la maniabilité en réduisant l'IP de 17% à 6%. Le même comportement a été observé par (Portelinha et al, 2012) où l'IP du sol traité avec différents dosages en ciment a diminué de 32% jusqu'à 10% Avec l'utilisation de 12% de ciment (Fig 2.6).

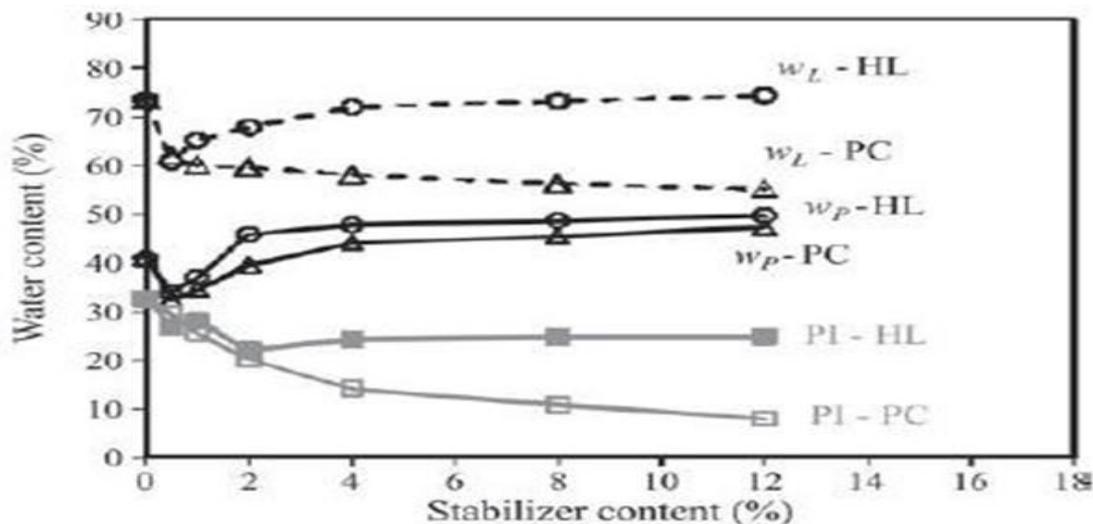


Fig. 2.6 -Variation des limites d'Atterberg avec l'addition du ciment (Portelinha et al, 2012).

(Asgari et al 2015) ont utilisé différents dosages en ciment (0-9%) pour le traitement d'un sol peu plastique (IP=9%). Les résultats obtenus ont montré que la WL et l'IP augmentent jusqu'à un optimum qui correspond à 3% de ciment puis ils diminuent avec l'augmentation de la teneur en ciment additionné. Cependant, la WP augmente avec l'augmentation de la

Quantité du ciment utilisé (**Fig2.7**). Un comportement similaire a été observé par (Iorliam et al, 2012).

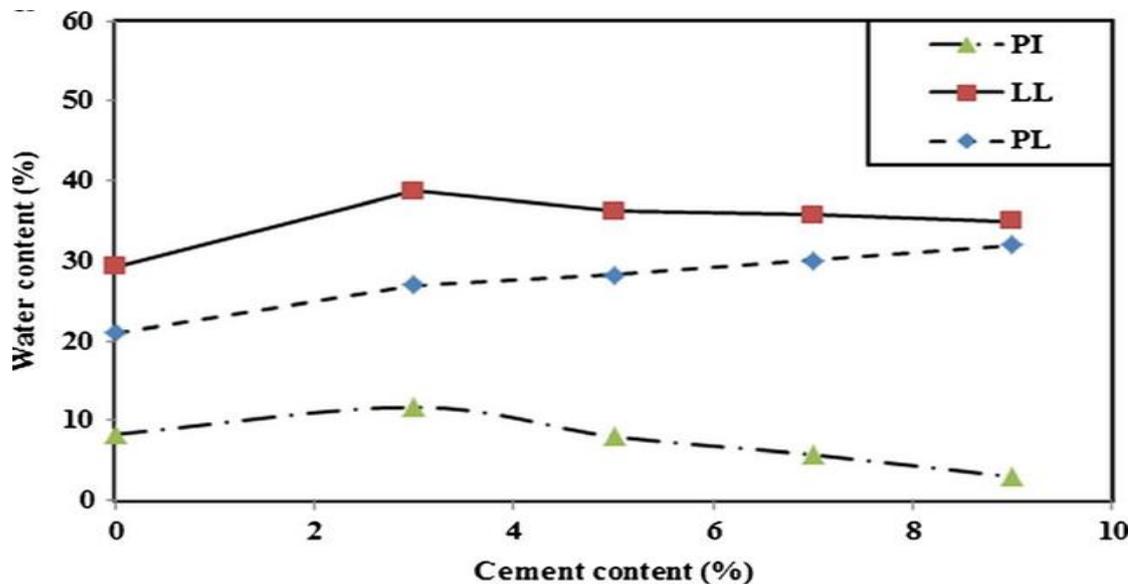


Fig 2.7- Effet du ciment sur les limites d'Atterberg d'un sol peu plastique, (Asgari et al, 2015).

En effet, la modification de la structure des particules argileuses par l'addition du ciment et également la dissolution de la silice et de l'alumine présents dans le sol est causée par un fort pH qui est à l'origine de l'hydratation du ciment. Les matières dissoutes vont être absorbées à la surface des particules d'argile ce qui conduit à réduire les forces de répulsion et par conséquent la floculation des particules (Okagbue and Ochulor, 2007). De plus, Osula (1996) a conclu que cette réaction mène à la formation de particules grossières, par conséquent, la réduction des particules fines mène à une réduction dans la surface spécifique et par conséquent la réduction de la plasticité.

2.4.2.2 Compactage

a. En absence de sulfate

La stabilisation chimique des sols par l'utilisation du ciment en tant que liant hydraulique a fait l'objet plusieurs études (Rahman, 1986) ; (Bell, 1994); (Osula, 1996); (Aytekin et al., 1998); (Gay and Schad, 2000); (Miller et al., 2000); (Basha et al., 2003); (Sivapullaiah et al., 2003); (Basha et al., 2005); (Hossain et al., 2006); Mu'Az, 2007; Nurhayat et al., 2007; Eren and Filiz, 2009; Suksun et al., 2010; Yahia et al., 2011; Portelinha et al., 2012; Lorliam et al., 2012; Sarkar et al., 2012).

Selon (Al-Homidy et al, 2016), l'addition de différents pourcentages de ciment à un sol fin fait améliorer considérablement le compactage du sol traité. En effet, l'addition de 30% de

Ciment fait diminuer la γ_{dmax} de 19.6 kN/m^3 jusqu'à 18.8 kN/m^3 et fait augmenter la WOPN de 10.1% jusqu'à 12.4% (Fig 2.8)

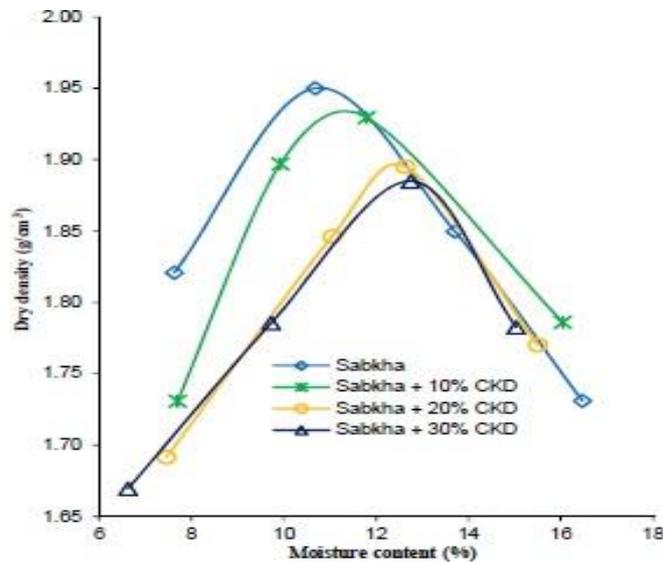


Fig 2.8- Evolution des caractéristiques de compactage (Al-Homidy et al, 2016)

Il a été démontré que l'ajout de différents pourcentages de ciment (0-10%) à un sol fin fait induire une augmentation de sa γ_{dmax} et une réduction considérable de sa W_{opt} (Okagbue and Ocholor, 2007). En effet, l'augmentation de la densité sèche peut être attribuée par la nature du sol étudié «sol graveleux bien gradué», la présence des composants du gravier et l'indice de vide élevé permet un compactage plus efficace. L'ajout du ciment améliore et modifie les caractéristiques du sol, menant encore à un compactage performant avec une augmentation de la densité sèche.

L'agglomération du ciment autour des grains de sol induit une augmentation de la taille des particules fines, peut aussi avoir une légère réduction de la teneur en eau optimale. C'est parce que l'ajout du ciment affecte la distribution des particules du sol en augmentant la taille des particules fines et par conséquent la réduction de la force d'attraction de l'eau. De plus, (Osula, 1996) a suggéré que les réactions pouzzolaniques qui se développent dans le mélange sol/ciment prennent lieu après une heure de malaxage. En outre, la chaux fortement réactive produite dans l'hydratation du ciment devient plus efficace avec le temps qu'avec le contenu de ciment.

(Gay and Schad, 2000) ont montré que l'ajout du ciment dans un sol argileux de forte plasticité augmente la teneur en eau optimale et réduit la densité sèche maximale. Un comportement similaire a été observé par (Asgari et al, 2015).

2.4.2.3 la résistance au cisaillement

a. en absence de sulfate

(Ho and Chan, 2011) ont étudié l'effet apporté par l'utilisation de 10% de ciment sur la résistance au cisaillement d'une argile organique très plastique pour différentes périodes de cure. La (Fig2.9) montre que la résistance au cisaillement développée par l'échantillon traité après 28 jours de cure est deux fois plus grande que celle du sol non traité. Cela peut être expliqué par la formation des phases cimentaires qui font lier les particules du sol stabilisé entre eux.

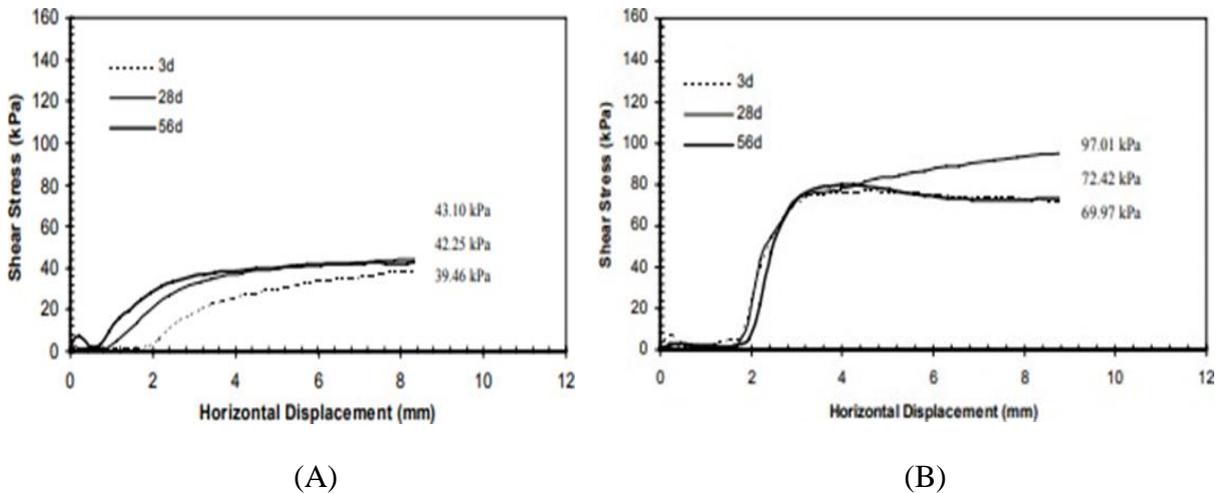


Fig 2.9- Variation de la résistance au cisaillement d'une argile organique très plastique traitée au ciment après différentes périodes de cure, (A) : sol non traité, (B) : sol traité avec 10% de ciment, (Ho and Chan, 2011)

(Gay and Schad, 2000) ont montré que les caractéristiques de cisaillement d'un sol instable traité avec différents teneurs de ciment ont été améliorées d'une façon considérable particulièrement avec la cure. Pour 8% de ciment et après 28 jours de cure, l'angle de frottement interne est 5 fois plus grand que celui du sol non traité. Cependant, pour les mêmes conditions précédentes, la cohésion est 7.5 fois plus grande que celle du sol non traité. Cela explique l'effet bénéfique apporté par l'utilisation du ciment pour la stabilisation des sols instables.

b. en présence de sulfate

(Laguros, 1962) a constaté qu'en présence des sulfates et après 7 jours de cure, la cohésion et l'angle de frottement interne d'un sol limoneux traité avec l'addition de 12% de ciment portland augmente de 10 à 20 KPa et de 15 à 37°, respectivement.

2.4.3 L'effet du gypse

(Yilmaz and Civelekoglu, 2009) A 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.

(Aldaood et al, 2014) ont reporté que l'utilisation de différents pourcentages de gypse seul ou combinée avec 6% de chaux dans la stabilisation d'un sol peu plastic fait augmenter considérablement sa résistance à la compression non confinée avec l'augmentation de la température et de la période de cure (**Fig2.10**). L'augmentation de la résistance est liée aux grains fins de gypse qui font améliorer la compacité par le remplissage des vides des échantillons traités et par conséquent l'augmentation de la résistance à la compression non confinée. Le même comportement a été observé par (Segui et al, 2013).

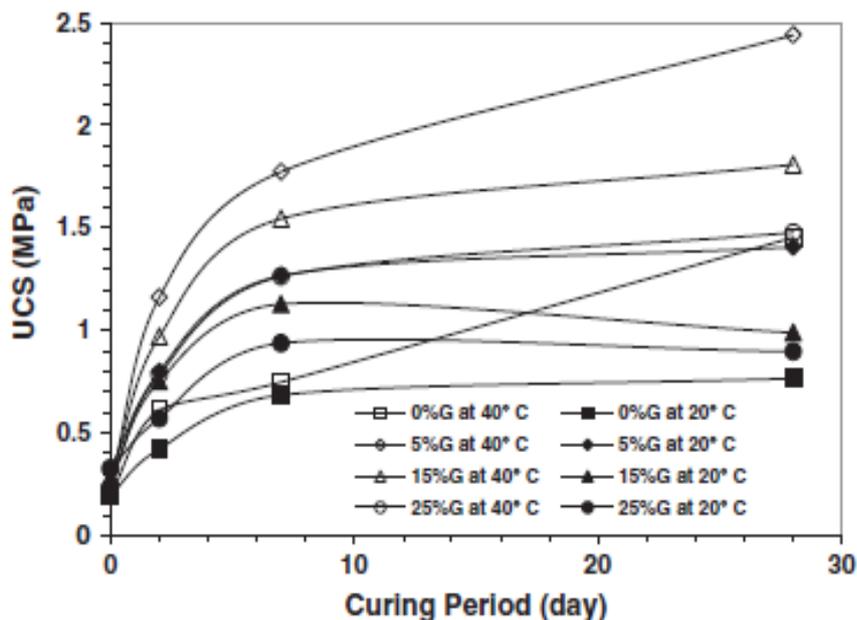


Fig.2.10 - Effet apporté par l'utilisation de gypse comme additif sur la résistance à la compression non confinée d'un sol peu plastique traité à la chaux, (Aldaood et al, 2014).

2.5 Conclusion

De nombreuses expérimentations et travaux ont été mis en place pour étudier les différents effets des éléments perturbateurs de sol .Dans ce chapitre, nous avons traité des sulfates comme un élément perturbateur notamment pour le traitement des sols fins et à partir de là nous aborderons l'étude des gypses sur le traitement des sols argileux gris dans le troisième Chapitre ou nous ferons des études expérimentales pour étudier l'effet du gypse sur les limites d'Atterberg et les paramètres de compactage

Chapitre 3

Etude expérimentale

- 3.1. *Introduction*
- 3.2. *Matériaux utilisés et préparation*
- 3.3. *Déroulement des essais*
- 3.4. *Conclusion*

3.1 Introduction

Ce chapitre vise à présenter l'étude empirique liée à la connaissance et à l'évaluation impact et changements causés par le gypse.

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 pour décrire la préparation des échantillons et la méthodologie d'essai dans atteindre.

L'étude expérimentale devait être menée au niveau du laboratoire de mécanique des sols du département de science de la terre de l'université Djilali Bounaama de Khemis Miliana (UDBKM).

3.2 Matériaux utilisés et préparation

3.2.1 Sols naturels

3.2.1.1 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 (**Fig. 3.1**).



Figure 3.1- Prélèvement du sol argileux gris (SG) à partir d'un projet de remblai à Haouche El-Ghaba. (Gadouri, 2017).

3.2.1.2 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 concassés et Broyés pour la préparation et exécution des essais géotechniques d'identification et de caractérisation (**Figs. 3.2 et 3.3**).



Figure 3.2- Moyens utilisés pour la préparation des sols, (a) : concasseur, (b) : broyeur. (Harichane et al, 2011a).

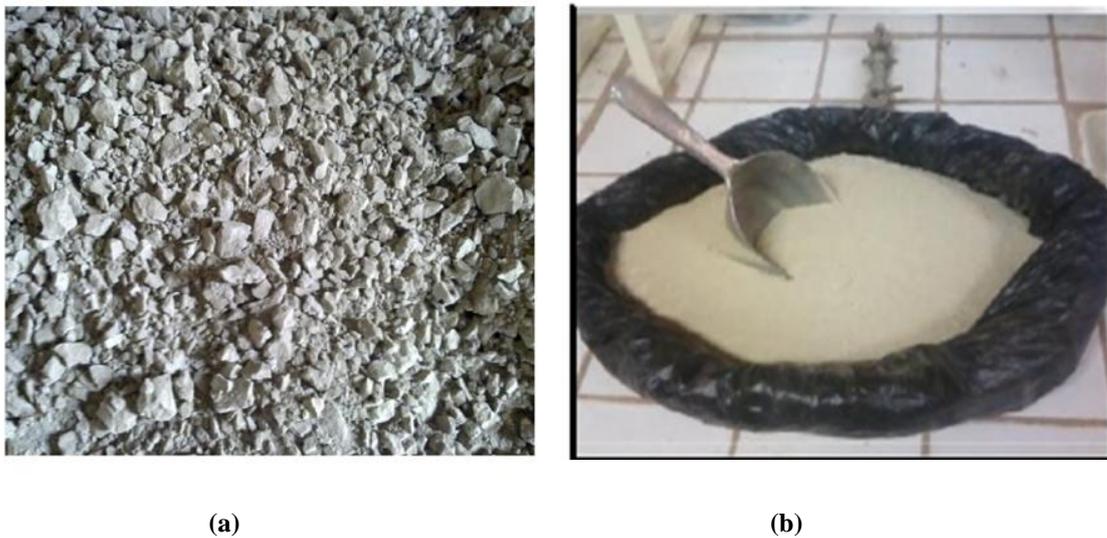


Figure 3.3- Préparation de sol pour les essais au laboratoire, (a) : Sol après concassage, (b) : Sol après broyage et tamisage au tamis 1mm. (Harichane et al, 2011a).

3.2.1.3 Identification et caractérisation du sol

Le tableau 3.1 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 3.2.

Tableau 3.1- 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
Eléments passant au tamis 80 μ m (%)	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/m ³)	13.8
Résistance à la compression non confinée (MPa)	0.34
Perte au feu (%)	17.03

Tableau 3.2- 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

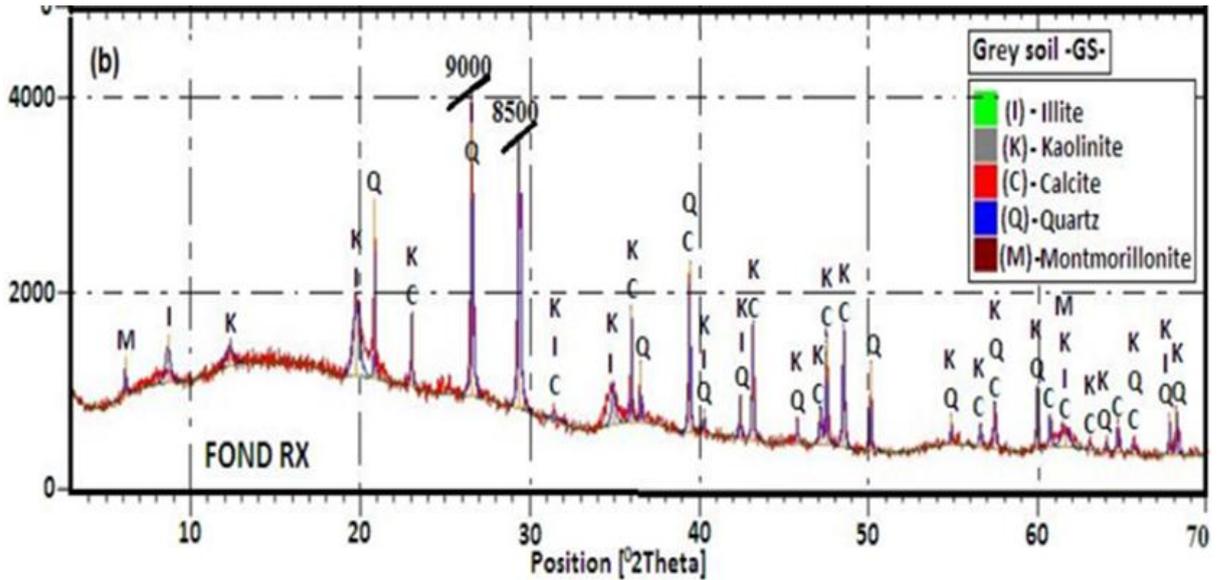


Figure 3.4- Le diagramme diffractométrique présentant la composition minéralogique du sol étudié (argile gris). (Gadouri, 2017).

Tableau 3.3- 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) O10) (OH) ₂ .H ₂ O	20
Chlorite	Mg ₂ Al ₄ O ₁₈ Si ₃	-
Minéraux ferrugineux et autres	-	6

3.2.2 Chaux

3.2.2.1 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 3.5). 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.

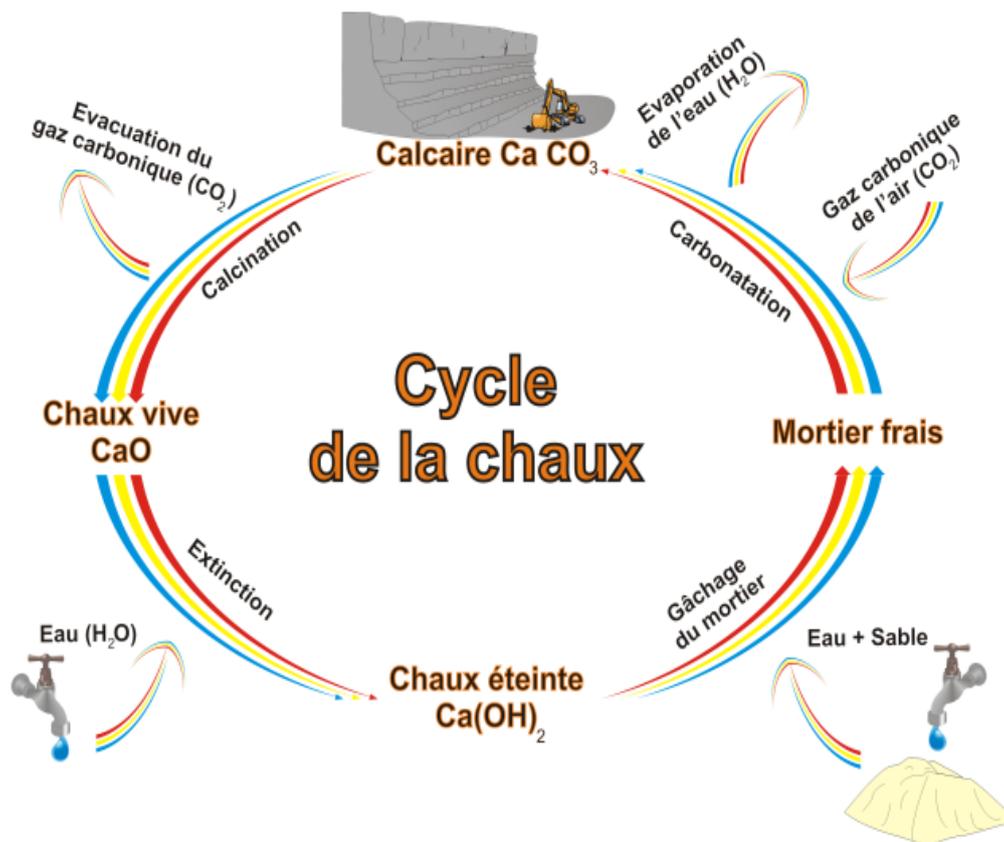


Figure 3.5- Cycle de production de la chaux.

3.2.2.2 Chaux utilisée

La chaux utilisée dans cette étude est une chaux vive produite par la société SARL-BMSD située dans la ville de Saïda (Sud-Ouest du territoire national) (Fig.3.6). 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 3.4**.



Figure 3.6- Emballage utilisé pour la Chaux vive de Saïda.

Tableau 3.4- 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	-

3.2.3 Produits chimiques

Dans cette étude, le gypse a été utilisé (Fig 3.7) où une quantité de (6%) de gypse a été mélangée à chaque fois avec une quantité différente de chaux (0%, 4%, 8%). Le gypse utilisé est spécifié dans le tableau 3.5.



Figure 3.7-Gypse utilisée dans l'étude expérimentale.

Tableau 3.5- Caractéristiques physico-chimiques de gypse utilisée.

Propriétés physiques-chimique	Gypse
Couleur	Blanche
Etat physique	Poudre
Formule chimique	(CaSO ₄ , 2H ₂ O)
Masse molaire	172,17 (g/mol)

3.3 Déroulement des essais

3.3.1 Combinaison des échantillons

Les échantillons étudiés pour les essais des limites d'Atterberg et de compactage sont présentés dans le tableau 3.6.

Tableau 3.5: Combinaisons des échantillons des sols stabilisés avec ou sans présence de gypse pour les limites d'Atteberg et le compactage (en pourcentage).

Désignation	Sol (%)	Chaux (%)	Gypse(%)	Références
SC0G0	100	0	0	Gadouri et al. (2017)
SC0G2	98	0	2	
SC0G4	96	0	4	
SC0G6	94	0	6	Présente étude
SC4G0	96	4	0	
SC4G2	94	4	2	
SC4G4	92	4	4	
SC4G6	90	4	6	
SC8G0	92	8	0	
SC8G2	90	8	2	
SC8G4	88	8	4	
SC8G6	86	8	6	

S : sol , C : Chaux , G : Gypse.

3.3.2 Propriétés étudiées

3.2.2.1 Limite d'Atterberg

3.2.2.1.1 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 gypse et de chaux ou la combinaison des deux dans un état sec (**Tab 3.7**).

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 gypse au repos dans un récipient hermétique pendant des périodes de cures de 1, 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 du gypse et avec ou sans chaux 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 du gypse 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 3.6: Quantités des sols et des additifs utilisés le Gypse avec ou sans la chaux pour les limites d'Atterberg.

Désignation	Sol(g)	Chaux(g)	Gypse(g)	Références
SC0G0	300	0	0	Gadouri et al. (2017)
SC0G2	294	0	6	
SC0G4	288	0	12	
SC0G6	282	0	18	Présente étude
SC4G0	288	12	0	
SC4G2	282	12	6	
SC4G4	276	12	12	
SC4G6	270	12	18	
SC8G0	276	24	0	
SC8G2	270	24	6	
SC8G4	264	24	12	
SC8G6	258	24	18	

3.2.2.1.2 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, 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 pas seconde. On notera le nombre de chocs (NC) nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 13mm. 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.3.8**). 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.

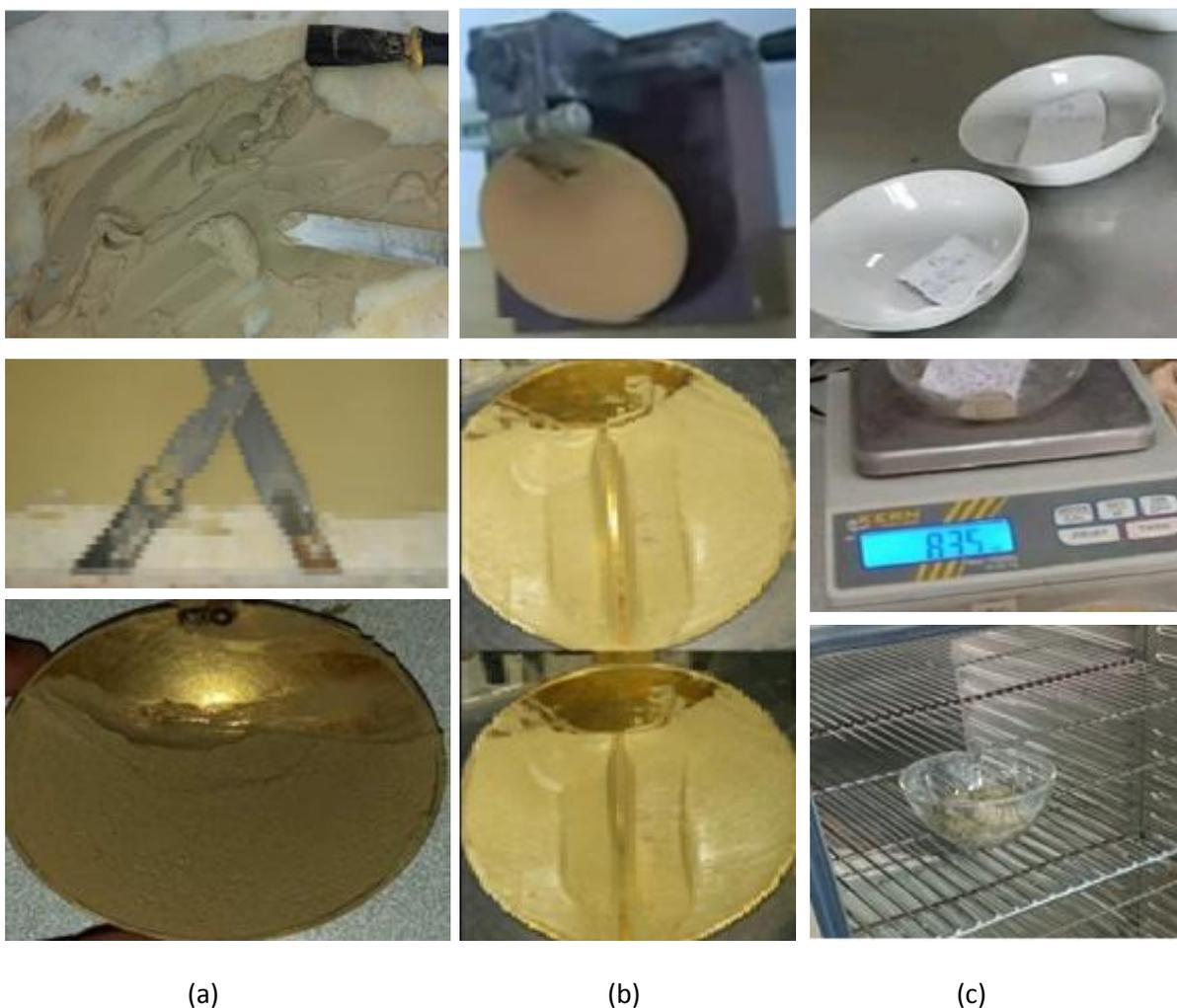


Figure 3.7- Détermination de la limite de liquidité, (a) : étalement de la pâte et remplissage de la coupelle, (b) : pratiqué la rainure et créer une serré de chocs jusqu'à la fermeture des lèvres à 13mm, (c) : prélèvement d'échantillon et dessiccation à l'étuve.

3.2.2.1.3 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 3.9**). 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.

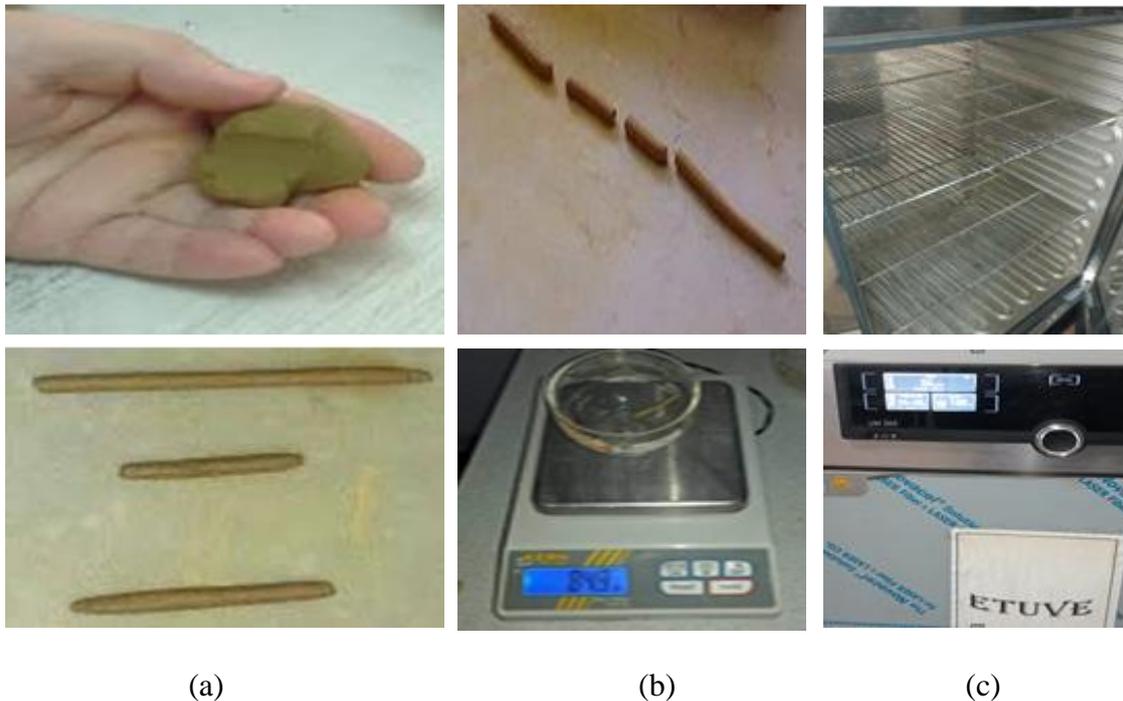


Figure 3.8: Détermination de la limite de plasticité, (a) : formation d'une boulette de pâte et la rouler à la main pour former un rouleau, (b) : amincissement du rouleau jusqu'à ce qu'il se fissure à 3 mm de diamètre et prélèvement d'échantillon, (c) : dessiccation à l'étuve à 105°C pendant 24h.

3.3.2.1.4 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.

$$IP = WL - WP \quad (3.1)$$

3.3.2.2 Compactage

3.3.2.2.1 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 3.8**

Tableau 3.7- Quantités des sols et des additifs utilisés le gypse avec ou sans la chaux pour l'essai de compactage.

Désignation	Sol(g)	Chaux(g)	Gypse (g)	Références
SC0G0	1800	0	0	Gadouri et al. (2019)
SC0G2	1764	0	36	
SC0G4	1728	0	72	
SC0G6	1692	0	108	Présente étude
SC4G0	1728	72	0	
SC4G2	1692	72	36	
SC4G4	1656	72	72	
SC4G6	1620	72	108	
SC8G0	1656	144	0	
SC8G2	1624	144	32	
SC8G4	1584	144	72	
SC8G6	1476	144	108	

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 0/1mm. 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 (**Fig3.10**). 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 gypse) sont introduits dans des sacs hermétiques et en les conservant pendant une heure avant l'exécution de l'essai de compactage.



Figure 3.9- Préparation de la prise d'essai de compactage.

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.3.11**).



Figure 3.10: compactage du sol.

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.

3.3.2.2 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.

$$\gamma_{dmax} = \frac{p_s}{v} \quad (3.2)$$

3.3.2.2.3 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.

$$w_{opt} = \frac{p_w}{p_s} \tag{3.3}$$

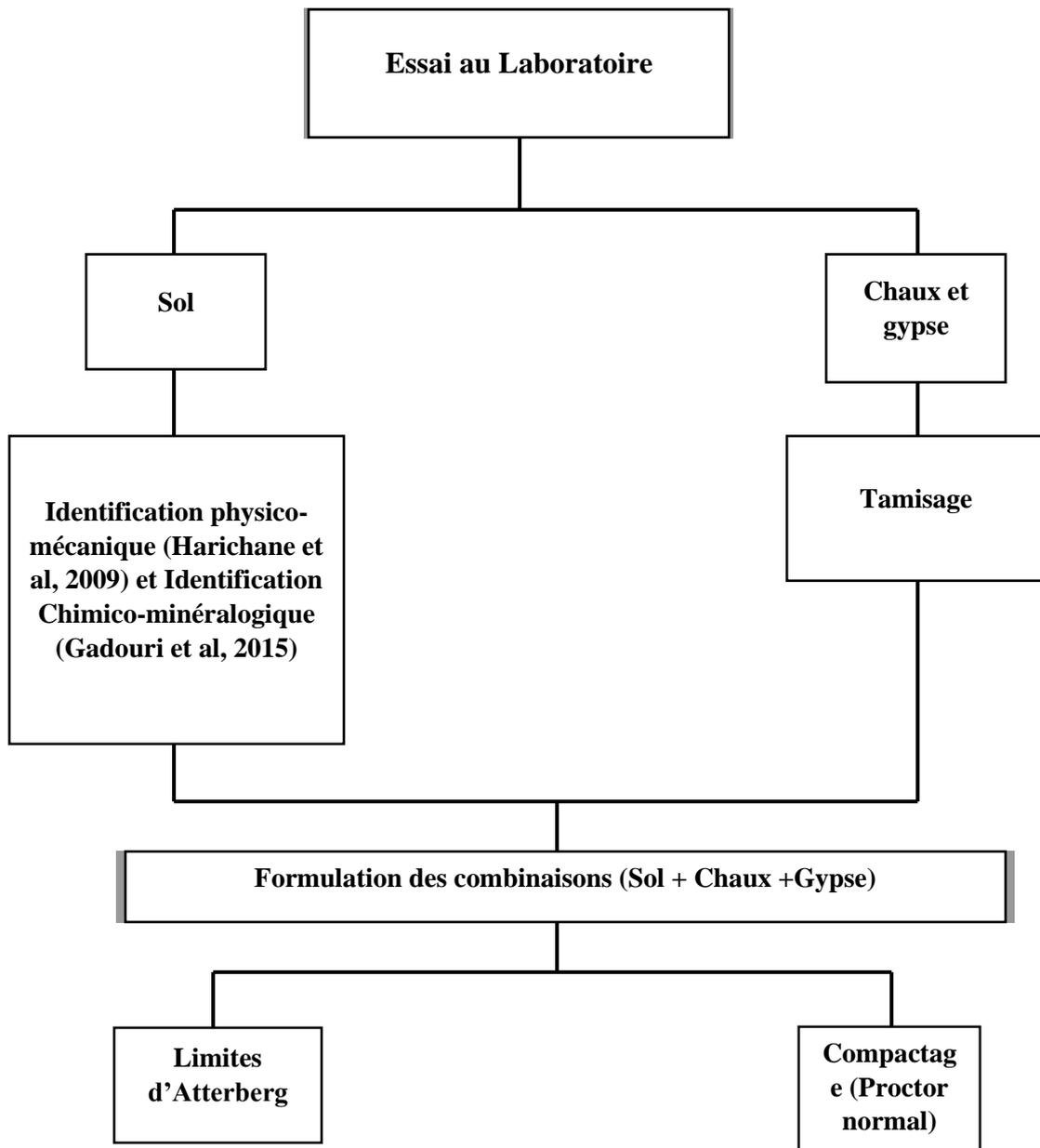


Figure 3.11- Organigramme des essais prévus à effectuer au laboratoire

3.4 Conclusion

L'étude expérimentale de cette recherche vise à évaluer l'efficacité du traitement à la chaux d'une argile gris provenant de Haouche El-Ghaba (W. Chlef), Cette étude expérimentale va nous permettre d'évaluer l'effet de Gypse et la Chaux sur les limites d'Atterberg, les caractéristiques de compactage au Proctor normal (W_{opt} et $\gamma_{d_{max}}$), pour les sols traités de différents pourcentages de la chaux (0, 4 et 8%) et de gypse (0, 2, 4, 6%).

Les résultats des différents essais réalisés seront présentés, analysés et discutés dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Présentation et interprétation des résultats obtenus

- 4.1. *Introduction*
- 4.2. *Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg perturbateurs*
- 4.3. *Effet de la chaux sur les propriétés de compactage*
- 4.4. *Effet de Gypse sur les limites d'Atterberg*
- 4.5. *Effet de gypse sur les propriétés de compactage*
- 4.6. *Effet de gypse et de la chaux sur la classification du sol traité*
- 4.7. *Conclusion*

4.1 Introduction

L'amélioration des sols est une technologie très réputée qui s'applique au niveau des travaux d'excavation et de réfection des routes ainsi que des chemins d'accès, elle connaît actuellement un très grand essor au niveau international.

L'utilisation intensive de cette technologie qui améliore les matériaux existants engendre une réduction significative des coûts d'autre part son emploi présente des fins environnementaux très intéressants (Préservation et réduction de l'épuisement des zones d'emprunte).

Les 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 gypse et la chaux sur quelques propriétés physico-mécaniques d'un sol argileux en l'occurrence les limites d'Atterberg (w_L, w_p) et les paramètres de compactage (γ_{dmax}, w_{opt}).

4.2 Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg

4.2.1 Effet sur la limite de liquidité et de plasticité

Les résultats de l'effet de différent pourcentage de la chaux sur les limites d'Atterberg (w_L, w_p) sont présentés dans la **figure 4.1 (Voir Annexe A.1)**

L'examen de la figure précédente reflète que la limite de liquidité tend à se diminuer en présence de 4% de chaux, au-delà de cette valeur une faible diminution de w_L est constatée.

Contrairement, la limite de plasticité augmente en présence de chaux, au-delà de 4%, l'effet de la chaux sur la w_p devient faible.

Des résultats similaires ont été obtenus par (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 plasticité. D'autres chercheurs ont confirmé ces résultats (Attoh Okine, 1995 ; Bagherpour, 2006 ; Bozbey et al, 2010 ; Sivapullaiah, 2006)

D'autre part, [Attoh-Okine \(1995\)](#) a rapporté que la diminution de la limite de liquidité est observée pour les sols composés principalement de l'argile montmorillonitique en revanche son augmentation est constatée dans le cas des sols Kaolinique.

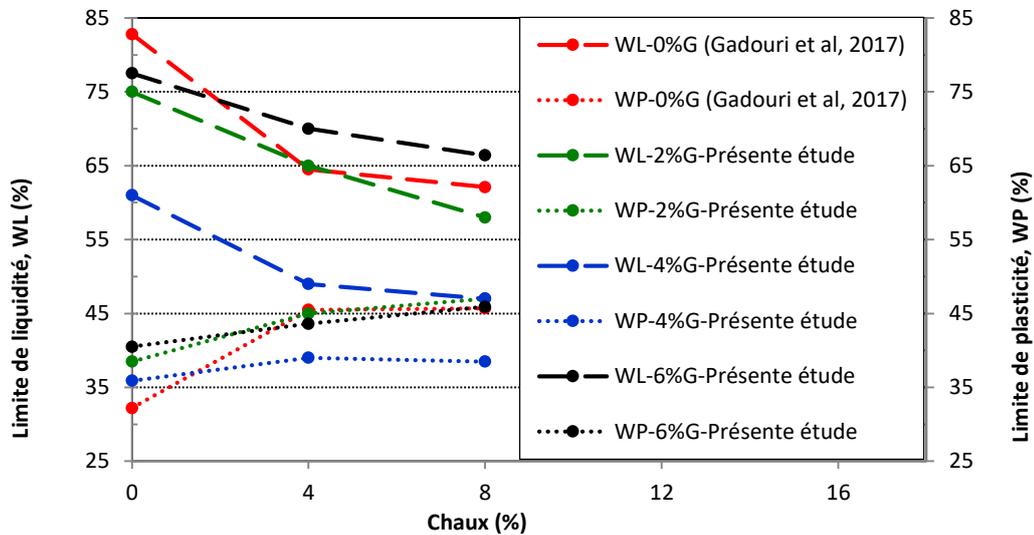


Figure 4.1- Effet de différent pourcentage de la chaux sur WL et WP de sol gris argileux (Annexe A.1)

4.2.2 Effet sur de l'indice de plasticité

Les résultats de l'effet de différents pourcentages de la chaux sur l'indice de plasticité (I_p) du sol argileux gris sont présentés dans la **figure 4.2** (Voir Annexe A.2).

Nous remarquons qu'il y a diminution significative continue de l'indice de plasticité. Quand les valeurs de l'indice de plasticité baissent cela indique l'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques et il est prêt pour l'emploi.

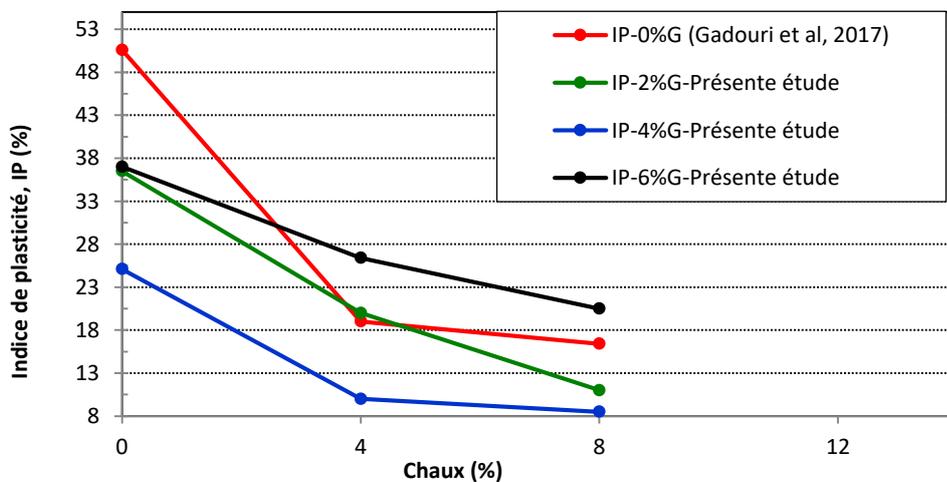


Figure 4.2- Effet de différents pourcentages de la chaux sur l'indice de plasticité du sol gris (Annexe A.2)

Plusieurs chercheurs ont montré la même tendance et résultats dans leurs travaux de recherche (Attoh Okine, 1995 ; Bagherpour et al, 2003 ; Sivapullaiah et al, 2003 ; Celal et Gokceglu, 2004 ; Ansary et al, 2006 ; Bozbey et al, 2010). Ce qui s'explique aussi par ce fait, la diminution de l'indice de plasticité indique une amélioration de la maniabilité du sol, les sols plus fins ont montré une diminution de l'indice de plasticité après augmentation de la durée de traitement par l'ajout de la chaux.

4.3 Effet de la chaux sur les propriétés de compactage

4.3.1 Effet sur la teneur en eau optimale

Les résultats de l'effet du changement apporté par l'ajout de la chaux sur la teneur en eau optimale (ω_{opt}) du sol argileux gris sont présentés dans la **figure 4.3 (Voir Annexe B.1)**. Evidemment, les valeurs de la teneur en eau augmentent considérablement en présence de 4% de la chaux mais au-delà de ce pourcentage, une augmentation légère a été remarquée sauf en présence de 2% de gypse où il y a une augmentation forte et continue.

Des résultats similaires ont été observés par [Attoh-Okine, \(1995\)](#) où il a démontré que 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. Plusieurs chercheurs (exp : [Ola, 1977](#) ; [Rahmen, 1996](#) ; [George et al, 1992](#) ; [Indraratna, 1996](#) ; [Kinuthia et al, 1999](#) ; [Gay and Schard, 2000](#) ; [Kavak and Akyarli, 2007](#) ; [Hossain et al, 2007](#) ; [Manasseh and Olufmi, 2008](#) ; [Ghobadi et al, 2014](#) ; [Asgari et al, 2015](#) ; [Jha and Sivapullaiah, 2015](#) ; [Harichane et al, 2011](#)) ont trouvé les mêmes résultats où ils 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'aggrégation 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.
- 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.

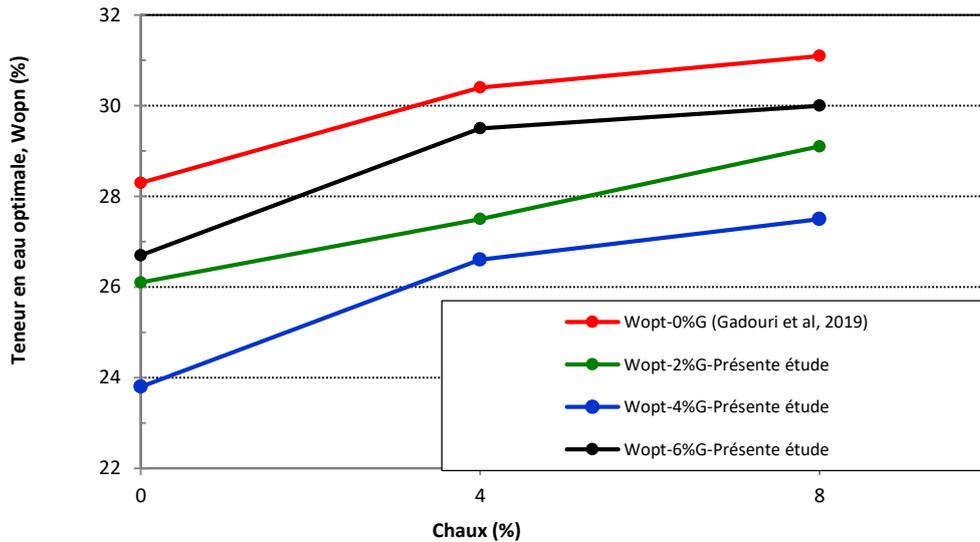


Figure 4.3- Effet de changement de l'ajout de la chaux sur la teneur en eau optimale du sol gris
(Annexe B.1)

4.3.2 Effet sur la densité sèche maximale

Les résultats de l'effet de différents pourcentages étudiés de la chaux sur la densité sèche maximale γ_{dmax} du sol argileux gris sont présentés dans la **figure 4.4 (Annexe B.2)**.

Alors, il y a une observation d'une augmentation significative des valeurs de la densité sèche maximale par contre un comportement inverse a été remarqué par les chercheurs suivants Ola, (1977) ; Rahman, (1986) ; George et al, (1992) ; Bell ; (1996) ; ce comportement se manifeste dans la diminution de la densité sèche maximale et l'augmentation de la teneur en eau optimale en présence de chaux.

Ce comportement étudié est fortement probable du fait que le taux d'augmentation de la densité sèche et la teneur en eau dépend de la concentration de gypse.

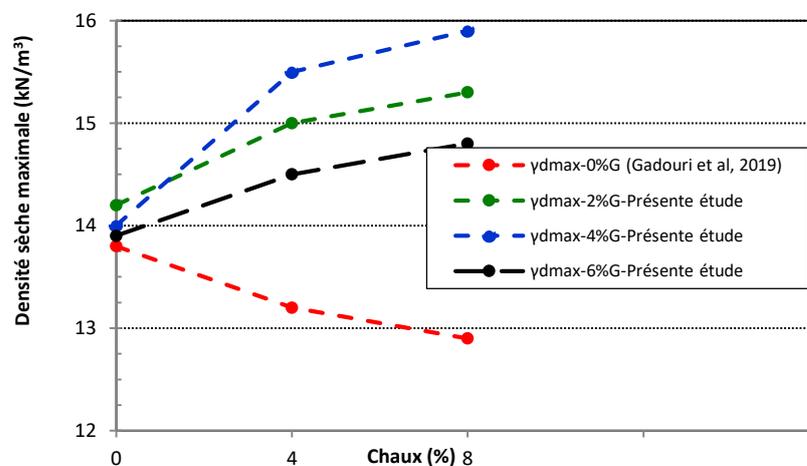


Figure 4.4- Effet de différents pourcentages étudié de la chaux sur la densité sèche maximale du sol gris (Annexe B.2).

4.4 Effet de Gypse sur les limites d'Atterberg

4.4.1 Effet sur la limite de liquidité et de plasticité

Les résultats de l'effet de différents pourcentages de gypse sur les limites d'Atterberg (w_L, w_p) de sol argileux gris sont présentés dans la **figure 4.5 (Voir Annexe C.1)**.

Nous remarquons une diminution significative de limite de liquidité allant jusqu'à 4% de la chaux après avoir atteint ce pourcentage, nous remarquons une augmentation progressive et presque continue. Alors que pour le cas de la limite de plasticité nous rencontrons un effet similaire, le même comportement a été indiqué par [Yilmaz and Civelekoglu \(2009\)](#) où ils ont conduit une série des essais afin d'examiner 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 dans leurs travaux ont mis en évidence l'effet du calcium provenant de l'addition du gypse sur la plasticité de la bentonite.

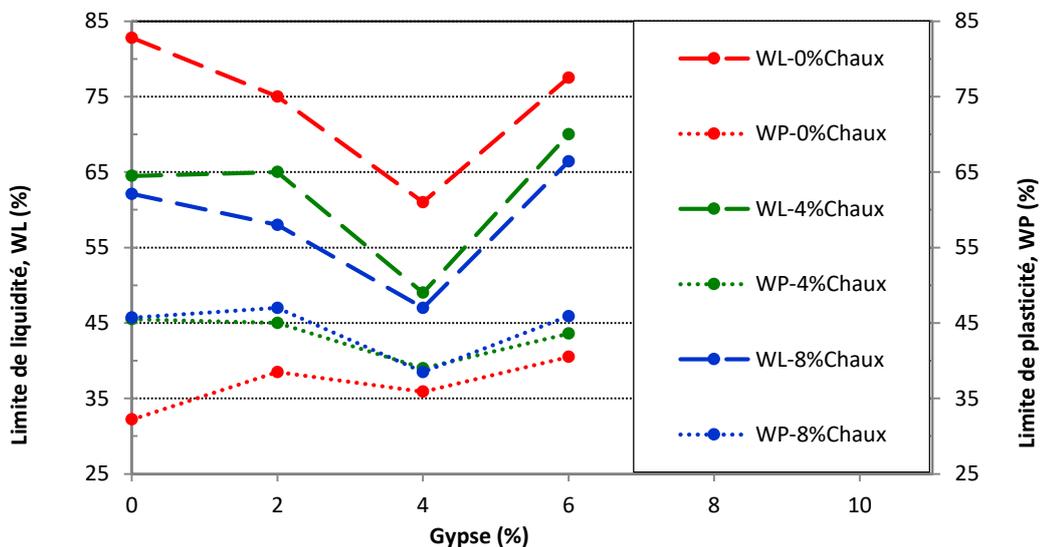


Figure 4.5- Effet de différents pourcentages de gypse sur de liquidité et de plasticité de sol gris (Annexe C.1).

4.4.2 La limite de l'indice de plasticité

Les résultats de l'effet de différents pourcentages de gypse sur l'indice de plasticité (I_p) du sol argileux gris sont présentés dans la **figure 4.6 (Voir Annexe C.2)**.

Nous constatons une diminution significative de l'indice de plasticité allant jusqu'à 4% de gypse après avoir atteint ce pourcentage nous remarquons une augmentation progressive et presque continue sauf en présence de 4% de chaux il y a des valeurs presque constantes de l'indice de plasticité jusqu'à 2% de gypse, lorsque cette valeur est atteinte, on constate une forte diminution pour 4% de gypse, si on passe ce pourcentage on assiste à une augmentation jusqu'à 6% de gypse.

Il y a des chercheurs qui ont obtenu les mêmes résultats notamment [Yilmaz and Civelekoglu, \(2009\)](#) où ils 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. Ils 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.

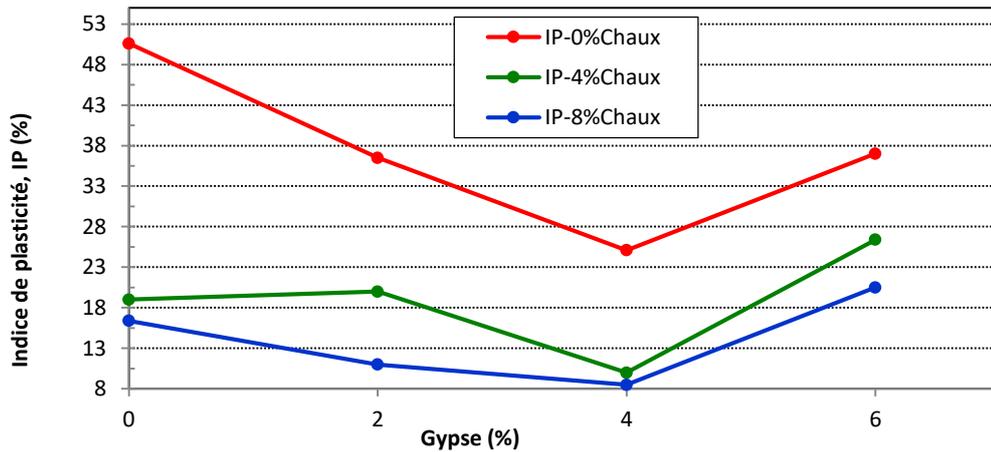


Figure 4.6- Effet de différents pourcentages de gypse sur l'indice de plasticité de sol gris étudié ([Annexe C.2](#))

4.5 Effet de gypse sur les propriétés de compactage

4.5.1 Effet sur teneur en eau optimale

Les résultats de l'effet de changement de l'ajout de gypse sur la teneur en eau optimale (ω_{opt}) du sol argileux gris sont présentés dans la **figure 4.7** ([Voir Annexe D.1](#)). On a constaté une baisse importante et remarquable de la teneur en eau lorsqu'il y a un pourcentage de 6% de gypse puis on constate une augmentation significative. Donc, on peut considérer que 4% de gypse comme un pourcentage optimal.

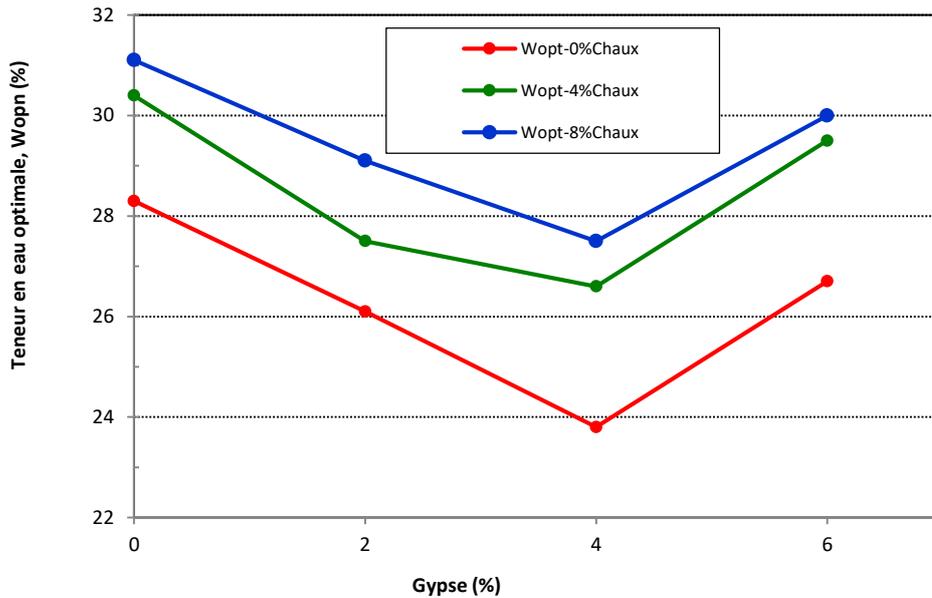


Figure 4.7- Effet de changement de valeur de l'ajout de gypse sur la teneur en eau optimale du sol gris ([Annexe D.1](#))

4.5.2 Effet sur la densité sèche maximale

Les résultats de l'effet de différents pourcentages de gypse sur la densité sèche maximale (γ_{dmax}) du sol argileux gris sont présentés dans la **figure 4.8** ([Voir Annexe D.2](#)). A partir de la figure ci-dessous, nous enregistrons une forte augmentation de la densité sèche maximale jusqu'à la valeur **4%** de gypse et puis une diminution progressive et forte a été accordée au-delà de cette teneur (**4%** de gypse), alors qu'il y a une stabilité fluctuante de la densité sèche maximale en l'absence de la chaux.

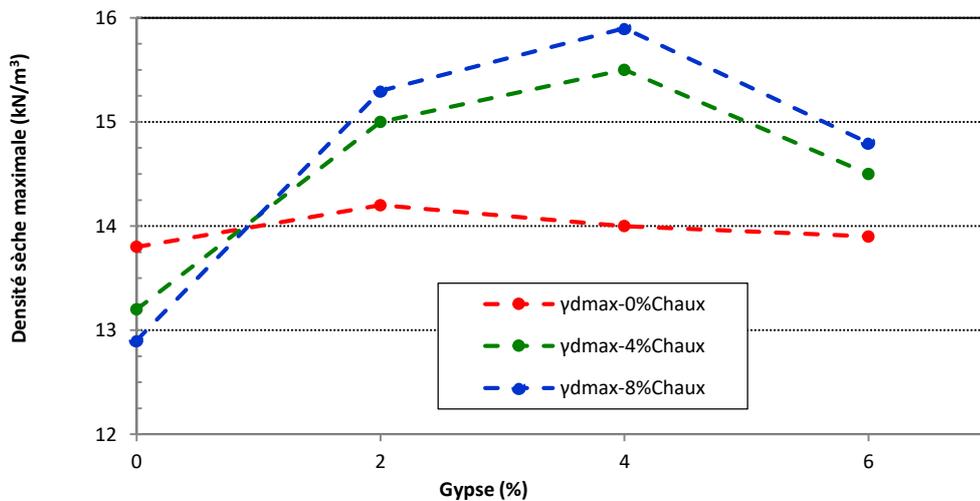


Figure 4.8- Effet de différent pourcentage de gypse sur la densité sèche maximale du sol gris argileux ([Annexe D.2](#))

4.6 Effet de gypse et de la chaux sur la classification du sol traité

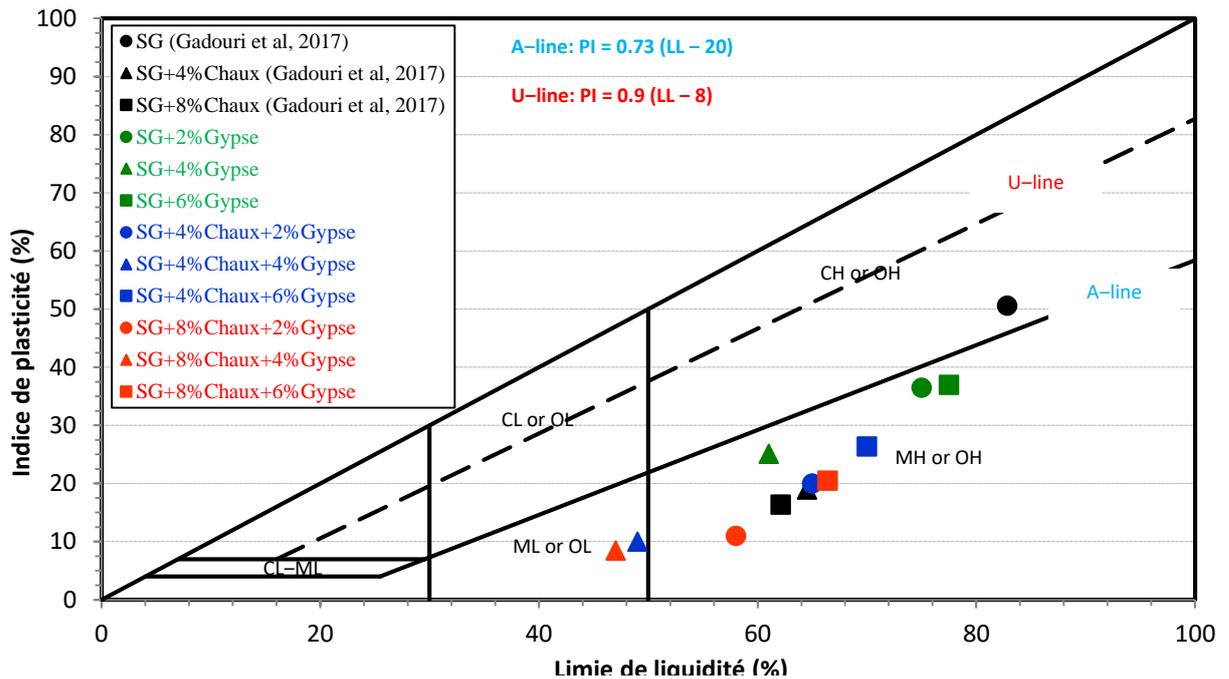


Fig. 4.9- Effets de Gypse sur la classification SG stabilisé à la chaux

En se basant sur la ASTM D2487-06, la ligne A sur l'abaque de plasticité sépare les limons des argiles symbolisées par M et C, respectivement. Cependant, $WL = 50\%$ sépare les sols à haute plasticité des sols à faible plasticité symbolisés par H et L, respectivement. De plus, la double classification classe d'argile-limon de faible plasticité symbolisée par CL–ML doit être utilisée lorsque les limites d'Atterberg sont tracées dans la zone hachurée de la carte de plasticité près de l'origine. Comme le montre la Figure 4.9, les échantillons du sol gris non stabilisés et stabilisés à la chaux avec et sans gypse sont classés en reportant les valeurs de leur indice de plasticité et de limite de liquidité sur une carte de plasticité afin de déterminer la nouvelle classification des sols selon le modèle unifié du système de classification des sols (USCS).

L'échantillon du sol gris naturel a été classé comme une argile de plasticité élevée (CH) car le point (WL, IP) représentant la classe du sol gris était au-dessus de la ligne A et à droite de la ligne $WL = 50\%$. Cependant, il est assez clair d'observer que le point représentant la classe du sol gris a été abaissé sous la ligne A et transformé en limon à forte plasticité (MH) en raison de l'ajout de chaux. Cependant, l'ajout de toute teneur en gypse aux échantillons du sol gris non stabilisés et stabilisés à la chaux a considérablement modifié leurs classifications en limon de forte plasticité (symbolisé par MH). Au même temps, pour les

Mêmes échantillons (sol gris non stabilisés et stabilisés à la chaux) stabilisés avec 8% de chaux contenant 4% de gypse, le point représentant la classe du sol gris est descendu sous la Ligne A (exactement à gauche de WL = ligne 50 %) et transformé en limon de faible plasticité (ML). Selon [Gadouri et al. \(2018\)](#), la floculation des particules est le résultat de la réaction électrique entre le cation de calcium (Ca^{2+} issu de la chaux et du gypse) et les particules d'argile qui entraîne le changement immédiat des limites de consistance, et par conséquent la modification de la classe du sol étudié.

4.7 Conclusion

L'étude en laboratoire réalisé sur l'effet de gypse sur les limites d'Atterberg et les propriétés de compactage d'un sol gris stabilisé à la chaux nous a permis de dégager les conclusions suivantes :

- La chaux fait diminuer significativement la limite de liquidité du sol gris étudié avec et sans présence de gypse. Cette diminution en W_L peut être attribuée à l'échange de cations qui s'est produit dans le sol par les ions divalents de calcium venant de l'addition de la chaux.
- L'utilisation de 8% de chaux n'a qu'une négligeable réduction apportée sur les valeurs de la W_L alors qu'un effet inverse a été observé pour le cas de la présence de 6% de chlorure de sodium où l'augmentation reste toujours remarquable.
- La chaux fait augmenter significativement la limite de plasticité du sol gris étudié avec et sans présence de gypse. Alors qu'on présence de 6% de gypse une augmentation considérable a été accordée.
- La présence de 6% de gypse fait accélérer l'augmentation de la WP est notamment avec l'addition de 8% de chaux. Il est suggéré que cette forte augmentation est liée à la forte concentration en gypse.
- La chaux fait diminuer significativement l'indice de plasticité du sol gris étudié avec et sans présence de gypse.
- L'addition d'une faible teneur en chaux est suffisante pour améliorer l'ouvrabilité du sol stabilisé.
- Un fort dosage en chaux, fait apporter une diminution presque négligeable dans l'indice de plasticité ce qui signifie qu'on est proche de l'optimum qui est peut être expliquée probablement par la saturation du système stabilisé.
- L'ajout de la chaux fait augmenter la teneur en eau optimale du sol gris étudié. Alors qu'un comportement inverse a été constaté où la teneur en eau optimale diminue avec

L'augmentation de la teneur en chaux et cela quel que soit le pourcentage de gypse utilisé. Cette diminution pourrait être due à la réaction d'échange de cations qui a provoqué la floculation des fractions argileuses du sol.

- L'addition de la chaux fait réduire significativement la densité sèche maximale du sol gris stabilisé.
- La présence de gypse dans le fluide interstitiel des échantillons du sol gris stabilisé fait diminuer l'épaisseur de la double couche électrique diffuse, ce qui emballait mieux les particules d'argile et par conséquent l'augmentation de la densité sèche maximale. De même manière, en faisant augmenter la densité sèche maximale de plus en plus en cas de présence de différents pourcentages de gypse.
- Selon l'abaque de plasticité de Casagrande, le sol étudié a été classé comme étant un sol de forte plasticité.
- L'addition de la chaux fait transformer la classe du sol gris étudié de forte plasticité à un limon à forte plasticité.
- La combinaison de 4 et 6% de gypse avec 4 ou 8 % de chaux fait transformer le sol gris étudié de forte plasticité à un limon à faible plasticité.
- La floculation des particules est le résultat de la réaction électrique entre le cation de calcium (Ca^{2+} issu de la chaux et du gypse) et les particules d'argile qui entraînent le changement immédiat des limites de consistance, et par conséquent la modification de la classe du sol étudié.

Conclusions Générales, Recommandations et Perspectives

- 1. Conclusions générales*
- 2. Recommandations*
- 3. Perspectives*

1. Conclusions générales

Une étude expérimentale approfondie a été effectuée au niveau du laboratoire géotechnique de l'université de Khemis Miliana afin d'évaluer quantitativement les effets apportés par la présence de différents teneurs en gypse, sur les limites d'Atterberg (ω_l , ω_p et IP), et les propriétés de compactage (ω_{opt} et γ_{dmax}), du sol argileux gris (SG) traité avec l'addition de la chaux. A la lumière des résultats des tests effectués, les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- Dans le premier chapitre, nous avons effectué une étude bibliographique sur les différentes techniques d'amélioration et de renforcement des sols instables. La technique de stabilisation chimique par l'addition des additifs minéraux a été choisie dans notre travail.
 - Dans le deuxième chapitre, nous avons réalisé une étude bibliographique sur les différents éléments perturbateurs de traitement des sols et ainsi leurs effets sur les sols améliorés chimiquement avec des ajouts minéraux (chaux, ciment, cendres volantes...etc.).
 - Au troisième chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés (lieu de prélèvement, préparation des échantillons) et ainsi leurs propriétés physico-mécaniques et Chimico-minéralogiques correspondantes. Puis, un programme expérimental a été mis en place afin de réaliser deux essais principaux à savoir : les limites d'Atterberg et le compactage.
 - Au quatrième chapitre, les résultats du programme expérimental réalisé sur les deux essais principaux, les limites d'Atterberg et le compactage, nous a permis de dégager les conclusions suivantes :
- La chaux fait diminuer significativement la limite de liquidité du sol gris étudié avec et sans présence de gypse. Cette diminution en W_L peut être attribuée à l'échange de cations qui s'est produit dans le sol par les ions divalents de calcium venant de l'addition de la chaux.
 - L'utilisation de 8% de chaux n'a qu'une négligeable réduction apportée sur les valeurs de la W_L alors qu'un effet inverse a été observé pour le cas de la présence de 6% de chlorure de sodium où l'augmentation reste toujours remarquable.
 - La chaux fait augmenter significativement la limite de plasticité du sol gris étudié avec et sans présence de gypse. Alors qu'on présence de 6% de gypse une augmentation considérable a été accordée.

Conclusions générales, recommandations et perspectives

- La présence de 6% de gypse fait accélérer l'augmentation de la WP est notamment avec l'addition de 8% de chaux. Il est suggéré que cette forte augmentation est liée à la forte concentration en gypse.
- La chaux fait diminuer significativement l'indice de plasticité du sol gris étudié avec et sans présence de gypse.
- L'addition d'une faible teneur en chaux est suffisante pour améliorer l'ouvrabilité du sol stabilisé.
- Un fort dosage en chaux, fait apporter une diminution presque négligeable dans l'indice de plasticité ce qui signifie qu'on est proche de l'optimum qui est peut être expliquée probablement par la saturation du système stabilisé.
- L'ajout de la chaux fait augmenter la teneur en eau optimale du sol gris étudié. Alors qu'un comportement inverse a été constaté où la teneur en eau optimale diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux et cela quelques soit le pourcentage de gypse utilisé. Cette diminution pourrait être due à la réaction d'échange de cations qui a provoqué la floculation des fractions argileuses du sol.
- L'addition de la chaux fait réduire significativement la densité sèche maximale du sol gris stabilisé.
- La présence de gypse dans le fluide interstitiel des échantillons du sol gris stabilisé fait diminuer l'épaisseur de la double couche électrique diffuse, ce qui emballait mieux les particules d'argile et par conséquent l'augmentation de la densité sèche maximale. De même manière, en faisant augmenter la densité sèche maximale de plus en plus en cas de présence de différents pourcentages de gypse.
- Selon l'abaque de plasticité de Casagrande, le sol étudié a été classé comme étant un sol de forte plasticité.
- L'addition de la chaux fait transformer la classe du sol gris étudié de forte plasticité à un limon à forte plasticité.
- La combinaison de 4 et 6% de gypse avec 4 ou 8 % de chaux fait transformer le sol gris étudié de forte plasticité à un limon à faible plasticité.
- La floculation des particules est le résultat de la réaction électrique entre le cation de calcium (Ca^{2+} issu de la chaux et du gypse) et les particules d'argile qui entraînent le changement immédiat des limites de consistance, et par conséquent la modification de la classe du sol étudié.

2. Recommandations

- Nous recommandons fortement l'utilisation de gypse avec ou sans chaux en raison de son effet positif et cela se traduit par une diminution du niveau de plasticité et donc une modification de la classification du sol.
- Chaque site est un cas particulier et il convient d'évaluer la compétitivité du traitement par rapport à des techniques plus traditionnelles (basées sur l'utilisation de matériaux empruntés) grâce à une évaluation comparative.
- Le traitement facilite le déplacement sur site et réduit les temps d'arrêt dus aux intempéries, ce qui entraîne :
 - Une diminution des coûts de chantier ;
 - Meilleur respect des délais de réalisation.

3. 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 les sulfates à savoir : 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 le gypse 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.

Références Bibliographiques



References Bibliographies

Aggoun S., Cheikh-Zouaoui M., Chikh N., Duval R., (2008), Effect of some add mixtures on the setting time and strength evolution of cement pastes at early ages Construction and Building Materials, vol. 22, n°2, pp.106-110.

Aldaood, A., Bouasker, M. and Al-Mukhtar, M. (2014a). Geotechnical properties of lime-treated gypseous soils, Applied Clay Science, Vol. 88-89, pp. 39–48, doi: 10.1016/j.clay.2013.12.015.

Ansary, M.A., Noor, M.A. and Islam, M. (2006). *Effect of fly ash stabilization on geotechnical properties of Chittagong coastal soil*. The geotechnical symposium on soil stress-strain behavior, Roma, Italy, pp. 443–454, doi: 10.1007/978-1-4020-6146-2_26.

Asgari, M.R, Dezfuli, A.b., & Bayat, M. (2015). Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime. Arabian Journal of Geosciences,8(3), 1439-1452.

ASTM D2487–06.: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, ASTM – American Society for Testing and Materials. (2006)

Attoh Okine, N.O. (1995). *Lime treatment of laterite soils and gravels-revisite*. Construction and Building Materials, Vol. 9, No. 5, pp. 283–287, doi: 0950-0618(95)00030-5.

Basha, E.A., Hashim, R. and Muntohar, A.S. (2003). Effect of the cement-rice husk ash on the plasticity and compaction of soil, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 1–8, <http://www.ejge.com/2003/Ppr0304/Abs0304.htm>.

Bell, F.G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soil. Engineering Geology, Vol. 42, No. 4, pp. 223–237, doi: 10.1016/0013-7952(96)00028-2.

Caillère S. and Henin S. Rautureau M. (1982). *Minéralogie des argiles .1.Classification et nomenclature*, INRA, Actualisés scientifiques et agronomiques.9. Ed, Masson, Paris, 2ime édition, (p. 189).

Celik, E, & Nalbantoglu, Z. (2013). Effects of ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-stabilized sulphate-bearing soils. Engineering Geology, 163,20-25.

Cokça, E. (2001). Use of class c fly ashes for the stabilisation of an expansive soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(7), 568-573.

- Eades, J.L. and Grim, R.E. (1960). Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. Highway Research Board Bulletin, National Research Council, Washington, DC, No. 262, pp. 51–63.
- Gaafer, M.B. (2015). Soil Improvement Techniques. International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol .6, No.12, pp. 217-222.
- Gabre, 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 le traitement des sols argileux par des ajouts minéraux
- Gadouri, H.; Harichane, K.; Ghrici, M.: Assessment of sulphates effect on the classification of soil–lime–natural pozzolana mixtures based on the Unified Soil Classification System (USCS). Inter. J. Geotech. Eng. **12**(3), 293-301 (2018). <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1275429>
- Gay, G. and Schad, H. (2000). *Influence of cement and lime additives on the compaction properties and shear parameters of fine grained soils*. Otto-Graf Journal, Vol. 11, pp. 19–31.
- George, S.Z., Ponniah, D.A. and Little, J.A. (1992). Effect of temperature on lime-soil stabilization. Construction and Building Materials, Vol. 6, No. 4, pp. 247–252, doi: 10.1016/0950-0618(92)90050-9.
- Ghobadi, M.H., Babazadeh, R. and Abdilor, Y. (2014). *Utilization of lime for Stabilizing Marly Soils and Investigating the Effect of pH Variations on shear Strength Parameters*. Journal of Engineering Geology, Vol. 8, No. 1, pp. 1939–1962.
- Grim R.E. (1962) Clay mineralogy in relation to the Engineering properties of clay materials. Mc Craw Hill, pp. 204-277.
- Harichane, K., Ghrici, M. and Kenai, S. (2011a). *Effect of curing period on shear strength of cohesive soils stabilized with combination of lime and natural pozzolana*, International Journal of Civil Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 90–96.
- Ho, M.H. and Chan, C.M. (2011). Some Mechanical Properties of Cement Stabilized Malaysian Soft Clay. International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, Vol. 5, No. 2, pp. 76–83, scholar.waset.org/1999.3/10197.
- Hossain, K.M.A., Lachemi, M. and Easa, S. (2007). *Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua New Guinea*. Resources Conservation and Recycling, Vol. 51, No. 4, pp. 711–731, doi: 10.1016/j.resconrec.2006.12.003.
- Jha, A.K. And Sivapullaiah, P.V. (2015). *Mechanism of improvement in the strength and volume change behavior of lime stabilized soil*. Engineering Geology, Vol. 198, pp. 53–64, doi: 10.1016/j.enggeo.2015.08.020.

- Khattab S.A. AL-MUKHTAR M. & FLEUREAU J.-M. (2007) – Long-Term Stability Characteristics of a Lime-Treated Plastic Soil, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, 4, 358-366.
- 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.
- Laguros, J.G. (1962). Effect of chemicals on soil-cement stabilization. *Retrospective Theses and Dissertations*, Paper 2061, p. 167, <http://lib.dr.iastate.edu/rtd/2061/>.
- Laguros, J.G. (1962). Effect of chemicals on soil-cement stabilization. *Retrospective Theses and Dissertations*, Paper 2061, p. 167, <http://lib.dr.iastate.edu/rtd/2061/>.
- LCPC/SETRA (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 (aussi appelé GTS). Edition LCPC (actuellement IFSTTAR). Réf. D9924.
- Levêque D. (1984). *Géologie appliquée au génie civil, au génie nucléaire et à l'environnement*. Paris, Lavoisier, tec et doc, édition, 1984.
- Madhyannapu, R, S., 2007. Deep mixing technology for mitigation of swell-shrink behavior of expansive depths. *Doctoral dissertations*, University of Texas at Arlington.
- Marteau P. « Memento roches et minéraux industriels –Gypse et anhydrite-» rapport BRGM R37772, Orléans cedev 2- France, 06/1993.
- Mitchell J.K. (1976) *Fundamentals of soil behavior*, series in soils engineering. John Wiley & sons Inc, (p. 422).
- Mouroux P., Magron P. et Pinte J.C., (1987) *La construction économique sur sols gonflants*, Manuel et Methodes n 14 Ed. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans.
- Okagbue, C.O. and Ocholor, O.H. (2007). The potential of cement-stabilized coal-reject as a construction material. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 66, No. 2, pp. 143–151, doi: 10.1007/s10064-005-0033-y.
- Ola, S.A. (1977). The potentials of lime stabilization of lateritic soils. *Engineering Geology*, Vol. 11, No. 4, pp. 305–317, doi: 10.1016/0013-7952(77)90036-9.
- Osula, D. O. (1991). Lime modification of problem laterite. *Engineering Geology*, 30(2), 141-154.
- Osula, D. O. A. (1996). A comparative evaluation of cement and lime modification laterite. *Engineering geology*, 42(1) 71-81.
- Osula, D.O.A. (1991). Lime modification of problem laterite. *Engineering Geology*, Vol. 30, No. 2, pp. 141–154, doi: 10.1016/0013-7952(91)90040-R
- Ottawa (1977). *Conseil national de recherche du Canada. Les effets des halogénures alcalins dans l'environnement canadien*. CNRC n 015019, Comité associé des critères scientifiques concernant l'état de l'environnement.

- Petry, T.M., and Little, D.N., 2002. Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures-history, practice, and future. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14 (6), 447-460.
- Puppala, A.J., Griffin, J.A., Hoyos, L.R. and Chmotid, S. (2004). Studies on Sulfate-Resistant Cement Stabilization Methods to Address Sulfate-Induces Soil Heave. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 391-402, doi : 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130 :4(391).
- Rahman, M. A. (1986). The potentials of some stabilizers for the use of lateritic soil in construction. *Building and Environment*, 21(1),57-61
- Rodriguez, R., 2008. Engineering behavior of soft clays treated with circulating fluidized bed combustion fly ash. Master of Science, University of Puerto Rico Mayagüez Campus.
- Segui, P., Aubert, J.E., Husson, B. and Measson, M. (2013). Utilization of a natural pozzolan as the main component of hydraulic road binder. *Construction and Building Materials*, Vol. 40, pp. 217–223, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.085.
- Sivapullaiah, P, V, &, Jha, A. K. (2014). Gypsum induced strength behaviour of fly ash-lime stabilized expansive soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(5), 1261-1273.
- Sivapullaiah, P. V, Sridharan, A. and Ramesh, H.N. (2000). Strength behaviour of limetreated soils in the presence of sulphate. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, No. 6 pp.1358-1367, doi: 10.1139/t00-052.
- Teaoka F, TaKahashi J: Dimensional changes and pressure of dental stones set in silicone rubber Impressions. *Dent Mater* 2000; 16; drite 145-149.
- 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.
- Unruh, J. T., 2010. Evaluation of lime pretreatment for cementitious stabilization of highplasticity soil. Master of Science, Oklahoma State University.
- Yilmaz, I. and Civelekoglu, B. (2009). Gypsum: an additive for stabilization of swelling clay soils. *Applied Clay Science*, Vol. 44, pp. 166–172, doi: 10.1016/j.clay.2009.01.020.

----- Liste des Normes Utilisées -----

- NF 94-074 Essai l'appareil triaxial de révolution
- NF P11-300 Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières
- NF P18-540 Granulats
- NF P18-598 Equivalent de sable
- NF P94-011 Description — Identification —Dénomination des sols

- NF P94-047 Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un matériau.
- NF P94-048 Détermination de la teneur en carbonate
- NF P94-049-1 Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux
- NF P94-049-2 Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux
- NF P94-050 Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux.
- NF P94-051 Détermination des limites d'Atterberg.
- NF P94-052-1 Détermination des limites d'Atterberg.
- NF P94-053 Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire.
- NF P94-054 Détermination de la masse volumique des particules solides des sols.
- NF P94-055 Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un sol .
- NF P94-057 Analyse granulométrique des sols.
- NF P94-058 Détermination de l'état de décomposition (humidification) des sols organiques- Essai Von Post
- NF P94-059 Détermination des masses volumiques minimale et maximale des sols non cohérents
- NF P94-060-1 Essai de dessiccation.
- NF P94-060-1 Essai de dessiccation.
- NF P94-067 Analyse granulométrique des sols
- NF P94-068 Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux.
- NF P94-071 Essai de cisaillement rectiligne à la boîte-Parti 1 : cisaillement direct
- NF P94-072 Essai scissométrique en laboratoire
- NF P94-077 Essai de compression uniaxiale
- NF P94-090-1 Essai œdométrique
- NF P94-091 Essai de gonflement à l'œdomètre
- NF P94-110 Essai pressiométrique Ménard
- NF P94-114 Essai de pénétration dynamique type A
- NF P94-130 Essai de pompage
- NF P94-132 Essai d'eau Lefranc
- NF P94-202 Prélèvement des sols et des roches
- NF P94-58 Détermination de l'état de décomposition (humification) des sols organiques.

Annexes



ANNEXE A

A1

Effet de la chaux sur la limite de liquidité et de plasticité

Chaux	0	4	8
WL-0%G (Gadouri et al, 2017)	82,8	64,5	62,1
WP-0%G (Gadouri et al, 2017)	32,2	45,5	45,7
WL-2%G-Présente étude	75	65	58
WP-2%G-Présente étude	38,5	45	47
WL-4%G-Présente étude	61	49	47
WP-4%G-Présente étude	35,9	39	38,5
WL-6%G-Présente étude	77,5	70	66,4
WP-6%G-Présente étude	40,5	43,6	45,9

A2

Effet de la chaux sur l'Indice de plasticité

Chaux	0	4	8
IP-0%G (Gadouri et al, 2017)	50,6	19	16,4
IP-2%G-Présente étude	36,5	20	11
IP-4%G-Présente étude	25,1	10	8,5
IP-6%G-Présente étude	37	26,4	20,5

ANNEXE B

B1

Effet de la chaux sur la teneur en eau optimale

Chaux	0	4	8
Wopt-0%G (Gadouri et al, 2019)	28,3	30,4	31,1
Wopt-2%G-Présente étude	26,1	27,5	29,1
Wopt-4%G-Présente étude	23,8	26,6	27,5
Wopt-6%G-Présente étude	26,7	29,5	30

B2

Effet de la chaux sur la densité sèche maximale

Chaux	0	4	8
γ_{dmax} -0%G (Gadouri et al, 2019)	13,8	13,2	12,9
γ_{dmax} -2%G-Présente étude	14,2	15	15,3
γ_{dmax} -4%G-Présente étude	14	15,5	15,9
γ_{dmax} -6%G-Présente étude	13,9	14,5	14,8

ANNEXE C

C1

Effet du gypse sur la limite de liquidité et de plasticité

Chaux	0	2	4	6	8	10
WL-0%Chaux	82,8	75	61	77,5		
WP-0%Chaux	32,2	38,5	35,9	40,5		
WL-4%Chaux	64,5	65	49	70		
WP-4%Chaux	45,5	45	39	43,6		
WL-8%Chaux	62,1	58	47	66,4		
WP-8%Chaux	45,7	47	38,5	45,9		

C2

Effet du gypse sur la densité sèche maximale

Chaux	0	2	4	6
IP-0%Chaux	50,6	36,5	25,1	37
IP-4%Chaux	19	20	10	26,4
IP-8%Chaux	16,4	11	8,5	20,5

ANNEXE D

D1

Effet du gypse sur la teneur en eau optimale

Gypse	0	2	4	6
Wopt-0%Chaux	28,3	26,1	23,8	26,7
Wopt-4%Chaux	30,4	27,5	26,6	29,5
Wopt-8%Chaux	31,1	29,1	27,5	30

D2

Effet du gypse sur la densité sèche maximale

Gypse	0	2	4	6
γ_{dmax} -0%Chaux	13,8	14,2	14	13,9
γ_{dmax} -4%Chaux	13,2	15	15,5	14,5
γ_{dmax} -8%Chaux	12,9	15,3	15,9	14,8