



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la

Recherche Scientifique

Université Djilali 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

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 des effets apportés par la présence des  
chlorures sur la plasticité et le compactage  
D'un sol argileux : Cas du tronçon d'autoroute  
Harchoun-Khemis Miliana PK172**

Réalisé par :

**Mlle. AMRANI Noussaiba**

**Mr. ATTOU Mohamed Amine**

Déposé le: **22/06/2022**

Soutenu le **03/07/2022** devant le jury composé de :

<b>Dr. BOUCEFIANE Abdelkader</b>	MCB	Université Khemis-Miliana	Président
<b>Dr. GADOURI Hamid</b>	MCA	Université Khemis-Miliana	Promoteur
<b>Dr. MEZIANI Brahim</b>	MCB	Université Khemis-Miliana	Examineur

Année universitaire : 2021/2022

# **DEDICACE**

*Nous dédions tous les deux notre projet de fin d'étude à la mémoire de notre frère, ami, le défunt étudiant ABOUN Abellatif*

*Je dédie ce projet :*

*A la mémoire de l'être cher qui nous a quittés trop tôt.*

*A mon père : LAKHDAR AMRANI*

*A ma mère qui a toujours cru en moi, soutenu et encouragé.*

*A mes frères et mes sœurs*

*ABD EL AZIZ, ILHAM, SYRINE*

*A nièce et mon neveu RAYHANA et YAKIN*

*A toute ma famille*

*A mon binôme, ATTOU MOHAMED AMINE*

*A Mme RAHMOUNI Amel géologue à Avignon, pour ces précieux conseils et directives, dans mes recherches.*

*A mes professeurs : DR. BRAHIM MEZIANI, DR. NACERA HADJ MOHAMED, Mr. GHARBI, Mr. SADAK. Pour leurs soutiens moraux et leurs directives qui m'ont permis d'avancer dans mes recherches, et de progresser.*

*A mes meilleures amies*

*KENZA, DJIHAD, DJOHAR, MANEL, ASMA*

*A toutes les personnes qui ont participé à mon succès.*

*Noussaiba*



# **DEDICACE**

*Afin d'être reconnaissant envers ceux qui m'ont soutenu et encouragé à réaliser ce travail de recherche, je dédie ce mémoire :*

*A mes grands-parents, à ma défunte grand-mère.*

*A mes parents pour leurs soutiens*

*A mes frères YOUNES, ABD EL RAHMAN, NADIR*

*A tous les membres de ma famille.*

*A mon binôme AMRANI NOUSSAIBA*

*A mes professeurs : Mr. BRAHMI, Mr. SADAK, Mr.*

*GHARBI...A tous mes amis*

AMINE



# Remerciement

Nous exprimons toute notre gratitude et sincère dévouement à Dieu Le Tout Puissant qui grâce à son aide nous avons terminé ce modeste travail

Nous tenons à remercier chaleureusement notre promoteur **Dr.Gadouri Hamid** (Enseignant à l'UDBKM) **pour** leurs aides et leurs encadrements, ses encouragements et surtout sa compréhension durant toute sa période de préparation de ce mémoire.

Nous remercions également l'honorable jury qui a bien voulu examiner notre Travail : **Dr. BOUCEFIANE Abdelkader** (Enseignant à l'UDBKM) comme président de jury, **Dr. MEZIANI Brahim** (Enseignant à l'UDBKM) comme examinateur.

Nous adressons de chaleureux remerciements à tous les enseignants et les Travailleurs d'université de Djilali Bounaama à Khemis Miliana, pour les moyens qui ont été mis à notre disposition durant toute la durée de la formation.

Je tiens à remercier particulièrement tous les membres du Département de science de la terre et l'univers Pour leurs soutiens et leurs aides

Nous remercions aussi **Mme, HADJER** responsable de laboratoire géotechnique au niveau de notre université, **Monsieur YAMANI Mohamed el Hadi**, gérant dans un laboratoire d'étude géotechnique (SARL ENTEST).

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

Merci à vous tous.

## الملخص:

أجريت هذه الدراسة لتقييم تأثير كلوريد الصوديوم (NaCl) كمادة مضافة على الخصائص الجيوتقنية للتربة الطينية الرمادية (GS) المستقرة باستعمال النسب 0، 4 و 8% من الجير. حيث تمت إضافة كلوريد الصوديوم إلى التربة الطينية الرمادية باستعمال النسب 0، 2، 4 و 6% نسبة لوزن التربة الجافة. أثبتت النتائج المتحصل عليها أن مؤشر الدونة (PI) للتربة الطينية الرمادية انخفض مع زيادة كلوريد الصوديوم المستخدم لوحده أو مع كميات مختلفة من الجير. ومع ذلك، وجد أن إضافة أي كمية من كلوريد الصوديوم إلى عينات التربة الطينية الرمادية أو المستقرة بالجير لها تأثير إيجابي من خلال تغيير تصنيفها، خاصة مع وجود كلوريد الصوديوم. بالإضافة إلى ذلك، لوحظ انخفاض في الكثافة الجافة القصوى وارتفاع في محتوى الماء الأمثل مع زيادة محتوى الجير بسبب تفاعل التبادل الكاتيوني الذي تسبب في تلبد جزيئات الطين. أيضاً، وجد أن أقصى كثافة جافة تزداد مع زيادة محتوى كلوريد الصوديوم المستخدم، بينما المحتوى الأمثل للماء ينخفض مع زيادة محتوى كلوريد الصوديوم إلى 4% ثم يزداد تدريجياً.

- الكلمات الرئيسية: التربة الطينية الرمادية (GS) • الجير (L) • كلوريد الصوديوم (NaCl) • الخصائص الجيوتقنية • التثبيت.

**Abstract:**

This study was conducted to evaluate the effect of sodium chloride (NaCl) as an additive on the geotechnical properties of grey clayey soil (GS) stabilized with 0, 4 and 8% lime. Each additive was added to the GS with 0, 2, 4 and 6% by weight of dry soil. However, it was observed that the plasticity index (PI) of the GS decreased with the increase of NaCl used alone or in combination with different amounts of lime. However, the addition of any amounts of NaCl to the natural or lime-stabilized GS samples was found to have a positive effect by changing their classification, particularly with the presence of NaCl. In addition, the maximum dry density decreased and the optimum moisture content increased as the lime content increased due to the cation exchange reaction that caused the flocculation of the clay particles. Moreover, it was found that the maximum dry density increased with the increase in the NaCl content used, while the optimum moisture content decreased with the increase in NaCl content to an optimum of 4% and then increased gradually.

**Keywords:** Grey clayey soil (GS) • Lime (L) • Sodium chloride (NaCl) • Geotechnical properties • Stabilization.

## **Résumé :**

Cette étude a été réalisée pour évaluer l'effet du chlorure de sodium (NaCl) utilisé comme un additif sur les (limites d'Atterberg et compactage) du sol argileux gris (SG) stabilisé avec 0, 4 et 8% de chaux. Chaque additif a été ajouté au SG avec 0, 2, 4 et 6% en poids du sol sec. Cependant, il a été observé que l'indice de plasticité (IP) du SG diminuait avec l'augmentation de NaCl utilisé seul ou combiné avec différentes quantités de chaux. Cependant, l'ajout de toute quantité de NaCl aux échantillons du SG naturel ou stabilisé à la chaux s'est avéré avoir un effet positif en faisant modifier leur classification, et notamment avec la présence de NaCl. De plus, la densité sèche maximale a diminué et la teneur en eau optimale a augmenté à mesure que la teneur en chaux augmentait en raison de la réaction d'échange de cations qui a provoqué la floculation des particules d'argile. En outre, il a été constaté que la densité sèche maximale augmentait avec l'augmentation de la teneur en NaCl utilisé, tandis que la teneur en eau optimale diminuait avec l'augmentation de la teneur en NaCl jusqu'à un optimum de 4% puis elle augmente progressivement.

**Mots-clés :** Sol argileux gris (GS) • Chaux • Chlorure de sodium (NaCl) • Propriétés géotechniques • Stabilisation

**Table des Matières**

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

**Introduction Générale**

<b>1 Cadre général de l'étude.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Objectifs de recherche.....</b>	<b>1</b>
<b>3 Plan de travail.....</b>	<b>2</b>

**Chapitre 1**

**Méthodes d'amélioration des mauvais sols et éléments perturbateur**

<b>1.1 Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Identification des sols.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Classification des sols.....</b>	<b>5</b>
1.3.1 La classification L.C.....	6
1.3.1.1 Sols grenus .....	6
1.3.1.2 Sols fins.....	7
1.3.2 Classification LPC modifiée.....	7
1.3.3 Classification des sols selon la nomenclature GTR .....	8

<b>1.4 Sols mous « compressibles » .....</b>	<b>8</b>
1.4.1 Types des sols mous « compressibles ».....	9
1.4.1.1 Les limons .....	9
1.4.1.2 Les vases .....	9
1.4.1.3 Les tourbes .....	9
1.4.1.4 Les marnes.....	9
1.4.1.5 Les argiles .....	10
1.4.2 Propriétés et caractéristiques des sols compressibles (mous).....	11
1.4.3 Les minéraux argileux .....	13
1.4.3.1 Les groupes d'argiles .....	14
<b>1.5 Principaux problèmes des sols médiocres.....</b>	<b>18</b>
1.5.1 Phénomène de gonflement.....	18
1.5.1.1 Cas des bâtiments .....	19
1.5.1.2 Cas des chaussées .....	19
1.5.2 Le Tassement .....	20
1.5.3 Les Glissements .....	20
<b>1.6 Techniques d'amélioration des mauvais sols.....</b>	<b>20</b>
1.6.1 Techniques thermiques .....	22
1.6.2 Techniques hydromécaniques .....	22
1.6.3 Techniques de renforcement in situ .....	24
1.6.4 Techniques mécaniques.....	24
1.6.4.1 Compactage de surface .....	24

## Table de Matières

---

1.6.4.2 Compactage dynamique (ou pilonnage) .....	25
1.6.4.3 Vibrocompactage (vibroflottation) .....	25
1.6.5 Techniques chimiques .....	26
1.6.5.1 Amélioration des sols par addition d'ajouts minéraux .....	26
1.6.6 Techniques par inclusion .....	28
1.6.6.1 Le renforcement par inclusions rigides verticales .....	28
1.6.6.2 Colonnes ballastées.....	29
<b>1.7 Eléments perturbateurs de traitement chimique des sols.....</b>	<b>29</b>
1.7.1 Définition d'un élément perturbateur .....	29
1.7.1.1 La matière organique .....	30
1.7.1.2 Les chlorures .....	31
1.7.1.3 Les phosphates.....	31
1.7.1.4 Les nitrates .....	31
1.7.1.5 Les sulfates .....	32
1.7.2 Les effets des éléments chimiques .....	32
1.7.2.1 Le soufre (sous forme de sulfate ou de sulfure) .....	33
1.7.2.2 Les matières organiques.....	33
1.7.2.3 Les nitrates (NO <sub>3</sub> ) .....	33
1.7.2.4 Les phosphates (PO <sub>4</sub> ) .....	33
<b>1.8 Conclusion.....</b>	<b>33</b>

## Chapitre 2

### Effet des ajouts minéraux sur les sols stabilisés avec et sans présence des composés chimiques

<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>35</b>
<b>2.2 Effet de la chaux sur les propriétés des sols instables .....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.1 Effet de la chaux sur la plasticité .....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.1.1 En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.1.2 En présence d'éléments perturbateurs.....</b>	<b>36</b>
2.2.2 Effet de la chaux sur le compactage.....	37

## *Table de Matières*

---

<b>2.2.2.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>37</b>
<b>2.2.2.2</b>	<b>En présence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>37</b>
2.2.3	Effets de la chaux sur la résistance à la compression.....	38
<b>2.2.3.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>38</b>
<b>2.2.3.2</b>	<b>En présence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>39</b>
2.2.4	Effet de la chaux sur la résistance au cisaillement .....	39
<b>2.2.4.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>39</b>
<b>2.2.4.2</b>	<b>En présence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>40</b>
2.2.5	Effet de la chaux sur la compressibilité.....	41
<b>2.2.5.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>41</b>
<b>2.2.5.2</b>	<b>En présence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>41</b>
<b>2.3</b>	<b>Effet du ciment sur les propriétés des sols instables .....</b>	<b>42</b>
2.3.1	Effet du ciment sur la plasticité.....	42
<b>2.3.1.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>42</b>
2.3.2	Effet du ciment sur le compactage .....	42
2.3.3	Effet du ciment sur la résistance à la compression .....	43
<b>2.3.3.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>43</b>
<b>2.3.3.2</b>	<b>En présence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>44</b>
2.3.4	Effet du ciment sur la résistance au cisaillement .....	46
<b>2.3.4.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>46</b>
<b>2.3.4.2</b>	<b>En présence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>47</b>
2.3.5	Effet du ciment sur le gonflement .....	47
<b>2.3.5.1</b>	<b>En présence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>47</b>
<b>2.4</b>	<b>Effet des cendres volantes sur les propriétés des sols instables .....</b>	<b>49</b>
2.4.1	Effet des cendres volantes sur la plasticité .....	49
<b>2.4.1.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>49</b>
2.4.2	Effet de la combinaison chaux/ cendres volantes .....	49
<b>2.4.2.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>49</b>
<b>2.4.2.2</b>	<b>En présence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>50</b>
2.4.3	Effet des cendres volantes sur le compactage.....	50
<b>2.4.3.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>50</b>
2.4.4	Effet des cendres volantes sur la compression.....	51
<b>2.4.4.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>51</b>
2.4.5	Effet des cendres volantes sur la résistance au cisaillement .....	51

## *Table de Matières*

---

<b>2.4.5.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>51</b>
2.4.6	Effet des cendres volantes sur la compressibilité .....	52
<b>2.4.6.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>52</b>
<b>2.5</b>	<b>Effet de la pouzzolane naturelle sur les propriétés des sols instables .....</b>	<b>53</b>
2.5.1	Effet de la pouzzolane naturelle sur la plasticité .....	53
<b>2.5.1.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>53</b>
<b>2.5.1.2</b>	<b>En présence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>53</b>
2.5.2	Effet de la pouzzolane naturelle sur le compactage .....	54
<b>2.5.2.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>54</b>
2.5.3	Effet de la pouzzolane naturelle sur la compression .....	54
<b>2.5.3.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>54</b>
<b>2.5.3.2</b>	<b>En présence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>55</b>
2.5.4	Effet de la pouzzolane naturelle sur la résistance au cisaillement .....	56
<b>2.5.4.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>56</b>
<b>2.5.4.2</b>	<b>En présence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>56</b>
<b>2.6</b>	<b>Effet de la fumée de silice sur les propriétés des sols instables .....</b>	<b>57</b>
2.6.1	Effet de la fumée de silice sur la plasticité .....	57
<b>2.6.1.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>57</b>
2.6.2	Effet de la fumée de silice sur le compactage.....	58
<b>2.6.2.1</b>	<b>En absence d'éléments perturbateurs .....</b>	<b>58</b>
2.6.3	Effet de la fumée de silice sur la compression.....	58
<b>2.7</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>59</b>

**Chapitre 3**

**Etude expérimentale**

<b>3.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>60</b>
<b>3.2</b>	<b>Lieu de prélèvement.....</b>	<b>60</b>
3.2.1	Préparation.....	60
3.2.2	Identification et caractérisation du sol.....	61
<b>3.3</b>	<b>La chaux.....</b>	<b>63</b>
3.3.1	Chaux utilisée.....	64
3.3.2	Produits chimiques.....	65
<b>3.4</b>	<b>Déroulement des essais.....</b>	<b>66</b>
3.4.1	Combinaison des échantillons.....	66
<b>3.5</b>	<b>Propriétés étudiées.....</b>	<b>67</b>
3.5.1	Limites d'Atterberg.....	67
3.5.1.1	Principe des limites d'Atterberg.....	67
3.5.1.2	Détermination de la limite de liquidité.....	68
3.5.1.3	Détermination de la limite de plasticité.....	69
3.5.1.4	Détermination de l'indice de plasticité.....	70
3.5.2	Compactage.....	70
3.5.2.1	Principe de l'essai.....	70
3.5.2.2	Détermination de la densité sèche.....	72
3.5.2.3	Détermination de la teneur en eau.....	72
<b>3.6</b>	<b>Programme expérimental prévu.....</b>	<b>73</b>
<b>3.7</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>74</b>

**Chapitre 4**

*Analyse et Interprétation des Résultats*

<b>4.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>75</b>
<b>4.2</b>	<b>L'effet de la chaux sur les limites d'Atterberg.....</b>	<b>75</b>
4.2.1	L'effet de la chaux sur la limite de liquidité et de plasticité WP.....	75
4.2.2	L'effet de la chaux sur l'indice de plasticité.....	76
<b>4.3</b>	<b>L'effet de la chaux sur le compactage.....</b>	<b>77</b>
4.3.1	L'effet de la chaux sur la teneur en eau optimal.....	77
4.3.2	L'effet de la chaux sur la densité sèche maximal .....	78
<b>4.4</b>	<b>L'effet de NaCl sur les limites d'Atterberg.....</b>	<b>78</b>
4.4.1	L'effet de NaCl sur la limite de liquidité WL et de plasticité WP.....	78
4.4.2	L'effet de NaCl sur l'indice de plasticité .....	80
<b>4.5</b>	<b>L'effet des chlorures de sodium sur le compactage.....</b>	<b>80</b>
4.5.1	L'effet de NaCl sur la teneur en eau optimal.....	80
4.5.2	L'effet de NaCl sur la densité sèche .....	81
<b>4.6</b>	<b>Effet de NaCl et de la chaux sur la classification du sol traité.....</b>	<b>82</b>
<b>4.7</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>83</b>
	<b>Conclusions générales.....</b>	<b>85</b>
	<b>Recommandations.....</b>	<b>87</b>
	<b>Perspectives.....</b>	<b>87</b>
	<b>Références bibliographique.....</b>	<b>88</b>

## Chapitre 1

<b>Figure 1.1:</b> présentation les trois phases d'un sol.( <a href="http://www.reddysglobal.com">http://www.reddysglobal.com</a> ) .....	4
<b>Figure 1.2:</b> Diagramme de plasticité ( <a href="https://www.researchgate.net/figure/Diagramme-de-l'abaque-de-Casagrande">https://www.researchgate.net/figure/Diagramme-de-l'abaque-de-Casagrande</a> ). .....	7
<b>Figure 1.3 :</b> Courbe de chargement-déchargement par paliers (audiométrique) sur sol mou. ( <a href="Http://www.wikipedia.fr">Http://www.wikipedia.fr</a> ) .....	11
<b>Figure 1.4 :</b> Courbe de fluage audiométrique ( <a href="http://www.Researchgat.com">http://www.Researchgat.com</a> ) .....	12
<b>Figure 1.5 :</b> a) Structure d'un tétraèdre $\text{SiO}_4$ et b) d'une couche tétraédrique. (Esslingen et Paver. 1988). .....	14
<b>Figure 1. 6 :</b> (a) : Schéma de la structure de la kaolinite (L'ambe. 1953), (b) : vue isométrique de La structure atomique de la kaolinite (Grimm. 1959). .....	15
<b>Figure 1.7 :</b> (a) Schéma de la structure de la montmorillonite (Lambe. 1953), (b) : vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite (Grim. 1959). .....	17
<b>Figure 1. 8 :</b> Structure cristalline du chlorite. (Brown et Bailey. 1963). .....	18
<b>Figure 1. 9 :</b> fissures au niveau d'une structure de génie civil. (Zoubir. 2009) .....	20
<b>Figure 1.10:</b> Fissuration d'une chaussée de sol instable (TP. 2007) .....	20
<b>Figure 1.11:</b> La stabilisation provisoire des parois d'un fond par la technique de congélation. (Gadouri. 2017) .....	23
<b>Figure 1. 12 :</b> Techniques de rechargement. (Magnan et Pilot, 1988). .....	24
<b>Figure 1. 13 :</b> Amélioration par drainage. (Wim Khebizi. 2011).....	24
<b>Figure 1. 14 :</b> Technique de renforcement in situ par tirants d'ancrage. (Gadouri. 2017) .....	25
<b>Figure 1. 15 :</b> Stabilisation par compactage de surface (Cas d'une digue de barrage en terre de Kef-Eddirconstruit à Tipaza, Algérie). (Gadouri. 2017) .....	26
<b>Figure 1. 16 :</b> Réalisation du compactage selon un maillage bien défini. (Denies., 2015). .....	26
<b>Figure 1.17:</b> Étapes du Vibrocompactage des sables et graviers (Denies., 2015).....	25
<b>Figure 1. 18 :</b> Schéma de principe d'un renforcement par inclusions rigides verticales. (Berrada. 2015).....	28
<b>Figure 1. 19 :</b> Phases d'exécution des colonnes ballastées. (J-Pierre et Georges. 1988).....	30

## Chapitre 2

<b>Figure 2.1:</b> Modification des caractéristiques de compactage d'un sol suite à l'ajout de chaux, d'après le GTS (LCPC –SETRA. 2000).....	37
<b>Figure 2.2:</b> 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) .....	38
<b>Figure 2.3:</b> Effet de la chaux sur la résistance à la compression (Umesha et al.2009).	38
<b>Figure 2.4:</b> Effet du sulfate de calcium et du chlorure de calcium sur les paramètres de compressibilité d'une argile marine traitée à la chaux, (a) : indice de compression, (b) : pression de pré consolidation. (Rajasekaran and Narasimha Rao, 2002).....	41
<b>Figure 2.5:</b> Effet du ciment sur les limites d'Atterberg d'un sol peu plastique. (Asgari et al.2015). .....	42
<b>Figure 2.6:</b> Variation de la résistance à la compression d'un sol argileux en fonction du pourcentage en ciment à différentes durées de cure (Estabragh et al. 2010) .....	44
<b>Figure 2.7:</b> Influence d'une addition de NaCl sur les résistances à la compression simple de sols traités (A) sable de Bour ; (B) limon du Val d'Europe (Le Borgne. 2010). .....	44
<b>Figure 2.8:</b> Influence d'une addition de NaCl sur les résistances à la compression simple d'un sol riche en sels traité. (Xing <i>et al.</i> 2009) .....	45
<b>Figure 2.9:</b> Effet de certains types de composés chimiques sur la résistance à la compression non confinée de l'argile d'Iowa après 7 et 28 jours de cure. (Laguros. 1962).....	46
<b>Figure 2.10:</b> Effet du ciment sur les caractéristiques de cisaillement. (Gay and Schad. 2000). .....	46
<b>Figure 2.11:</b> Essai d'aptitude : gonflement volumique sur le mélange limon + NaCl + CaO +CEM I ([dosage faible] = 100 mg.kg <sup>-1</sup> NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg <sup>-1</sup> NaCl). Le Borgne. (2010). .....	48
<b>Figure 2.12:</b> Effet de différents dosages en ciment sur le potentiel de gonflement de quatre sols argileux très plastiques contenant différentes teneurs en sulfate soluble après 90 jours de cure. (Puppala et al. 2004). .....	48
<b>Figure 2.13:</b> Effet de la durée de cure sur la résistance à la compression d'un sol argileux amélioré par les cendres volantes (Kang et al. 2014). .....	51
<b>Figure 2.14:</b> Effet de différentes teneurs en cendres volantes sur la compressibilité d'une kaolinite. (Knapik et al. 2014).....	53

<b>Figure 2.15:</b> Effet de différentes teneurs en Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> sur les limites d’Atterberg du SR stabilisé par l’utilisation de la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure. (Gadouri. 2017).....	54
<b>Figure 2.16:</b> Effet de différents pourcentages de pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a) : sol gris, (b) : sol rouge. (Gadouri.2017) .....	55
<b>Figure 2.17:</b> Le développement de la résistance des pâtes chaux -pouzzolane durcies à différentes températures. (Shiet Day. 2000a).....	56
<b>Figure 2.18:</b> Influence de la teneur en fumée de silice sur les indices de consistance des argiles (Kalkan and Akbulut. 2004) .....	57
<b>Figure 2.19:</b> Effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression (Kalkan. 2013)...	54

### Chapitre 3

<b>Figure 3.1:</b> Prélèvement du sol argileux gris (SG) à partir d’un projet de remblai à Haouche El-Ghaba. (Gadouri. 2017).....	60
<b>Figure 3.2:</b> Moyens utilisés pour la préparation des sols, (a) : concasseur, (b) : broyeur. (Harichane et al. 2011a).....	61
<b>Figure 3.3:</b> 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) .....	61
<b>Figure 3.4:</b> Le diagramme diffractométrie présentant la composition minéralogique du sol étudié (argile gris). (Gadouri. 2017).....	63
<b>Figure 3.5:</b> Cycle de production de la chaux .....	64
<b>Figure 3.6:</b> Emballage utilisé pour la Chaux vive de Saïda. ....	64
<b>Figure 3.7:</b> Les chlorures utilisés dans l’étude expérimentale : chlorure de sodium (NaCl). 65	
<b>Figure 3.8:</b> 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. ....	69
<b>Figure 3.9:</b> Détermination de la limite de plasticité, (a) : formation d’une boulette de pâte et larouler 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.....	70
<b>Figure 3.10:</b> Préparation de la prise d’essai de compactage .....	71

**Figure 3.11:** compactage du sol .....72  
**Figure 3.12:** Organigramme des essais effectués au laboratoire .....73

## Chapitre 4

**Figure 4.1:** L'effet de la chaux sur la WL et la WP d'un sol gris fin stabilisé à la chaux (Voir Annexe A.1) .....75  
**Figure 4.2 :** Effet de la chaux sur l'indice de plasticité d'un sol gris fin (Annexe A.2).....77  
**Figure 4. 3 :** Effet de la chaux sur la teneur en eau optimale du sol gris fin stabilisé (AnnexeB.1).....77  
**Figure 4.4:** L'effet de la chaux sur la teneur en eau optimal (Annexe B.2).....78  
**Figure 4.5:** L'effet de chlorure de sodium sur WL et WP (Voir Annexe C.1) .....79  
**Figure 4. 6 :** L'effet de chlorure de sodium sur IP (Voir Annexe C.2) .....79  
**Figure 4.7:** L'effet de chlorure de sodium sur la teneur en eau optimale du sol gris fin (Voir Annexe D.1) .....80  
**Figure 4. 8 :** L'effet de chlorure de sodium sur la densité sèche maximale (Voir Annexe D.2) ..... 81  
**Figure 4. 9 :** Effet de Na Cl et de la chaux sur la classification du sol traité .....82

## Chapitre 1

<b>Tableau 1.1:</b> Essais d'identification d'un sol (Magnan. 1997) .....	4
<b>Tableau 1. 2 :</b> Classification des sols grenus (selon L.C.P.C). .....	6
<b>Tableau 1. 3:</b> propriétés et caractéristiques des sols compressibles( <a href="https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO">https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO</a> ) .....	13
<b>Tableau 1.4:</b> les différentes techniques d'amélioration des sols. (Debats. 2012). .....	21
<b>Tableau 1.5:</b> Les perturbateurs et leurs effets cités par le GTS. (LCPC-SETRA. 2000) .....	30

## Chapitre 2

<b>Tableau 2.1:</b> Effet du sulfate de sodium et de calcium sur la limite de liquidité d'une montmorillonite traitée à 6% chaux, (Sivapullaiah et al. 2000).....	36
<b>Tableau 2.2:</b> Effet de la chaux sur les propriétés de compactage (Parker.2008). .....	37
<b>Tableau 2.3:</b> Effet de la teneur en chaux et de la période de cure sur la résistance à la compression non confinée d'une argile de la famille des smectites. (Al-Mokhtar et al. 2012). .....	39
<b>Tableau 2.4:</b> Effet des sulfates sur les paramètres de cisaillement effectifs ( $C'$ et $\phi'$ ) d'une montmorillonite traitée à 6% de chaux à différentes périodes de cure. (Sivapullaiah et al.2000).....	40
<b>Tableau 2.5:</b> Effet du ciment sur les propriétés de compactage (Degirmenci et al. 2006)....	43
<b>Tableau 2.6:</b> Effet de 2% de $CaSO_4$ sur les paramètres de cisaillement d'un sol limoneux traité avec 12% de ciment portland. (Laguros.1962) .....	47
<b>Tableau 2.7:</b> Effet des cendres volantes sur les limites d'Atterberg (Mohanty et al. 2016)...	49
<b>Tableau 2.8:</b> Effet de la combinaison chaux/cendres volantes sur la plasticité de deux sols (A et B) de plasticité faible à moyenne. (Ansary et al. 2006).....	49
<b>Tableau 2.9:</b> Effet de la combinaison de la chaux et des cendres volantes sur les limites d'Atterberg d'une argile gonflante en présence de 1% de gypse, (Sivapullaiah and Jha. 2014). .....	50
<b>Tableau 2.10:</b> Effet des cendres volantes sur les paramètres de compactage. (Kolay and Ramesh. 2015).....	51
<b>Tableau 2.11:</b> Effet des cendres volantes sur les caractéristiques de cisaillement, (Senol et al. 2006).....	52
<b>Tableau 2.12:</b> Effet de la fumée de silice sur les limites d'Atterberg (Negi et al.2013) .....	57

**Tableau 2.13:** Effet de la fumée de silice sur le compactage (Bharadwaj and Trivedi. 2016).  
..... 58

**Tableau 2.14:** Effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression (Thakare and Chauhan. 2016) .....59

### **Chapitre 3**

**Tableau 3.1:** Caractéristiques physico-mécaniques du sol. (Harichane et al. 2011a). .....62

**Tableau 3.2:** Propriétés chimiques des sols étudiés. (Harichane et al. 2011a) .....62

**Tableau 3.3:** Propriétés minéralogiques des sols étudiés. (Harichane et al. 2011a). .....62

**Tableau 3.4:** Propriétés physiques et chimiques des ajouts utilisés. (Harichane et al, 2011b).  
..... 64

**Tableau 3.5:** Caractéristiques physico-chimiques des chlorure utilisé.....66

**Tableau 3.6:** Combinaisons des échantillons des sols stabilisés avec ou sans présence des chlorures pour les limites d’Atterberg et le compactage (en pourcentage).....66

**Tableau 3.7:** Quantités des sols et des additifs utilisés avec ou sans présence des chlorures pour les limites d’Atterberg .....68

**Tableau 3.8:** Quantités des sols et des additifs utilisés avec ou sans présence des chlorures pour l’essai .....7

**Liste des Notations**

$\sigma'_p$	: La contrainte effective verticale de pré consolidation
$\sigma'v_o$	: La contrainte effective verticale
<b>ASTM</b>	: Société américaine pour les essais des matériaux
<b>Ca (OH)<sub>2</sub></b>	: Hydroxyde de calcium (chaux hydratée)
<b>NaCl</b>	: Chlorures de sodium
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	: Carbonate de calcium
<b>CaCl<sub>2</sub></b>	: Chlorure de calcium
<b>CaO</b>	: Oxyde de calcium (chaux vive)
<b>CaSO<sub>4</sub>.2HO</b>	: Sulfate divalent
<b>CaSO<sub>4</sub></b>	: Sulfate de calcium
<b>Cc</b>	: Indice de compression
<b>CEC</b>	: La capacité d'échange cationique
<b>CEM I</b>	: Le ciment Portland
<b>CEM II</b>	: Le ciment Portland composé
<b>CEM II</b>	: Le ciment de haut-fourneau
<b>CEM IV</b>	: Le ciment pouzzolanique
<b>CEM V</b>	: Le ciment composé
<b>Cs</b>	: Indice de gonflement.
<b>CSH</b>	: Le silicate de calcium hydraté (Calcium silicate hydrate)
<b>CU</b>	: Cohésion non drainé
<b>CV</b>	: Cendres volantes
<b>e</b>	: Indice des vides
<b>Fs</b>	: La fumé de silice
<b>GTR</b>	: Guide des Terrassements Routiers
<b>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></b>	: Acide phosphorique
<b>K</b>	: Coefficient de perméabilité
<b>LCPC</b>	: Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées
<b>MgSO<sub>4</sub></b>	: Sulfate de magnésium
<b>W</b>	(%) Teneur en eau
<b><math>\Gamma_d</math></b>	(KN/m <sup>3</sup> ) Poids volumique sec
<b>W<sub>OPN</sub></b>	(%) teneur en eau optimale
<b><math>\gamma_{dmax}</math></b>	(KN/m <sup>3</sup> ) Densité sèche maximale
<b>W<sub>L</sub></b>	(%) Limite de liquidité
<b>W<sub>P</sub></b>	(%) Limite de plasticité
<b>I<sub>P</sub></b>	(%) Indice de plasticité

# Introduction Générale

---

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

## **1. Introduction générale**

Vue le manque de sols de bonne qualité, et l'incapacité de remplir certaines conditions on cahier de charge liées à la qualité des matériaux utilisés comme étant une assise de fondation ou matériau de construction, plusieurs techniques d'amélioration et de renforcement de sols ont été développées à savoir les méthodes de compactage dynamique (exp : vibro-compactage), physique (exp : congélation), mécanique (compactage de surface), et chimique (exp : addition d'additifs) ...etc.

La méthode chimique a connu par sa place en génie civil depuis les années 1990. Elle est économique, simple et efficace tout en donnant des résultats très satisfaisants. Les additifs les plus utilisés selon la littérature sont le ciment, la chaux, le laitier, la fumée de silice ...etc.

D'ailleurs, la présence de certains composés chimiques apporte plus souvent des effets néfastes sue le processus de traitement des sols comme par exemple, les sulfates (Pansu et Gautheyrou .2003), les phosphates (Lin et al. 2009), et les chlorure (Nilforoushan et Sharp .1995) et (Ottawa. 1977). Cette technique de traitement a été utilisée pour minimiser, ou voire éliminer, surtout les gonflements des sols qui sont très souvent la cause des dommages de structures implantées (Eades et Grim. 1960 ; Eades et al. 1962 ; Thompson, 1966 ; Broms et Boman, 1975 ; Okumura et Terashi. 1975 ; Al-Rawas. 1999). La stabilisation chimique des sols à l'aide des ajouts minéraux a donc trouvé une meilleure place dans le domaine de la géotechnique appliquée à travers la valorisation des sols jugés comme étant médiocres sans aller faire appel à des matériaux d'emprunt de bonne qualité. Ceci importe une réduction <sup>2</sup>significative des frais des transports et également les délais de réalisation des projets.

Mais, il Ya peu d'étude réalisées sur l'effet des chlorures de sodium sur les propriétés physico-mécanique des sols argileux traités par des additifs minéraux.

## **2. Objectif de recherche**

L'objectif de la présente étude est d'étudier l'influence et les changements apportés par les chlorures de sodium connus comme élément perturbateur sur les propriétés physico-mécaniques (Limites D'Atterberg "WL, WP, IP" et Proctor Normal "Wopt,  $\gamma_{d_{max}}$ ") d'un sol argileux très plastique améliorés avec l'addition de différents pourcentages de la chaux, utilisé comme matériau de construction dans le tronçon d'autoroute Est-Ouest (Harchoun – Khemis Miliana)

### **3. Plan de travail**

Notre mémoire est composé principalement d'un intitulé : **Etude des effets apportés par la présence des chlorures sur la plasticité et le compactage d'un sol argileux : Cas du tronçon d'autoroute Harchoun – Khemis Miliana** ; une introduction général exposant la problématique et définissant les objectifs à atteindre ; et il est composé aussi par quatre chapitre.

- **Le premier chapitre** présente en première partie un aperçu sur l'identification et la classification des sols médiocres et dans une deuxième partie un panorama sur les différentes techniques d'amélioration des mauvais sols.
- **Le deuxième chapitre** présente une synthèse bibliographique sur les divers aspects des effets des ajouts minéraux sur les sols stabilisés avec et sans présence des composés chimiques.
- **Le troisième chapitre** Il décrit les protocoles expérimentaux, les normes et les procédures suivies pour la préparation et la caractérisation des matériaux sélectionnés. Les propriétés physico-mécaniques, chimiques et minéralogiques des matériaux étudiés ont été déterminées à la base de l'expérience acquise dans les laboratoires des recherches autre que les normes.
- **Le quatrième chapitre** Il présente l'analyse de différents résultats expérimentaux des effets et des changements apportés par les chlorures de sodium sur les limites d'Atterberg (limite de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité) et le Proctor Normal (la teneur en eau optimal et la densité sèche maximale) des sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux.
- On termine avec des conclusions générales, recommandations et perspectives.

# **Chapitre 1**

---

---

## ***Méthodes d'amélioration des mauvais sols et éléments perturbateur***

- 1.1 *Introduction***
- 1.2 *Identification des sols***
- 1.3 *Classification des sols***
- 1.4 *Sols mous « compressibles »***
- 1.5 *Principaux problèmes des sols  
médiocres***
- 1.6 *Techniques d'amélioration des  
mauvais sols***
- 1.7 *Éléments perturbateurs de  
traitement chimique des sols***
- 1.8 *Conclusion***

## **1.1 Introduction**

Dans ce chapitre nous allons présenter les méthodes d'amélioration des mauvais sols et éléments perturbateurs, notre sujet c'est les argiles. On ne peut pas accorder un sujet sur ce dernier sans les classer.

Les sols sont des agrégats minéraux qui peuvent se désagréger en éléments de dimensions plus ou moins grandes sans nécessiter un effort considérable. Ils résultent de l'altération chimique (oxydation, ...), physique (variation de température, gel, ...) ou mécanique (érosions, vagues, ...) des roches. Donc à l'aide de quelle base doit-on choisir ou bien classer notre terrain (sol) pour éviter les conséquences dues à une mauvaise étude.

Les sols présentent le support de toutes sortes d'ouvrages et de structures (routes, tunnels, barrages, ponts.). Le choix des terrains de construction avec de bonnes propriétés chimiques, physiques et mécaniques, assure une meilleure stabilité. Cependant, ce n'est pas toujours le cas, car des fois on est obligé de construire dans des terrains médiocres qui présentent des problèmes économique et technique pour les différentes parties impliquées dans ce domaine.

Ces problèmes donc nécessitent une certaine amélioration pour augmenter la stabilité mécanique et améliorer la performance de ces mauvais sols.

Ce chapitre rappelle les caractéristiques des sols mous avec la description de principales techniques d'amélioration.

### 1.2 Identification des sols

Un sol est un mélange de 3 éléments : solide (squelette), eau (libre ou non), et gaz (air).

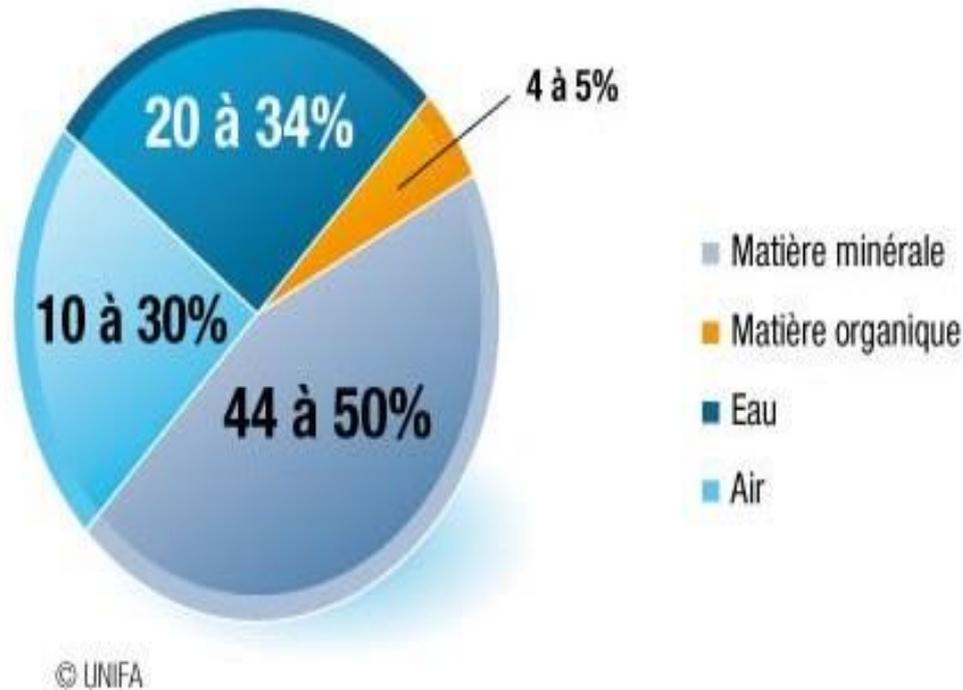


Figure 1.1: présentation les trois phases d'un sol. (<http://www.reddysglobal.com>)

Identifier un sol est la détermination de ces caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques à travers les essais d'identification pour ressortir ces propriétés qui permettent de le classer.

Tableau 1.1 : Essais d'identification d'un sol (Magnan, 1997)

Sol	Nature	Etat
Pulvérulent (grenu)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analyse granulométrique</li> <li>Équivalent de sable</li> <li>Teneur en carbonates</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Indice des vides</li> <li>Teneur en eau</li> <li>Indice de densité</li> </ul>
Cohérent (fin)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sédimentométrie</li> <li>Limites d'Atterberg</li> <li>Teneur en carbonates</li> <li>Teneur en matières Organiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Indice des vides</li> <li>Teneur en eau</li> <li>Degré de saturation</li> <li>Indice de consistance</li> </ul>

### 1.3 Classification des sols

Pour résoudre les problèmes de mécanique des sols, il est important de caractériser un sol et aussi de le classer, c'est à dire le mettre dans un groupe ayant des comportements similaires.

Il existe de par le monde de nombreuses classifications. Dans certains cas une simple identification visuelle permet de donner un nom au matériau : marne bleue, argile jaune, sable fin.

- **Identification visuelle d'un sol**

L'identification visuelle des sols est-elle est très importante en géotechnique, car elle est utile pour l'ingénieur une fois sur terrain, celui-ci doit impérativement identifier le sol au moins approximativement, c'est une première étape avant de commencer les essais nécessaires.

Par exemple :

- Sables se sont des particules visibles à l'œil nu.
- Limons s'effritent une fois qu'ils sont secs.
- Les argiles sont collantes et se présentent en mottes quand ils sont humides.
- Les argiles deviennent très dures une fois sèches. Les argiles peuvent être découpées en morceaux ou effritées à la main.

Il faut toutefois compléter cette indication par des essais au niveau de laboratoire :

- Une analyse granulométrique.
- Détermination des limites d'Atterberg.
- Teneur en eau, masse volumique.
- Indice de densité pour les sols pulvérulents.
- Résistance à la compression simple pour les sols cohérents.

Les résultats d'essais réalisés nous permettent d'identifier les sols et par conséquent de se faire une idée sur leurs comportements. Il existe plusieurs systèmes de classification des sols :

- **Nombreuses classifications dans différents pays**
- Classification **U.S.C.S** (Unified Soil Classification System) établie par Casagrande.
- Classification **L.C.P.C** (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) identique à la classification **U.S.C.S**.
- Classification **A.A.S.H.O** (American Association State Highways Officials).
- Classification **G.T.R** (Guide des terrassements routier).

### 1.3.1 La classification L.C.P.C

Classer un sol consiste à l'identifier grâce à des mesures quantitatives et à lui donner un nom afin de le rattacher à un groupe de sols de caractéristiques semblables.

Classification LPC Sol à partir des résultats fournis par :

- La granulométrie.
- Les caractéristiques de plasticité de la fraction fine (Atterberg).

Les sols sont désignés par le nom de la portion granulométrique prédominante qualifiée par un adjectif relatif aux portions secondaires.

On distingue trois grands types de sols :

- Les sols grenus : plus de 50 % des éléments en poids > 80 µm,
- les sols fins : plus de 50 % des éléments en poids < 80 µm.
- Les sols organiques dont la teneur en matière organique est > à 10 %

#### 1.3.1.1 Sols grenus

Tableau 1.2 : Classification des sols grenus (selon L.C.P.C).

Définitions		Symboles	Conditions	Désignation géotechnique
GRAVES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ (*) et $C_r = \frac{(D_{20})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
			Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A (fig. 2)	grave limoneuse
			Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A	grave argileuse
SABLES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $C_r = \frac{(D_{20})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A	sable limoneux
			Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A	sable argileux

Lorsque 5 % < % inférieur à 0,08 mm < 12 % → on utilise un double symbole.

La classification des sols grenus se fait par la granulométrie et les limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le tableau ci-après (**Tableau 1. 2**).

### 1.3.1.2 Sols fins

La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le diagramme de plasticité ci-après (**voir la figure. 1.2**). Selon la position dans le diagramme du point représentatif ayant pour abscisse la limite de liquidité et pour ordonnée l'indice de plasticité, on définit quatre grandes catégories principales :

- Les limons très plastiques
- Les limons peu plastiques
- Les argiles très plastiques
- Les argiles peu plastiques

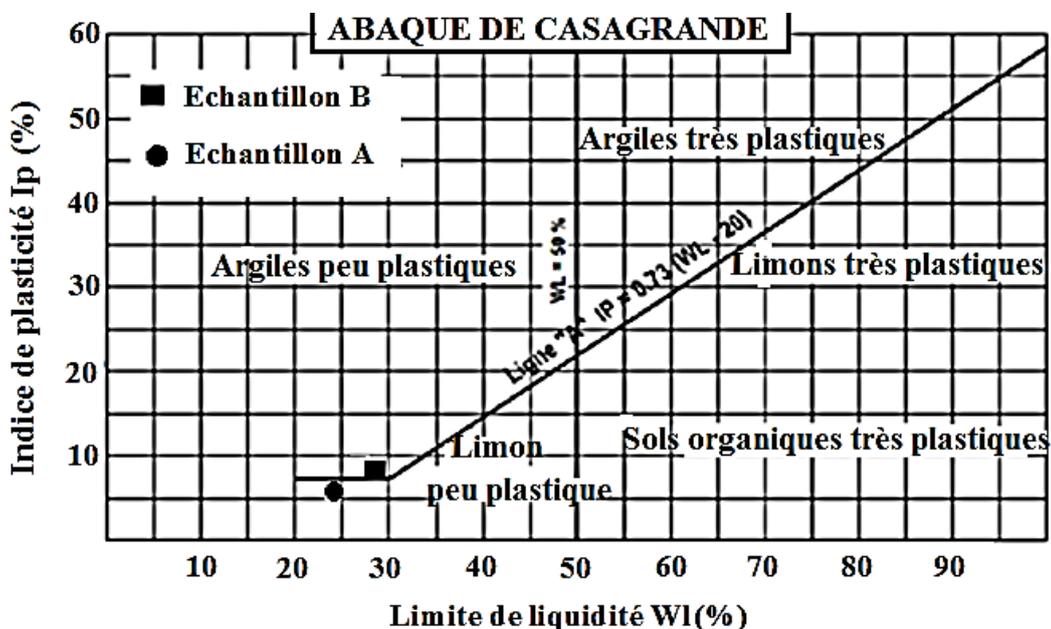


Figure 1.2: Diagramme de plasticité (<https://www.researchgate.net/figure/Diagramme-de-labaque-de-Casagrande>).

### 1.3.2 Classification LPC modifiée

Dans cette classification la quantité de matière organique (MO) joue un rôle essentiel.

- Pour  $MO < 3\%$ , la matière organique n'a pas d'influence sur le sol.
- Pour  $3 < MO < 10\%$ , le sol est faiblement organique.
- Pour  $MO > 10\%$ , il est considéré comme un sol organique (Schon. 1965).

### 1.3.3 Classification des sols selon la nomenclature GTR

On distingue 3 familles :

- Les sols de classe : A, B, C et D
- Les matériaux rocheux de classe : R
- Les sols organiques et sous-produits industriels de classe : F

Les 4 classes des sols de la première famille : Classe A : sols fins, Classe B : sols sableux et graveleux avec fines, Classe C : sols comportant des fines et des gros éléments, Classe D : sols insensibles à l'eau.

La classification détaillée est décrite dans un guide technique du LCPC et du SETRA ([LCPC-Stéra.1992](#)).

### 1.4 Sols mous « compressibles »

Tous les sols mous sont (compressibles), c'est-à-dire qu'ils tassent lorsqu'on leur applique une charge verticale. Les sols mous sont généralement de formation récente, inaptes à supporter un ouvrage d'art, mais pouvant, moyennant certaines précautions, servir de fondation à un remblai.

Ces sols sont caractérisés par :

- Une nature le plus souvent argileuse avec une teneur en matières organiques plus ou moins importante mais rarement négligeable ;
- Une teneur en eau très forte, et un faible poids spécifique apparent (ces sols sont très généralement saturés) ;
- Une résistance au cisaillement très faible ;
- Une forte compressibilité se traduisant, même sous faible charge, par des amplitudes de tassement notables, la vitesse de tassement décroissant avec le temps, mais ne s'annulant pas en quelques années. Ces sols, généralement de formations récentes (quelques milliers d'années) contiennent presque toujours, en plus ou moins grande proportion, des matières organiques, on peut les diviser en quatre catégories :
- Les vases et argiles molles.
- Les tourbes.
- Les limons.
- Les marnes.

## 1.4.1 Types des sols mous « compressibles »

### 1.4.1.3 Les limons

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

### 1.4.1.4 Les vases

Les vases des estuaires sont composées essentiellement de particules argileuses, et sont des sols contenant de 90 % de particules inférieures à 0,2 mm dont matière organique. Elles sont caractérisées par une perméabilité et résistance de cisaillement très faible. Les vases sont généralement composées de sable, limons, argile et de colloïdes organiques. Ces sols sont liés aux variations du niveau d'eau et se trouvent dans les zones alluviales et riveraines des plans d'eau (Grari., 2016).

### 1.4.1.5 Les tourbes

Les tourbes sont des dépôts naturels organiques très compressibles, à hautes teneurs en matière organique, à très hautes teneurs en eau et à très hauts degrés de saturation, dont le contenu en fibres végétales décomposées constitue une structure anisotrope qui influence les résistances mécaniques. Elles ont une déformabilité élevée, avec une part importante de déformation visqueuse, et une résistance au cisaillement faible. Le tassement de la tourbe ne suit généralement pas les lois classiques de la consolidation des argiles. Par ailleurs, l'effet de certains liants sur les matières organiques est limité (Zighmi. 2011).

### 1.4.1.6 Les marnes

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

- Les marnes argileuses qui comportent 5 à 35 % de carbonate de calcium ;
- Les marnes et les calcaires marneux avec des taux respectivement de 35 à 65 % et 65 à 95%.

Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de craqueler 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 ; et du

Ciment avec les marnes calcaires ou calcaires marneux. Elles ont également été utilisées pour amender les terres des exploitations agricoles. D'une façon générale, les marnes sont une assise de fondations bonne à moyenne en absence de gypse. En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement où se situent au-dessus une masse de gypse, avec risque de formation de fontis. Les marnes sont des roches relativement tendres, elles subissent une géodynamique très active à leur surface et leur fragilité les rend très vulnérables aux aléas de la nature et des hommes. Une combinaison de facteurs naturels et anthropiques a provoqué une érosion hydrique intense qui s'est manifestée par une dégradation des sols et une diminution importante de leur productivité.

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

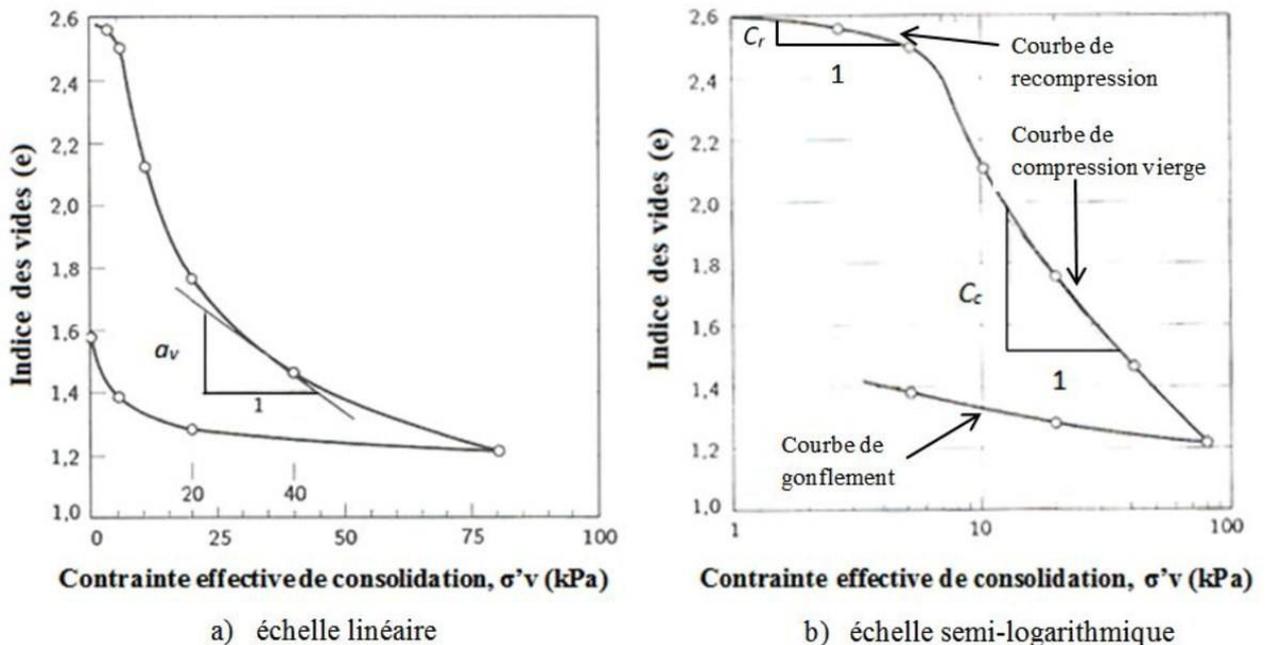
#### 1.4.1.7 Les argiles

Les argiles sont des roches sédimentaires à grains fins, de taille inférieure à  $5\mu\text{m}$ , composées pour une large part de minéraux spécifiques, silicates en général d'aluminiums plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée qui explique leur plasticité, où bien une structure fibreuse qui explique leurs qualités d'absorption. Elles absorbent l'eau et forment une pâte imperméable (perméabilité inférieure à  $0,2\text{mm/h}$ ), appelée couramment terre glaise, colorée par des oxydes de fer en ocre, rouge. Les argiles peuvent être gonflantes, notamment celles de la famille des montmorillonites lorsqu'elles absorbent eau et, au contraire, diminuer de volume sous l'effet de la sécheresse, allant jusqu'à craqueler en surface et même sur une profondeur de 2 m à 4 m. Par ailleurs, sous l'effet d'une charge, par exemple celle d'une construction, une partie de l'eau absorbée contenue entre les grains d'argile est chassée, ce qui a pour conséquence de provoquer un tassement sensible du sol. En général, les argiles représentent une assise acceptable à médiocre lorsqu'elles sont recouvertes par d'autres couches de terrain. Par contre, elles sont dangereuses lorsqu'elles affleurent au niveau du sol, du fait de leur instabilité, se traduisant par des variations de volume et un fluage dans les terrains en pente. D'autres types de sédiments à grains fins contiennent des argiles telles que les marnes, le loess (Zoubir, 2009).

**1.4.2 Propriétés et caractéristiques des sols compressibles (mous)**

Les sols objets de ce guide (tourbes, vases, argiles molles, limons argileux ou lâches) ont en commun trois caractéristiques :

- Une déformabilité élevée, fonction de la charge appliquée et du temps.
- Une faible perméabilité, qui varie avec les déformations du sol.
- Une résistance limitée, qui croît en général avec la profondeur.
- La mesure de ces propriétés est décrite dans les manuels de mécanique des sols. Dans la pratique française courante.
- La déformabilité est étudiée à l'odmètre (essais de chargement par paliers, essais de fluage) et décrite par une relation semi-logarithmique entre l'indice des vides et la contrainte effective verticale (**voir la figure 1.3**).



**Figure1. 3** : Courbe de chargement-déchargement par paliers (œdométrique) sur sol mou. ([Http://www.wikipedia.fr](http://www.wikipedia.fr))

$$e = e_0 - C_s \lg \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v_0}} - C_c \lg \frac{\sigma'_{v_0} + \Delta\sigma}{\sigma'_p} \tag{Eq 1.1}$$

Où

$$e = e_0 - C_s \lg \frac{\sigma'_{v_0} + \Delta\sigma}{\sigma'_{v_0}} \tag{Eq 1.2}$$

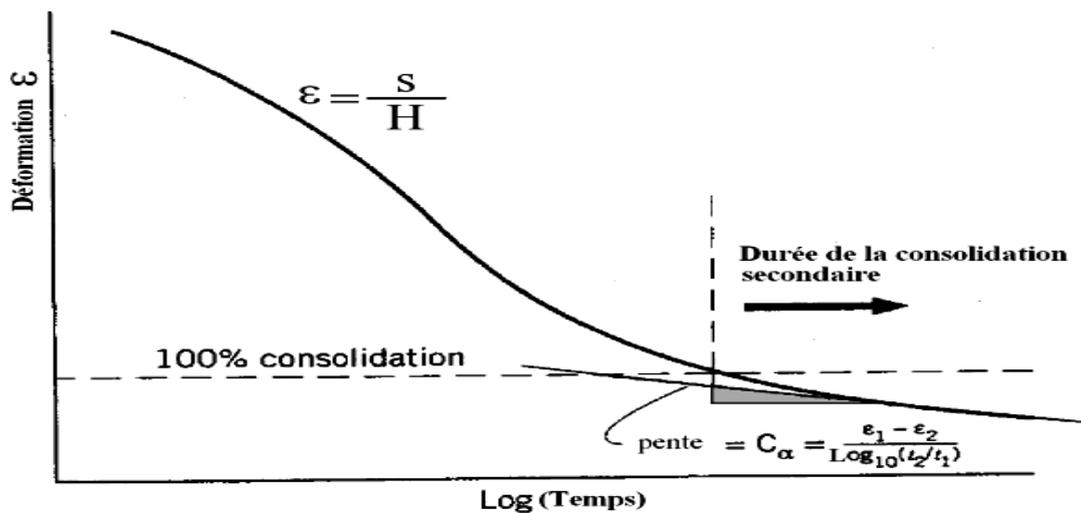
Suivant que la contrainte effective finale  $\sigma'_{v_0} + \Delta\sigma$  est supérieure ou inférieure à la pression de Reconsolidation  $\sigma'_p$ . L'essai de fluage permet ; estimer la partie de la déformation qui dépend du temps (**voir la Figure 1.4**)

$$\Delta e = - C_{ae} \Delta \log t \tag{Eq 1.3}$$

La perméabilité est le plus souvent déterminée à l'oedomètre. Elle varie avec la déformation selon une loi de la forme :

$$\Delta e = C_k \Delta \log k \tag{Eq 1.4}$$

La perméabilité et la compressibilité contrôlent conjointement l'évolution du tassement au cours du temps (consolidation), par intermédiaire du coefficient de consolidation, lui-même variable au cours de la consolidation (France et al. 2000) ;



**Figure 1. 4 :** Courbe de fluage œdométrique (<http://www.Researchgat.com>)

La résistance est mesurée au scissomètre de chantier, qui fournit la résistance initiale du sol en conditions non drainées. Cette résistance augmente avec les contraintes effectives. Sa loi de variation est déterminée à appareil triaxial dans des essais de type « consolidé-non drainé » CU :

$$\Delta C_u = \lambda_{cu} \Delta \sigma' \tag{Eq 1.5}$$

**Le tableau 1.3** donne des ordres de grandeur de ces propriétés, il n'existe pas de limites précises de la catégorie des sols compressibles. Les techniques décrites dans ce guide appliquent en

Général quand les tassements estimés dépassent quelques dizaines de centimètres, pour des sols de cohésion non drainée inférieure à 50 kPa, environ.

Les sols organiques et tourbeux posent des problèmes spécifiques de prélèvement et d'amplitudes de déformations qui nécessitent une attention particulière.

**Tableau 1.3** : Propriétés et caractéristiques des sols compressibles(<https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO>)

sol	Teneur en eau optimale pour le compactage (valeurs extrêmes en pourcentage)
Sables argileux mélange sable-argile	11-10
Mélange sable –limon –argile , avec fraction plastique de limon + argile	15-11
Limon (silt) inorganique, limon silteux	24-12
Argile inorganique	24-12
Limon (silt) organique	33-21
Argile inorganique très plastique	36-19
Argile organique	45-21

### 1.4.3 Les minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des silicates d'alumine hydratés provenant de l'altération des feldspaths et des micas, leur formule chimique est de la forme :



Ils sont composés de particules de forme aplatie et de dimensions très petites (Inférieures à 2µm), ceci leur confère une très grande surface spécifique. Les éléments structuraux sont le tétraèdre de silice et l'octaèdre d'alumine.

Les particules d'argile sont formées d'un empilement de feuillets qui sont constitués par l'association de deux unités structurales de base (**voir la figure 1.5**).

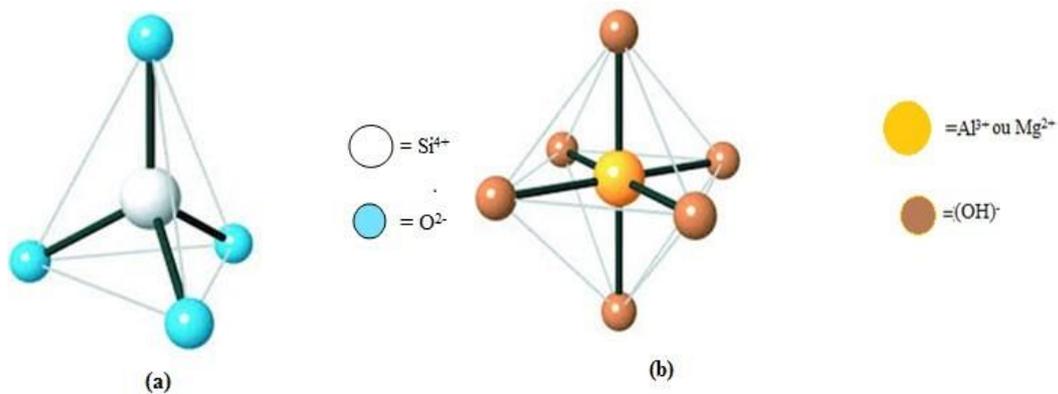
### ➤ Unité tétraédrique

Elle est formée d'un tétraèdre au sommet duquel quatre ions d'oxygènes ( $O_2^-$ ) enserrant un ion de silicium ( $Si_4^+$ ), équidistant à chacun d'eux. Ces tétraèdres se combinent entre eux pour former une couche tétraédrique.

### ➤ Unité octaédrique

Elle est formée d'un octaèdre au centre duquel un ion d'aluminium ( $Al^{3+}$ ) est équidistant aux six hydroxyles ( $OH^-$ ) des sommets.

Ces octaèdres se combinent pour former des couches planes dites couches octaédriques, et la liaison avec la couche tétraédrique se fait au niveau des oxygènes.



**Figure 1. 5 :** a) Structure d'un tétraèdre  $SiO_4$  et b) d'une couche tétraédrique (Eslinger et Peaver, 1988).

À partir de ces structures de base nous pouvons définir plusieurs familles d'argiles (La kaolinite, l'illite, le chlorite, la montmorillonite).

#### 1.4.3.5 Les groupes d'argiles

##### A-La kaolinite

Elle est constituée d'une succession de couches alternées de feuillets (silice) et de feuillets en octaèdre d'aluminium ou de gibbsite (voir la Figure.1.6). A cause de l'empilement d'une couche de chacun des deux feuillets de base, on considère la kaolinite comme un minéral argileux sachant que son épaisseur est de  $7\text{Å}$ . Chaque feuille est reliée à l'autre par l'intermédiaire des liaisons labiles de type hydrogène. La propriété de cette liaison est de permettre la cohésion du cristal tout en laissant la possibilité de clivage des différents feuillets (Cabane, 2004). La kaolinite est connue par la formule chimique suivante :



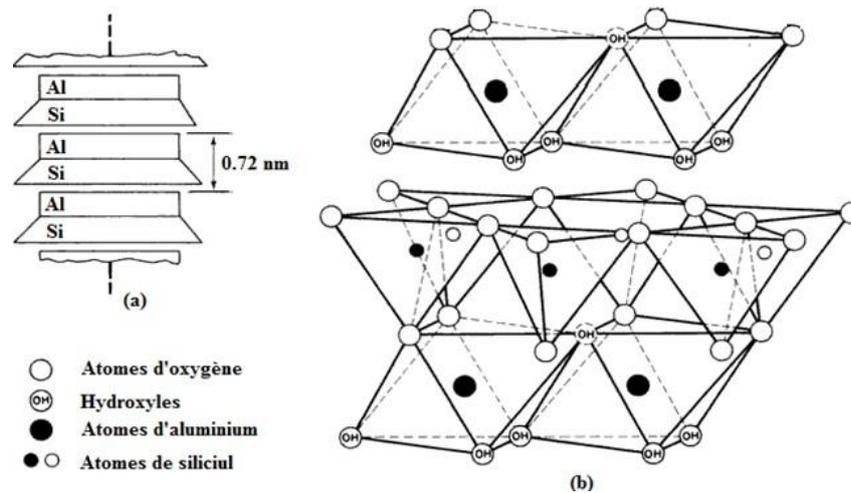


Figure 1. 6 : (a) : Schéma de la structure de la kaolinite (L'ambe. 1953), (b) : vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite (Grimm. 1959).

**B- Les illites**

L'illite est une autre composante importante des sols argileux du groupe des micas. Les illites appartiennent à la famille des phyllo silicates. Le feuillet élémentaire est composé d'une couche octaédrique d'aluminium comprise entre deux couches tétraédriques de silicium. Dans les couches tétraédriques de silicium un ion Si<sup>4+</sup> sur quatre est remplacé par un ion Al<sup>3+</sup>. Le déficit de charge qui en résulte est compensé dans l'espace inter foliaire par des ions potassium K<sup>+</sup> qui assurent des liaisons fortes entre les feuillets (Truche.2010). La formule chimique d'illite est :

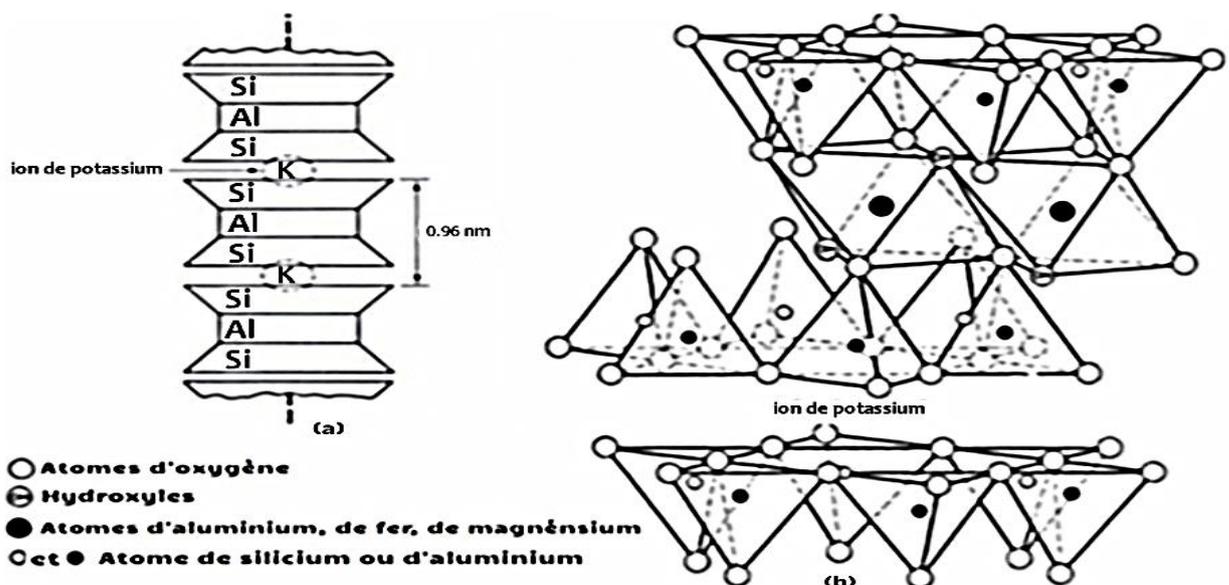
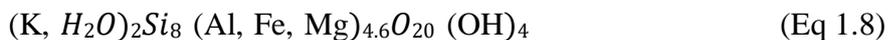


Figure 1.7: a) : Schéma de la structure de l'illite (Lambe. 1953), (b) : vue isométrique de la structure atomique de l'illite (Grim. 1959).

**C- Les Smectites**

Les Smectites, dont la montmorillonite et la bentonite appartiennent à la famille des phyllo - silicates gonflant. Le feuillet élémentaire est caractérisé par l'empilement de couches tétraédriques séparées par une couche octaédrique. Les atomes de silicium constituent majoritairement les tétraèdres mais des cations (Al, Fe) peuvent se substituer au Si dans ces tétraèdres. Les couches octaédriques sont quant à elles composées d'Al, Mg, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, (Leger. 1997). Les smectites ont, de par leur structure, la nécessité d'équilibrer leur charge dans l'espace inter foliaire par l'insertion de cations dans cet espace. Ces cations, peu liés à la structure, sont susceptibles d'être échangés par d'autres cations. C'est ce que l'on appelle la capacité d'échange cationique (CEC). Cette structure permet aussi l'insertion, entre les feuillets de molécules telles que l'eau, le glycérol, ou d'autres molécules organiques. Cette insertion se traduit par un gonflement de la structure. Ces variations sont dépendantes de la nature de la molécule, des conditions de température, de pression et de la nature du cation compensateur. (Cabane. 2004), la formule chimique de montmorillonite est :

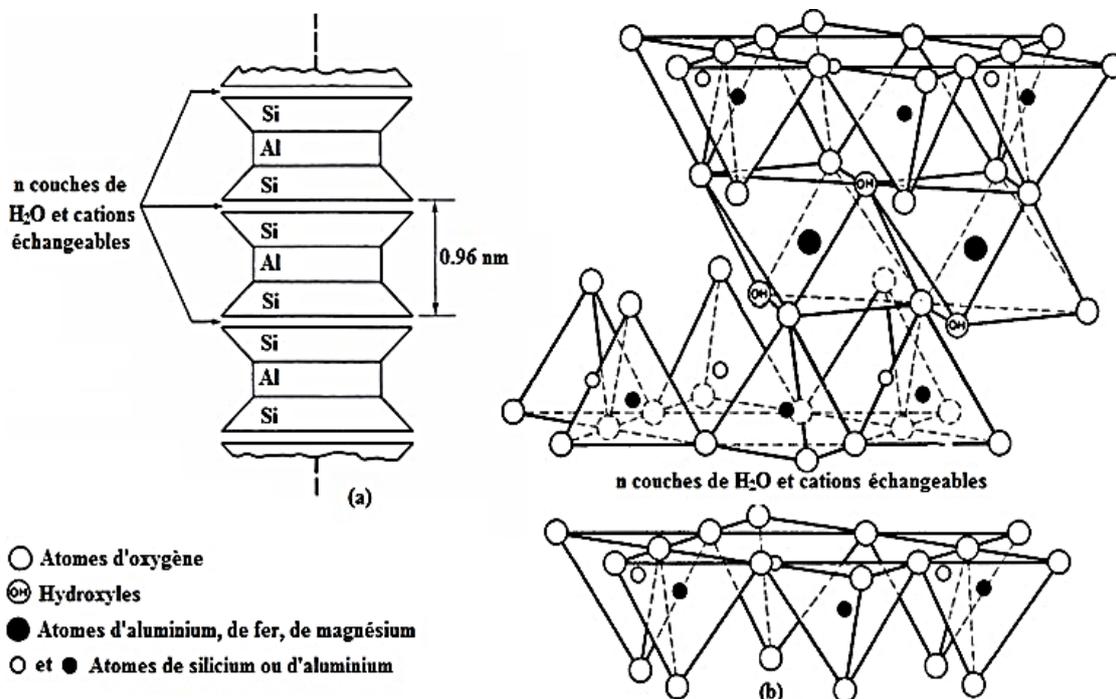
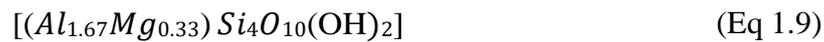
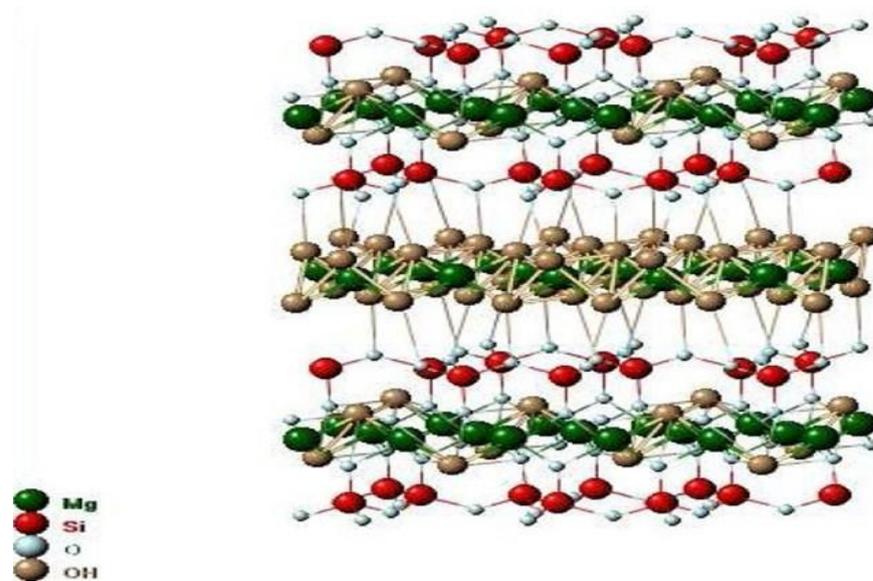
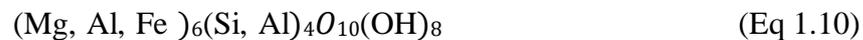


Figure 1. 7 : (a) Schéma de la structure de la montmorillonite (Lambe. 1953), (b) : vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite (Grim. 1959).

## D-Les Chlorites

Les chlorites sont caractérisés par une structure complexe, elles sont constituées par un motif T-O-T : deux feuillets de micas entre lesquels s'insère un feuillet de Brucite. En fait le déficit du feuillet de mica est rarement comblé par le feuillet de Brucite et des cations interchangeables se logent dans les espaces créés au sein du feuillet de mica. L'eau peut alors pénétrer entre les feuillets, provoquant ainsi un accroissement de l'espace inter foliaire et donc un gonflement (**Figure1.8**). Cependant les édifices de Brucite tendent à coller les feuillets les uns aux autres en donnant ainsi aux chlorites une certaine cohésion, contrairement aux feuillets des minéraux argileux, qui sont libres de glisser les uns par rapport aux autres. La formule chimique des chlorites est :



**Figure1. 8** : Structure cristalline du chlorite (**Brown et Bailey. 1963**).

Ces derniers sont classés en trois grandes familles selon l'épaisseur des feuillets (0,7 ; 1,0 ou 1,4 nm), qui correspondent à un nombre de couches d'oxydes tétraédriques (Si) et octaédriques (Al, Ni, Mg, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Mn, Na, K, etc.). L'interstice entre feuillets peut contenir de l'eau ainsi que des ions. Il en résulte des variations de la distance entre feuillets, et donc des variations dimensionnelles macroscopiques de l'argile quand elle s'hydrate (dilatation) ou s'assèche (contraction) pouvant provoquer des fissures. Un matériau sec qui contient beaucoup de minéraux argileux « happe à la langue » (absorbe de l'eau en formant une pâte plastique)

Les phyllo silicatés se présentent sous forme de petits cristaux micrométriques, en plaquettes hexagonales ou en (micro)fibres. Ce sont les minéraux phylliteux halloysite, kaolinite, montmorillonite, illite et bravaisite, la glauconite, les smectites, les inter stratifiés comme les vermiculites, les minéraux fibreux tels que les attapulgites ou les sépiolites, enfin les chlorites et les micas, ces dernières en très petits morceaux souvent altérés pour être assimilés à des argiles.

L'origine est variée : altération de roches ou résidus de roches suivant des conditions locales suivant les zones d'altération des roches endogènes, sols à apport sédimentaire, diagenèse, éruption volcanique, météorites spécifiques. L'essor des études par rayons X (radiocristallographie, diffraction X..) a permis l'étude et la caractérisation des argiles.

([https://fr.wikipedia.org/wiki/Min%C3%A9ral\\_argileux](https://fr.wikipedia.org/wiki/Min%C3%A9ral_argileux)).

## 1.5 Principaux problèmes des sols médiocres

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

### 1.5.1 Phénomène de gonflement

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 consécutive 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).

### 1.5.1.5 Cas des bâtiments

Pour les structures de génie civil on peut constater à partir des fissures les conséquences suivantes :

Distorsion des ouvertures.

Décollement du bâtiment

Rupture de canalisation.

Dans la figure 1.9, on peut remarquer des fissures au niveau d'une structure légère de génie civil due au gonflement du sol dans un bâtiment (Zoubir. 2009).



**Figure 1. 9 :** Fissures au niveau d'une structure de génie civil (Zoubir. 2009)

### 1.5.1.6 Cas des chaussées

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Ce phénomène est causé par des variations de la teneur en eau du sous-sol. Il peut être attribué au climat et à la surcharge. Le désordre subis par la chaussée se résume généralement à des fissures qui apparaissent à la fin de la saison sèche sur ses accotements. En saison de pluie ces fissures permettent à l'eau de s'infiltrer plus facilement entraînant la saturation de ces zones et par conséquent leur gonflement, engendrant ainsi l'apparition de déformation à la surface de la chaussée, puis l'apparition de fissures longitudinales qui peuvent être assimilées à la chute de la portance dans les zones latérales de la chaussée entraînant l'affaissement des bords. Ces phénomènes sont accélérés par le flux routier. Ces désordres s'amplifient avec le début de la saison sèche (Voir la figure 1.10).



**Figure 1.10:** Fissuration d'une chaussée de sol instable (TP. 2007)

### 1.5.2 Le Tassement

Le tassement par définition est la variation de la hauteur d'une couche de sol sous l'effet d'une charge, C'est la déformation verticale du sol due à l'application des contraintes extérieures, Cette déformation dépend de plusieurs paramètres (les charges appliquées, la nature du sol, les dimensions et la forme des fondations, le temps, nature des fondations et de la structure). Les tassements peuvent être uniformes ou différents d'un point à l'autre selon la nature du sol en place.

### 1.5.3 Les Glissements

Le glissement de terrain est un déplacement lent par gravité d'un versant instable pouvant s'accélérer pour aller jusqu'à la rupture. Il peut être superficiel ou profond. Les glissements se caractérisent par la translation latérale d'une certaine masse de matériaux au niveau d'une surface de rupture nettement individualisée et se produisent généralement dans des matériaux faiblement cohérents (marnes, argiles.). Ce sont les mouvements qui affectent le plus fréquemment les ouvrages de génie civil.

On a toujours des solutions qui consistent à résoudre ces problèmes présentés dans les techniques d'amélioration des mauvais sols.

## 1.6 Techniques d'amélioration des mauvais sols

Les techniques d'amélioration des sols sont des méthodes de construction géotechniques utilisées pour modifier les conditions défavorables du sol afin de répondre aux exigences des projets

Lorsque le remplacement ou le contournement de telles conditions sont difficiles ou voire impossibles. Un sol est stabilisé en modifiant ses propriétés techniques et en améliorant ainsi ses performances (Rodriguez. 2008). L'amélioration souhaitée peut souvent s'obtenir par :

- Densification par augmentation statique de la contrainte à la surface du sol (Rechargement) ou en profondeur (compactage par injection solide).
- Remplissage des vides (injection).
- Dislocation de la structure du sol, puis restructuration par des actions externes au massif (chocs du pilonnage intensif) ou internes au massif (vibrations, explosions).
- Mélange avec un liant pour constituer des colonnes plus résistantes (colonnes de sol traité).

Elles sont de façon générale, de mise en œuvre rapide et relativement facile.

Comme dans le cas des sols fins, les argiles sont caractérisées par des perméabilités très faibles qui ralentissent la consolidation et la dissipation des processus interstitiels.

L'application des charges aux frontières d'un massif d'argile se traduit par le développement des pressions interstitielles. Il existe une multitude de méthodes : rechargement, Vibrocompactage, pilonnage, compactage statique en profondeur, les inclusions, les techniques d'injection dans le sol, les différents moyens de drainage, les renforcements des terres...Seules les méthodes les plus couramment utilisées seront décrites dans (le Tableau 1.4).

**Tableau 1.4:** Les différentes techniques d'amélioration des sols. (Debats. 2012).

Méthode	Types de sol					
	Matériaux évolutifs tourbe	Argile très molles	Argiles-limons compressibles	Remblais fins	Sables/graviers	Cailloux remblais à blocs
Amélioration de sols dans la masse	PRECHARGEMENT + DRAINAGE					
				VIBROCOMPACTAGE		
				COMPACTAGE DYNAMIQUE		
				INJECTION SOLIDE		
Renforcement des sols par inclusions souples	COLONNES BALLASTÉES					
	PLOTS BALLASTÉES PILONNES (épaisseur < 5m )					
Renforcement des sols par inclusions et éléments rigides	.. DE TYPE PIEUX A REFOULEMENT/ SANS REFOULEMENT et JET GROUTING					
	... DE TYPE COLONNE DEEP SOIL MIXING					

## 1.6.1 Techniques thermiques

### ➤ Amélioration temporaire par congélation

La technique de refroidissement utilisée repose sur la circulation d'un fluide froid (azote liquide habituellement) dans des tubes enfoncés dans le massif de sol. Elle est utilisée dans les sols fins tels que les argiles molles et limons lorsqu'aucune autre méthode n'est applicable. Elle doit être réalisée rapidement pour limiter le gonflement et prend en compte de l'effet de dégel sur le massif de sol. La congélation rend également imperméable le sol et facilite les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. (Wim Khebizi 2011).



**Figure 1.11:** La stabilisation provisoire des parois d'un fond par la technique de congélation (Gadouri2017).

## 1.6.2 Techniques hydromécaniques

### A- Pré chargement ou Pré compression

Le pré chargement, parfois appelé pré compression, est une méthode largement utilisée pour améliorer les propriétés du sol, en particulier dans les cas où des sols meubles sont impliqués (Rodriguez ,2008). Cette technique consiste à utiliser un remplissage de sable en tant qu'une surcharge mécanique. La charge temporaire appliquée au sol, entraîne une création de pressions interstitielles excessives. Au fur et à mesure que les pressions interstitielles excessives se dissipent, les contraintes effectives dans le sol augmentent et une augmentation de la résistance au cisaillement est obtenue (Leong et al. 2000).

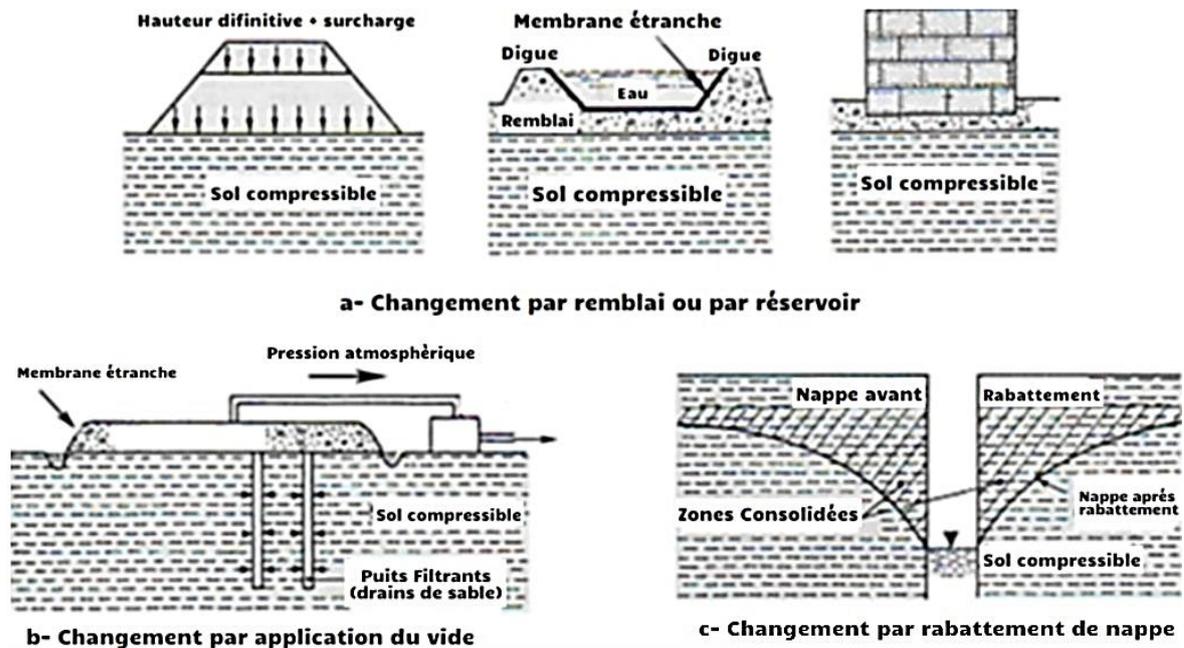


Figure 1. 12 : Techniques de rechargement (Magnan et Pilot, 1988).

### B-Amélioration des sols 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. (Gaffer et al. 2015).

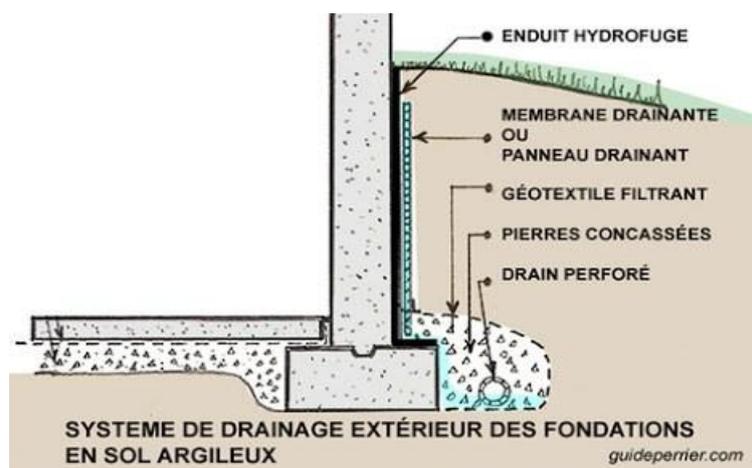


Figure1. 13 : Amélioration par drainage. (Wiem Khebizi. 2011)

### 1.6.3 Techniques de renforcement in situ

Le principe de base consiste à mobiliser un certain volume de terrain ou de rocher encaissant de façon à rétablir ou à renforcer la stabilité d'une fondation au renversement, au glissement ou au soulèvement. (Gadouri. 2017). Il existe deux techniques de renforcement des sols in situ pour stabiliser les pentes et les excavations : clouage des sols, micro pieux réticulés (voir la figure 1.14).

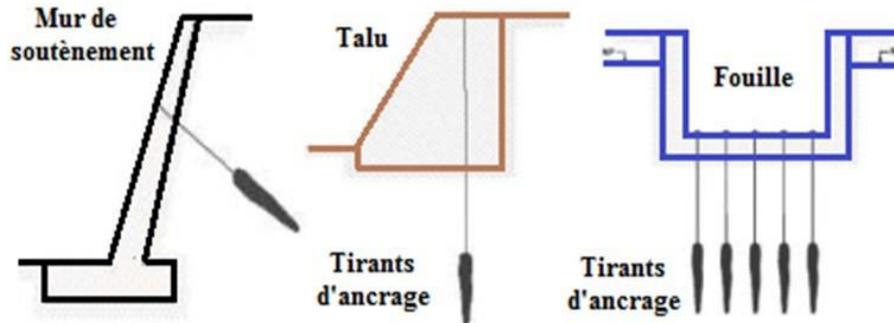


Figure1. 14 : Technique de renforcement in situ par tirants d'ancrage. (Gadouri. 2017).

### 1.6.4 Techniques mécaniques

#### 1.6.4.5 Compactage de surface

Le compactage d'un sol est un travail visant l'augmentation de la quantité des solides par unité de volume pour améliorer la stabilité et aussi pour diminuer le risque de tassement. La teneur en eau joue un rôle primordial dans le compactage (Zoubir.2012). 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 de sol).



Figure1. 15 : Stabilisation par compactage de surface (Cas d'une digue de barrage en terre de Kef-Eddie construit à Tipaza, Algérie). (Gadouri 2017).

### 1.6.4.6 Compactage dynamique (ou pilonnage)

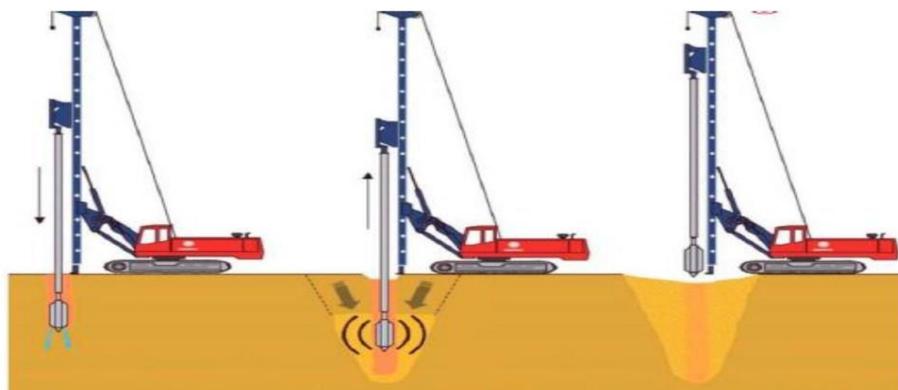
Le compactage dynamique vise l'amélioration des propriétés géotechniques de sols lâches sur de grandes profondeurs par l'application d'impacts de très forte intensité. Le procédé consiste à faire chuter de façon méthodique et répétée à la cadence d'une à trois fois par minute et selon un maillage orthogonal défini par rapport à la nature des terrains de lourds pilons d'acier sur la surface du sol à traiter.



Figure 1. 16 : Réalisation du compactage selon un maillage bien défini. (Denies 2015).

### 1.6.4.7 Vibrocompactage (vibroflottation)

Cette technique s'applique aux sols granulaires non-cohérents comme les sables et graviers, saturés d'eau. Les vibrations engendrent un phénomène localisé de liquéfaction sous l'effet des Surpressions interstitielles, qui met les grains du sol dans un état liquéfié. Les grains se réarrangent en un état plus dense. Le maillage des points de compactage dépend des caractéristiques initiales et des objectifs à atteindre.



1 : Fonçage du vibreur    2 : Compactage des sols    3 : Apport des matériaux et finition

Figure 1.17: Étapes du Vibrocompactage des sables et graviers (Denies 2015).

## 1.6.5 Techniques chimiques

### 1.6.5.5 Amélioration des sols par addition d'ajouts minéraux

Traiter un sol consiste à mélanger intimement ses éléments à une certaine quantité d'addition. Cette opération provoque une modification physico-chimique qui intervient dans la stabilisation du sol tel que, les réactions d'échange de base avec les particules d'argile (cation) et les réactions pouzzolaniques (cimentation), qui corrige ses défauts de perméabilité et améliore ses qualités de résistance (capacité portante) et de durabilité. Pratiquement tous les sols peuvent être traités. La stabilisation peut être utilisée, avant compactage, in situ ou avec des sols excavés ou amenés d'ailleurs. Les ajouts minéraux le plus souvent utilisées sont la chaux, le ciment, les ajouts cimentaires (pouzzolane, cendre volante, laitier, fumée de silice, écorce de riz...). Cette technique a été développée en France ce qui a donné la naissance du guide technique du traitement des sols à la chaux et /ou aux liants hydrauliques réalisé en collaboration entre (Setra et LCPC. 2000).

#### A-Utilisation de la chaux

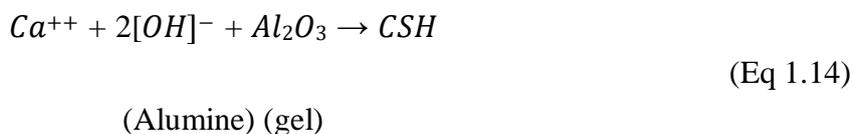
La chaux est le stabilisant le plus largement utilisé dans la pratique de l'ingénierie depuis les temps les plus reculés et s'applique sur une vaste gamme de sols (Petry and Little. 2002). Elle est considérée comme très efficace pour réduire le potentiel de gonflement et la plasticité et

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 et 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 ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). La chaux est également souvent utilisée dans l'agriculture sous forme de calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ). La chaux vive (CaO) est fabriquée par des procédés chimiques transformant le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) en oxyde de calcium (CaO). Lorsque la chaux vive réagit avec l'eau, elle se transforme en chaux hydratée comme suit :



La chaux hydratée ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) réagit avec les particules d'argile et les transforme en un matériau résistant en raison de réactions chimiques (Rodriguez, 2008), par un processus en deux étapes : la première est 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. La deuxième étape du processus est 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) :



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).

## B - Utilisation du ciment

Un ciment est un liant hydraulique composé de matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. D'ailleurs, pour les travaux de terrassement, la norme NF- P15-108 met en évidence des liants hydrauliques routiers destinés notamment, à la réalisation d'assises de chaussées, de couches de forme et de terrassements. La norme NF- EN 197-1 subdivise les liants hydrauliques en cinq type en fonction de leur composition à savoir : le ciment Portland (CEM I), le ciment Portland composé (CEM II), le ciment de haut-fourneau (CEM III), le ciment pouzzolaniques (CEM IV) et le ciment composé (CEM V).

En général, tous les liants doivent contenir un ou plusieurs constituants qui présentent l'une au moins l'une des propriétés suivantes :

- Propriétés hydrauliques : elles font développer, par réaction avec de l'eau, des composées hydratées stables très peu solubles dans l'eau.
- Propriétés pouzzolaniques : c'est la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables.
- Propriétés physiques : elles font améliorer certaines qualités du ciment (accroissement de lamaniabilité et de la compacité, diminution du ressuage...etc.).

## 1.6.6 Techniques par inclusion

### 1.6.6.5 Le renforcement par inclusions rigides verticales

Le renforcement par inclusions rigides verticales est envisagé pour les ouvrages de types remblais, dallages, silos... lorsque le sol est trop compressible pour supporter sans tassements importants l'ouvrage à construire, On caractérise le renforcement par inclusions rigides verticales par la combinaison entre les inclusions qui assurent le renforcement et une plateforme de transfert de charge disposée entre le réseau d'inclusions et l'ouvrage ; cette plateforme assure la répartition de la charge entre les inclusions et le sol compressible.

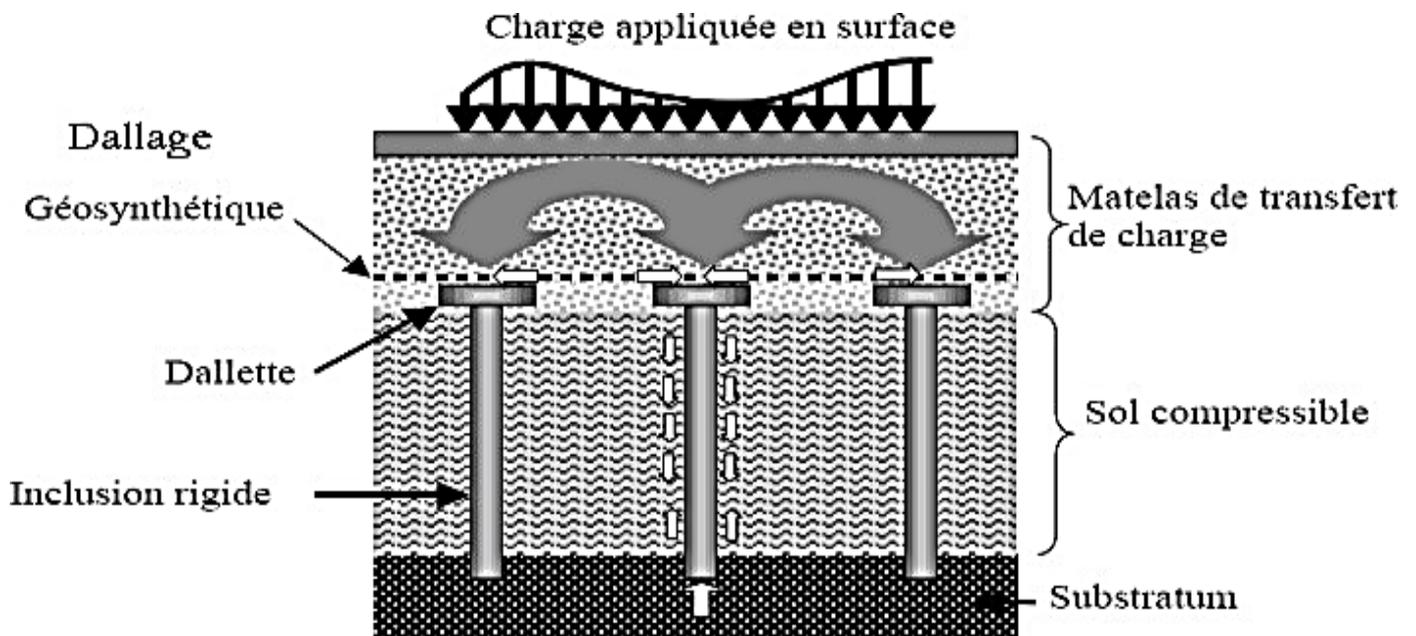


Figure1.18 : Schéma de principe d'un renforcement par inclusions rigides verticales. (Berrabah 2015).

### 1.6.6.6 Colonnes ballastées

Les colonnes ballastées sont utilisées pour améliorer la stabilité et diminuer les tassements des sols très faibles à médiocres (sables limoneux, limons, limons argileux, argiles, remblais hétérogènes, etc.). Un réseau de colonnes de ballast compacté est constitué dans le sol au moyen d'une aiguille vibrante ou d'un tube battu pilonné. Ces colonnes n'agissent comme points de renforcement du sol mou.

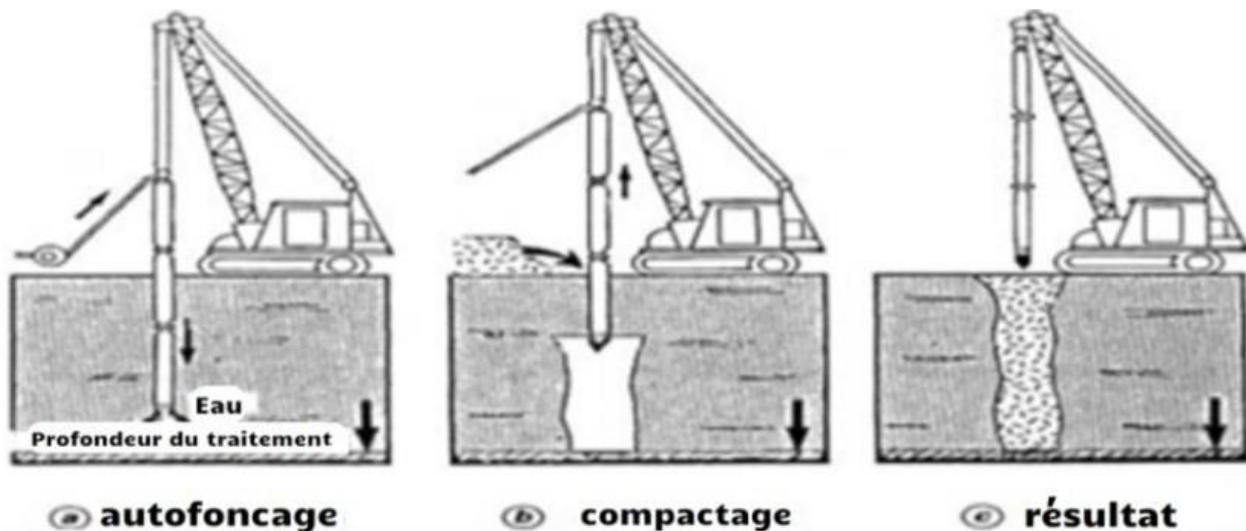


Figure 1.19: Phases d'exécution des colonnes ballastées. (J-Pierre et Georges. 1988).

## 1.7 Eléments perturbateurs de traitement chimique des sols

### 1.7.1 Définition d'un élément perturbateur

Un élément perturbateur peut être défini comme un parasite qui induit des effets néfastes (indésirables) au cours et après le traitement du sol. Dans certains cas, cet élément perturbateur importe des effets bénéfiques pour les sols. Les composés suivants sont liés à la perturbation : les matières organiques, la microstructure, les composés soufrés et les sulfates solubilisés, les Phosphates, les nitrates, les chlorures, la nature des ajouts utilisés (chaux, ciment, pouzzolane naturelle ou artificielle, cendres volantes, fumée de silice...etc. Le [LCPC-Setra. \(2000\)](#) résume dans le **Tableau 1.5** l'effet de certains éléments perturbateurs sur le traitement des sols aux liants hydrauliques.

**Tableau 1.5:** 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 sulfates et sulfures	Formation d'espèces cristallines provoquant un gonflement du sol.
Les chlorures	Accélérateurs de prise et formation de phases gonflantes.
Les phosphates	Inhibiteurs ou retardateurs de prise.
Les nitrates	Inhibiteurs ou retardateurs de prise.

### 1.7.1.5 La matière organique

La matière organique du sol est composée d'organismes vivants, de résidus de végétaux et d'animaux et de produits en décomposition. Il s'agit par exemple, protides, lipides et des glucides. Parmi la matière organique produite, on peut citer : les composés humiques (acides fulviques, acides humiques et humines évolués).

Les acides organiques perturbent le traitement des sols. Les acides organiques (acide acétique, acides humiques, acides tanniques) empêchent la prise parce que le pH est trop faible pour former les produits cimentaires. Les huiles et le sucrose retardent la prise en enrobant les Particules de ciment (ralentissement de l'hydratation), et sans affecter les résistances (Tremblay et al.2002)

### 1.3.1.3 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).

#### 1.3.1.4 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 ammo-phosphatés  $(NH_4)_2(HPO_4)$  et  $(NH_4)_3(PO_4)$  et de superphosphates simple  $\text{ca}(H_2PO_4)_2$  ou triple  $3(\text{ca}(H_2PO_4)_2)$ . Les phosphates se trouvent sous formes d'engrais et de pesticides, de détergents, d'adoucisateurs d'eau, de retardateurs d'incendie, d'additifs pour carburants, de plastiques.

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

#### 1.3.1.5 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 mènent, 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  $(NH_4)_2SO_4$ , l'urée  $(NH_2)_2CO$ , le nitrate de calcium  $\text{ca}(NO_3)_2$  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 (Aggounet *al.* 2008).

D'après Le Borgne. (2010) qui a dopé le limon du Val d'Europe au nitrate d'ammonium (156mg  $\text{NO}_3/\text{kg}$  et 1,56g  $\text{NO}_3/\text{kg}$ ) 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.

### 1.3.1.6 Les sulfates

Les sulfates sont des sels de l'acide sulfurique, les sulfates proviennent généralement de la dégradation chimique de la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) ou du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) d'eaux souterraines et d'embruns marins. Le sulfate de potassium ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) est aussi présent dans l'engrais, le fumier et/ou le pesticide (Pansu et Gautheyrou .2003).

Le sulfate, sous forme de gypse, héli hydrate ou anhydrite, est un composé nécessaire pour réguler la prise dans les ciments et les liants hydrauliques routiers. Ces derniers peuvent contenir de 0,1 à 4,0% de  $\text{SO}_3$ . Toutefois le sulfate est identifié comme cause de gonflement et de fissuration. Lorsque plusieurs sulfates s'associent à l'alumine on assiste à la formation d'un nouveau composé qui est l'étrangéité (trisulfures ou monosulfoaluminate de calcium hydraté) : c'est la réaction sulfatique. Dans certaines conditions ce composé se transforme en thaumasite. Tous deux initient un gonflement et affectent la structure même du matériau.

### 1.3.1 Les effets des éléments chimiques

Depuis la rédaction du GTS (LCPC-Setra. 2000), des travaux et en particulier le projet TerDOUEST (Ifsttar. 2012) ont permis de compléter la connaissance sur les effets des éléments chimiques suivants, qualifiés de perturbateurs de prise (Le Borgne. 2010 ; Saussaye. 2012).

### 1.3.1.3 Le soufre (sous forme de sulfate ou de sulfure)

En présence de liant, cet élément peut générer des gonflements par création de phases cristallines secondaires (étrangéité, thaumasite) avec l'eau, le calcium et l'aluminium disponibles dans le sol (ou dans le liant). Cela peut engendrer des dégradations localisées plus ou moins importantes, voire, dans certains cas, entraîner la destruction totale de la couche traitée.

### 1.7.2.2 Les matières organiques

Toutes ne réagissent pas de la même manière en présence d'un liant. Le pH acide des matières organiques neutralise une partie du liant, le rendant inefficace pour la prise hydraulique. D'autre part, certaines formes contiennent du soufre organique susceptible d'être mobilisé en présence du liant pour créer des phases secondaires gonflantes.

### 1.7.2.3 Les nitrates (NO<sub>3</sub>)

Leur présence en forte quantité (supérieure à 2g/kg) produit des effets limitant la performance mécanique et pouvant même l'empêcher totalement. Mais, à de telles concentrations, les nitrates sont rares dans la nature, à l'exception de certains terrains agricoles ou industriels (engrais, lisier...).

### 1.7.2.4 Les phosphates (PO<sub>4</sub>)

À des dosages supérieurs à 1,2 g/kg, l'effet des phosphates peut se manifester dans les sols argilo-limoneux en limitant les performances mécaniques. Comme les nitrates, ils sont rarement présents dans les sols et les roches naturels à des dosages préjudiciables, sauf dans certains terrains agricoles ou industriels.

## 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différentes caractéristiques des sols mous, et les principaux risques qui se manifestent par ce type des sols médiocres. De plus, nous avons vu les méthodes les plus utilisés en pratique pour l'amélioration des sols, ainsi quelques types des sols pour lesquels elles sont adéquates.

Les techniques d'amélioration des sols (thermiques, mécaniques et hydromécaniques) malgré leur efficacité, elles sont coûteuses et demandent un savoir-faire très élevé. C'est pour cela, la technique de stabilisation chimique par les ajouts minéraux (chaux, ciments.) reste la plus

Pratique de mise en œuvre sur le site et la plus favorable (moins coûteuse). Cette technique s'est développée très rapidement à travers le monde et qui est encore menée à connaître une importante croissance.

Le caractère perturbateur d'un élément chimique résulte de la combinaison de multiples paramètres : les propriétés intrinsèques au sol (concentration et répartition de l'élément, forme chimique.), les caractéristiques du liant (teneur en chaux, etc....)

Par conséquent, une synthèse bibliographique détaillée sera développée dans le chapitre suivant afin de se renseigner sur l'effet des ajouts minéraux sur les sols stabilisés avec ou sans présence des éléments perturbateurs.

# **Chapitre 2**

---

---

## ***Effet des ajouts minéraux sur les sols stabilisés avec et sans présence des composés chimiques***

- 2.1 Introduction***
- 2.2 Effet de la chaux sur les propriétés des sols instables***
- 2.3 Effet du ciment sur les propriétés des sols instables***
- 2.4 Effet des cendres volantes sur les propriétés des sols instables***
- 2.5 Effet de pouzzolane naturelle sur les propriétés des sols instables***
- 2.6 Effet de la fumé de silice sur les propriétés des sols instables***
- 2.7 Conclusion***

## 2.1 Introduction

La construction est une activité qui a généralement le plus fort impact sur la nature. En effet, lors des travaux de génie civil, notamment les travaux routiers (remblais, couches de forme, routiers, voies ferroviaires... etc.) indiquent qu'il existe beaucoup de sols de mauvaise qualité. Afin d'être compatible avec les exigences du développement durable, il est impératif d'utiliser des techniques d'amélioration de différents ajouts minéraux ou cimentaire pour valoriser les caractéristiques médiocres des sols. Ces ajouts peuvent être d'origine naturelle (pouzzolane naturelle), artificielle (chaux, ciment...etc.) ou déchets minéraux (fumée de silice, cendres volantes...etc.). Mais malgré ça, le problème reste encore posé, car, après traitement, le sol stabilisé peut être altéré par certains éléments chimiques nommés « éléments perturbateurs du processus de traitement » à savoir : les chlorures, les sulfates, les nitrates, la matière organique...etc. La nature minéralogique et la microstructure du sol traité peuvent aussi influencer négativement sur le processus d'amélioration.

Dans ce présent chapitre, nous allons présenter en détail une synthèse des travaux de recherches expérimentales sur le traitement des sols avec ou sans présence des éléments perturbateurs.

## 2.2 Effet de la chaux sur les propriétés des sols instables

### 2.2.1 Effet de la chaux sur la plasticité

#### 2.2.1.1 En absence d'éléments perturbateurs

Plusieurs chercheurs comme [Manasseh and Olufemi. 2008](#) ; [Gadouri et al. 2016a, 2017](#) ont démontré que la limite de plasticité (WP) augmente avec l'addition de la chaux, En revanche l'indice de plasticité du sol diminue. Ainsi que la limite de liquidité (WL) varie selon le dosage de chaux et la nature du sol argileux traité.

[Bell. \(1996\)](#) a démontré que la limite de plasticité et la limite de liquidité de la kaolinite traitée augmentent légèrement avec l'addition de 2% de chaux. Pour l'argile montmorillonite traitée, la limite de plasticité augmente avec la chaux jusqu'à 4% puis se stabilise alors que la limite de liquidité diminue progressivement jusqu'à 8% de chaux. Ces résultats indiquent que la chaux modifie l'affinité à l'eau des particules de la kaolinite et cela se traduit par l'augmentation de la capacité d'échange cationique et en conséquence de la capacité d'absorption d'eau et donc la limite de liquidité augmente. Tandis que dans le cas de la montmorillonite, l'ajout de la chaux diminue considérablement la limite de liquidité avec l'augmentation de la limite de plasticité.

Afès et al. (2000) ont rapporté que la limite de plasticité d'une argile stabilisée par 6% de chaux augmente de 24% jusqu'à 32.4 et 34% après une cure de 7 et 30 jours. Ce résultat peut être expliqué par l'utilisation de la chaux qui conduit à la floculation des particules d'argiles en causant une croissance immédiate de la limite de plasticité du sol stabilisé.

### 2.2.1.2 En présence d'éléments perturbateurs

Kinuthia et al. (1999) ont étudié la plasticité d'une kaolinite traitée à 6% de chaux en présence de sulfates monovalents et divalents. Les résultats obtenus montrent que les sulfates divalents diminuent la plasticité plus que les sulfates monovalents pour des fortes concentrations (2 à 3% de  $SO_3$ ). Cependant, l'effet est le contraire en faible dosage en sulfate (moins de 1% de  $SO_3$ ). Donc, la diminution de la plasticité dépend de la concentration en sulfate et du type de cation qui s'attache à l'ion sulfatique.

La limite de liquidité décroît pour un dosage (1% de  $SO_3$ ) puis elle augmente avec son augmentation (2 et 3%  $SO_3$ ). Contrairement au sulfate divalent ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), la limite de liquidité diminue avec leur augmentation. Cela mis en évidence l'effet de la nature des minéraux argileux qui se présentent dans les sols du fait que les sols montmorillonitiques possèdent généralement une capacité d'échange cationique (CEC) bien plus élevée que celle des sols kaoliniques.

Sivapullaiah et al. (2000) ont obtenu des résultats différents ; Ils ont trouvé l'effet d'un sulfate divalent et monovalent sur la limite de liquidité d'une montmorillonite très plastique, traitée à 6% de chaux éteinte avec des concentrations en sulfates de 0.5, 1 et 3%. La limite de liquidité augmente avec le dosage en sulfate. Ils ont remarqué que le sulfate monovalent augmente plus la limite de liquidité que le sulfate divalent (**Tableau 2.1**).

**Tableau 2.1:** Effet du sulfate de sodium et de calcium sur la limite de liquidité d'une montmorillonite traitée à 6% chaux, (Sivapullaiah et al. 2000)

Nature du sol et nom du sulfate utilisé	concentration	Limite de liquidité
Sol naturel (Montmorillonite)	0.0	68.0
Sulfate monovalent ( $Na_2SO_4$ )	0.5	78.6
	1.0	78.9
	3.0	82.7
Sulfate divalent ( $CaSO_4$ )	0.5	70.0
	1.0	73.0
	3.0	76.0

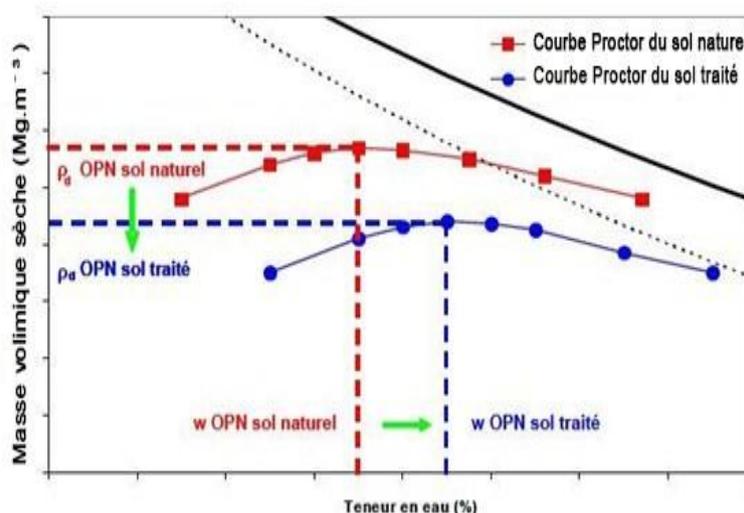
## 2.2.2 Effet de la chaux sur le compactage

### 2.2.2.1 En absence d'éléments perturbateurs

Pour les propriétés de compactage, [Parker. \(2008\)](#) a montré que l'augmentation de la teneur en eau optimale ( $w_{opt}$ ) et la réduction de la densité sèche maximale ( $\gamma_{dmax}$ ) liée à l'augmentation du dosage en chaux comme résumé dans le Tableau 2.2. [Le LPCP et SETRA \(2000\)](#) confirment ces résultats (**Voir la figure 2.1**).

**Tableau 2.2:** Effet de la chaux sur les propriétés de compactage ([Parker.2008](#)).

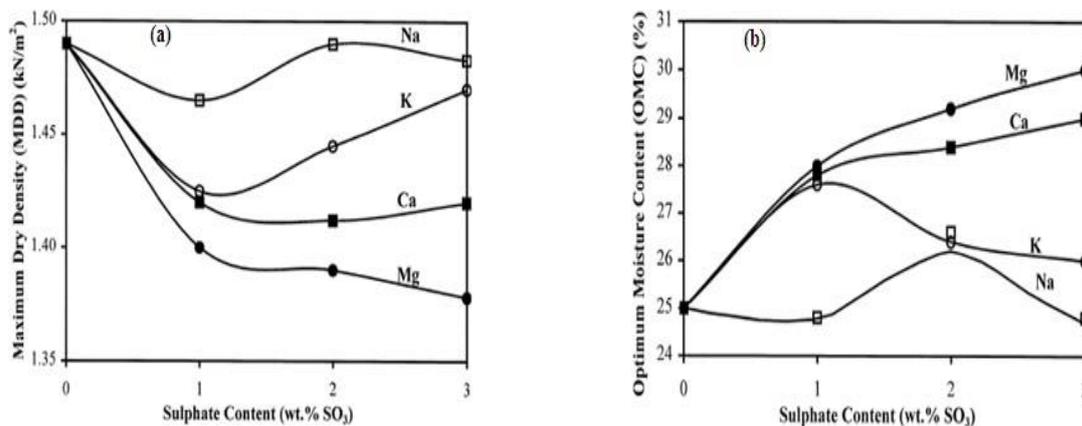
chaux(%)	3	3.5	4
$W_{opt}$ (%)	21.70	22.50	23.00
$\gamma_{dmax}$ (KN/m <sup>3</sup> )	15.11	14.92	14.78



**Figure 2.1:** Modification des caractéristiques de compactage d'un sol suite à l'ajout de chaux, d'après le GTS ([LCPC –SETRA. 2000](#)).

### 2.2.2.2 En présence d'éléments perturbateurs

Les résultats obtenus par [Kinuthia et al. \(1999\)](#) ont montré que les caractéristiques de compactages de la kaolinite traité à 6% de chaux sont négativement influées par la présence des sulfates tout en diminuant la densité sèche maximale (quel que soit la concentration et le type de cations sulfates) et en augmentant la teneur en eau optimale. En effet, les sulfates divalents influencent considérablement sur les caractéristiques de compactage que les sulfates monovalents (**Voir La Figure 2.2**) indique que les sulfates divalents présentent une variation cadencée alors que les monovalents ont une variation perturbée.

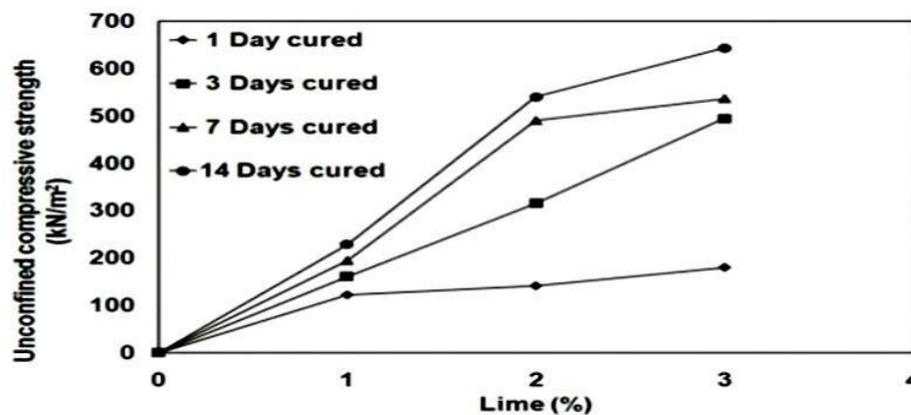


**Figure 2.2:** Effet des sulfates monovalents et divalents sur les paramètres de compactage d’une kaolinite traité à 6% de chaux, (a) : la densité sèche maximale, (b) : la teneur en eau optimale. (Kinuthia et al.1999).

### 2.2.3 Effets de la chaux sur la résistance à la compression

#### 2.2.3.1 En absence d’éléments perturbateurs

Selon Umesha et al. (2009), la résistance mécanique des sols argileux augmente avec l’addition de la chaux (Voir la figure 2.3).



**Figure 2.3:** Effet de la chaux sur la résistance à la compression (Umesha et al.2009).

Bell (1996) a démontré que l’augmentation des résistances mécaniques dépend non seulement du dosage en chaux utilisé mais aussi de la nature des minéraux argileux du sol traité et de la période de cure. En effet, après 21 jours de cure, les sols contenant du quartz présentent une résistance 5 fois plus grande que ceux possédant d’autres minéraux. Par conséquent, la résistance de la montmorillonite diminue à partir de 4% de chaux pour toutes les périodes de cure. De plus, Manasseh et Olufmi. (2008) ont obtenu une valeur optimale de résistance à la compression simple pour 8% de chaux ajoutée au sol argileux. Selon Al-Mukhtar et al. (2012), la résistance à la compression non confinée à court et à long terme d’une argile

(Smectites) augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux et de la période de cure (**Tableau 2 .3**).

**Tableau 2.3:** Effet de la teneur en chaux et de la période de cure sur la résistance à la compression non confinée d'une argile de la famille des smectites. (Al-Mukhtar et al. 2012).

Dosage en chaux %	Résistance à la compression non confinée (MPa, $\pm 0.1$ MPa)	
	Après 7 jours	Après 90 jours
0%	0.3 sans cure	0.3 sans cure
1%	0.4	0.4
4%	1.2	1.8
10%	1.6	2.4

### 2.2.3.2 En présence d'éléments perturbateurs

Rajasekaran et al. (1997) a démontré que la résistance à la compression simple de sols argileux traités à la chaux augmente lorsque l'on ajoute du chlorure, que ce soit du chlorure de sodium, du chlorure de potassium, du chlorure de calcium ou du chlorure de magnésium.

Dermatas and Meng. (2003) ont rapporté qu'avec 5% de sulfate de sodium deca-hydraté, la résistance à la compression non confinée d'un sable contenant 30% de kaolinite traité avec 10% de chaux diminue de 607.1 KPa jusqu'à 552.8 KPa après 28 jours de cure. Cependant, Yilmaz and Civelekoglu. (2009) ont indiqué que la stabilisation d'une bentonite naturelle très plastique (montmorillonite-Na est le constituant principal) avec l'addition du gypse comme additif présente un effet positif sur la résistance à la compression non confinée. Ils ont trouvé que la résistance augmente de 58 à 77.5 KPa pour 5% de gypse puis elle se stabilise presque à 80KPa pour 7.5 et 10% de gypse.

## 2.2.4 Effet de la chaux sur la résistance au cisaillement

### 2.2.4.1 En absence d'éléments perturbateurs

Muntohar and Hantoro. (2000) montrant que pour un dosage en chaux de 10% l'angle de frottement est environ 1.7 fois celui du sol non traité. L'augmentation de la cohésion est attribuée à la formation des nouveaux produits de cimentation (C-S-H, C-A-H), tandis que celle de l'angle de frottement est due à la floculation des mêmes particules. De plus, Sivapullaiah et al. (2000) ont rapporté que l'augmentation de la résistance au cisaillement est attribuée à l'amélioration de la cohésion suite aux réactions pouzzolaniques qui font lier les particules des sols stabilisés par cimentation.

### 2.2.4.2 En présence d'éléments perturbateurs

Sivapullaiah et al. (2000) ont constaté, que l'angle de frottement interne diminue avec l'augmentation de la concentration en sulfate monovalent ou divalent d'une montmorillonite traité à 6% de chaux, mais avec la présence de 1% de  $\text{CaSO}_4$ , l'angle de frottement interne devient plus grand par rapport à celui du sol traité sans  $\text{CaSO}_4$ . Cependant, après 7 jours de cure, la cohésion effective du sol traité initialement diminue en présence d'une faible concentration en sulfate monovalent (1%), puis elle augmente pour des fortes concentrations. Par contre, pour la même période de cure, l'effet apporté sur la cohésion a été inversé pour le cas d'un traitement en présence d'un sulfate divalent. 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 300 KPa en présence de 0.5 et 1% de  $\text{CaSO}_4$ , 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  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

**Tableau 2.4:** Effet des sulfates sur les paramètres de cisaillement effectifs ( $C'$  et  $\varphi'$ ) d'une motmorillonite traité à 6% de chaux à différentes périodes de cure. (Sivapullaiah et al.2000)

Type du sulfate utilisé	Teneur en sulfate	Paramètres de cisaillement	Période de cure		
			7 jours	3 mois	12 mois
Sol traité sans sulfate	0	$C'$ (KPa)	73	243	263
		$\varphi'$ (°)	43	41	41
Sol traité avec sulfate monovalent ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	0.5	$C'$ (KPa)	33	104	103
	1		47	186	1
	3		77	120	88
	0.5	$\varphi'$ (°)	41	35	29
	1		42	44	40
	3		43	31	32
Sol traité avec sulfate divalent ( $\text{CaSO}_4$ )	0.5	$C'$ (KPa)	180	104	80
	1		120	102	110
	3		110	96	80
	0.5	$\varphi'$ (°)	39	39	31
	1		37	36	44

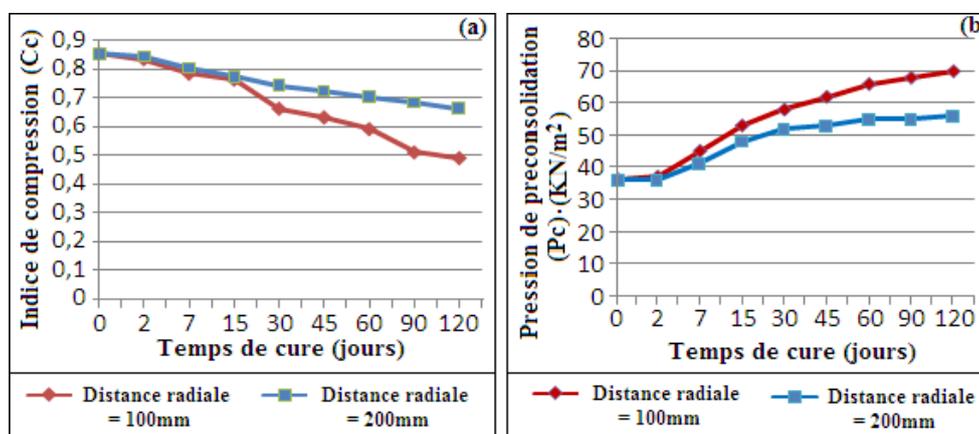
## 2.2.5 Effet de la chaux sur la compressibilité

### 2.2.5.1 En absence d'éléments perturbateurs

Ouhadi et al. (2014) ont étudié les caractéristiques de compressibilité d'un sol argileux peu plastique en présence de différents teneurs en chaux (0, 2, 4, 6, 8 et 10%). Les résultats trouvés montrent que l'indice de compression se réduit de 40% pour un dosage de 2% de chaux. De plus, l'indice de compression continue à diminuer jusqu'à 88% en présence de 6% de chaux. La réduction considérable de ce paramètre est attribuée aux réactions pouzzolaniques développées par l'interaction de la chaux avec les particules argileuses du sol traité tout en produisant de nouveaux composés cimentaires (C-S-H et C-A-H) résistants aux charges extérieures. En outre, la pression de pré consolidation augmente significativement avec l'augmentation de la quantité de chaux utilisée.

### 2.2.5.2 En présence d'éléments perturbateurs

Rajasekaran and Narasimha Rao. (2002) ont montré que l'indice de compression d'une argile marine traitée à la chaux en présence de 0.2% de sulfate de calcium et 1.8% de chlorure de calcium diminue de 0.85 à 0.49 tandis que, la pression de pré consolidation augmente de 36 à 70  $\text{KN/m}^2$  (Voir la figure 2.4).



**Figure 2.4:** Effet du sulfate de calcium et du chlorure de calcium sur les paramètres de compressibilité d'une argile marine traitée à la chaux, (a) : indice de compression, (b) : pression de pré consolidation.

(Rajasekaran and Narasimha Rao, 2002)

Rajasekaran et Narasimha Rao (2002) ont constaté que le chlorure de calcium fait augmenter la pression de pré consolidation de 36 à 82  $\text{KN/m}^2$  et réduire l'indice de compression de 0.85 à 0.42. Cependant, après 10 jours de cure, le sulfate de sodium ne produit qu'une faible diminution de l'indice de compression (de 0.7 à 0.8). Tandis que la pression de

Pré consolidation augmente de 36 à 48 KN/m<sup>2</sup> puis elle diminue jusqu'à 45 KN/m<sup>2</sup> en présence du sulfate de sodium.

## 2.3 Effet du ciment sur les propriétés des sols instables

### 2.3.1 Effet du ciment sur la plasticité

#### 2.3.1.1 En absence d'éléments perturbateurs

Asgari et al. (2015) ont constaté que la limite de liquidité et l'indice de plasticité d'un sol peu plastique (IP=9%) augmentent jusqu'à un optimum qui correspond à 3% du ciment puis ils diminuent avec l'augmentation de la teneur en ciment. Cependant, la limite de plasticité augmente avec l'augmentation de la quantité du ciment utilisé (Voir la figure 2.5).

Par contre, Osula. (1991) a montré que l'indice de plasticité diminue avec l'addition du ciment. Cette diminution indique une amélioration de la maniabilité du sol instable. Pour cela une addition de 3% de ciment est suffisante pour augmenter la maniabilité en réduisant l'indice de plasticité de 21.7% à 12.7%.

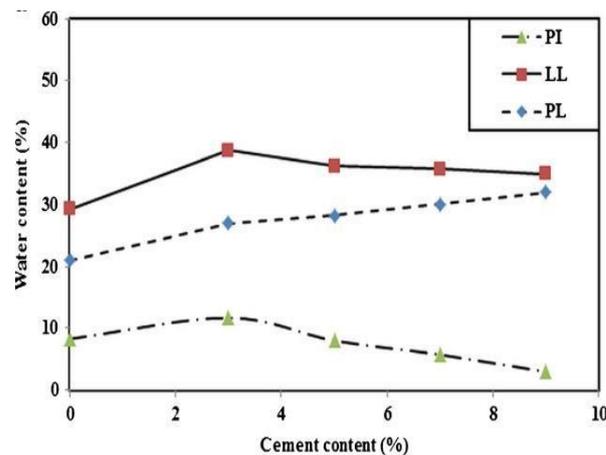


Figure 2.5: Effet du ciment sur les limites d'Atterberg d'un sol peu plastique (Asgari et al.2015).

### 2.3.2 Effet du ciment sur le compactage

Gay and Schad. (2000) ont prouvé que la teneur en eau optimale augmente et la densité sèche maximale réduit d'un sol argileux de forte plasticité par l'ajout du ciment. Un comportement similaire a été observé par Asgari et al. (2015). Par contre, Degirmenci et al. (2006), ont étudié deux sols et ils ont constaté que la teneur en eau optimale diminue immédiatement après l'addition du ciment et continue de diminuer avec le temps, par contre la densité sèche maximale augmente (Tableau 2.5).

L'addition du ciment améliore et modifie les caractéristiques du sol, menant à un compactage performant avec une augmentation de la densité sèche. L'agglomération du ciment autour des grains de sol, cause une augmentation de la taille des particules fines, et peut aussi avoir une légère réduction de la teneur en eau optimale. L'ajout du ciment affecte la distribution des particules du sol en augmentant la taille des particules fines et de ce fait une réduction de l'attraction d'eau.

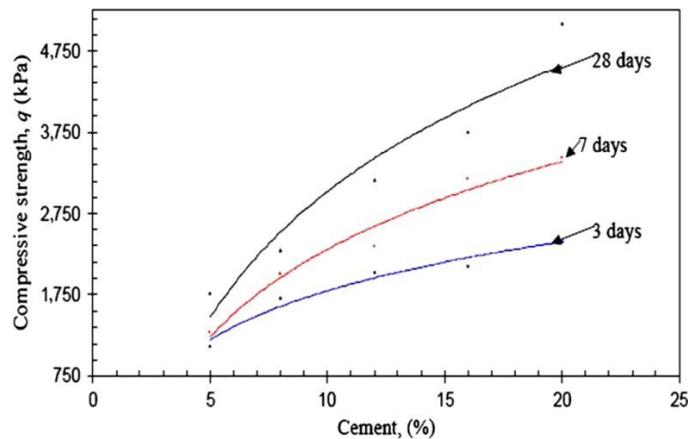
**Tableau 2.5:** Effet du ciment sur les propriétés de compactage (Degirmenci et al. 2006).

Ciment	Sol 1		Sol 2	
	$\square d_{max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Wopt (%)	$\square d_{max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Wopt (%)
0	13.64	37.70	14.00	43.58
5	13.63	37.80	14.27	34.50
10	13.64	36.75	14.19	32.83
15	13.95	36.90	14.17	32.53

### 2.3.3 Effet du ciment sur la résistance à la compression

#### 2.3.3.1 En absence d'éléments perturbateurs

D'après Estabragh et al. (2010), la résistance à la compression après 3, 7 et 28 jours de cure augmente au fur et à mesure que le pourcentage en ciment augmente (**Voir la figure 2.6**). Ce comportement a été observé aussi par Asgari et al. (2015). Selon Okagbue and Ochulor. (2007), la résistance à la compression non confinée augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment. L'augmentation de la résistance est attribuée aux composantes actives du ciment portland. Par l'hydratation, ces composés actifs (silicate tricalcique, silicate di calcique et l'aluminate tricalcique) se cristallisent et font lier ensemble les particules du sol, de ce fait en les transformant en masse dure. Les résultats obtenus suggèrent que l'efficacité du ciment dans l'amélioration de la résistance du sol peut également être attribuée à la composition du sol.

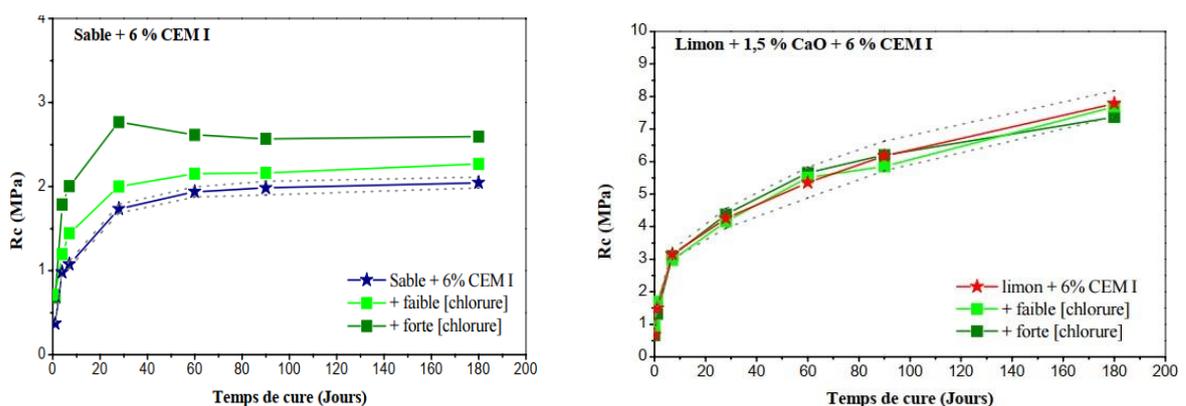


**Figure 2.6:** Variation de la résistance à la compression d’un sol argileux en fonction du pourcentage en ciment à différentes durées de cure (Estabragh et al. 2010).

### 2.3.3.2 En présence d’éléments perturbateurs

Le Borgne. (2010) a étudié l’influence des ions chlorure sur la résistance à la compression de deux sols, un sable et un limon. Le sable est traité à 6% de ciment CEMI et le limon est traité à 1,5% de chaux et 6% de ciment CEMI. Les résultats indiquent que la présence du chlorure de sodium a amélioré de 21,1 % la résistance à la compression simple d’un sable de Bouër. Par contre, la résistance à la compression simple n’est pas altérée en présence de chlorure dans le limon du Val d’Europe (Voir la figure 2.7).

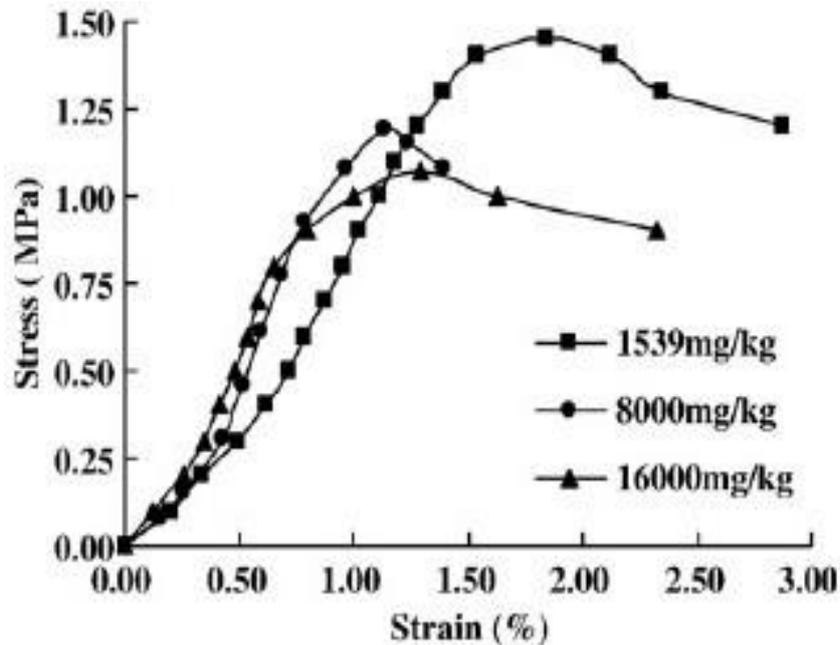
Tandis que, Saussaye. (2012) a démontré que l’ajout de  $1g.kg^{-1}$  de NaCl améliore les résistances à la compression pour des sols limoneux traités avec du ciment CEMII.



**Figure 2.7:** Influence d’une addition de NaCl sur les résistances à la compression simple de sols traités (A) sable de Bouër ; (B) limon du Val d’Europe (Le Borgne. 2010).

(Xing et al. (2009) ont trouvé que les ions de chlorure de sodium pour une concentration de  $8,0g.kg^{-1}$  (4%) provoquent une baisse de résistance à la compression d’environ 20% par

Rapport à un sol contenant  $1,5\text{g Cl}\cdot\text{kg}^{-1}$  (contrainte  $\sigma$  maximale de  $1,24\text{ MPa}$  contre  $1,50\text{ MPa}$ ). Cet affaiblissement de performance est aussi constaté à 7 et 90 jours (**Voir la figure 2.8**).



**Figure 2.8:** Influence d'une addition de NaCl sur les résistances à la compression simple d'un sol riche en sels traité. (Xing *et al.* 2009).

Laguros. (1962) a montré que la résistance à la compression simple (RCS) du sol témoin augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment utilisé et de la période de cure. Cependant, quel que soit le temps de cure et le dosage en ciment utilisé, la RCS de l'argile traitée est optimale lorsque la concentration en  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaCl}_2$  et  $\text{NaOH}$  est faible. Alors que, généralement, pour des fortes concentrations en mêmes composés chimiques, la RCS semble fortement perturbée. Inversement au cas d'un traitement avec 5% de ciment en présence de différentes concentrations en  $\text{MgSO}_4$ , la RCS présente une variation cadencée où elle diminue au jeune âge et semble être constante à long terme. De plus, pour 12% de ciment en présence des mêmes concentrations en  $\text{MgSO}_4$ , la RCS semble être perturbée (**Voir la figure 2.9**).

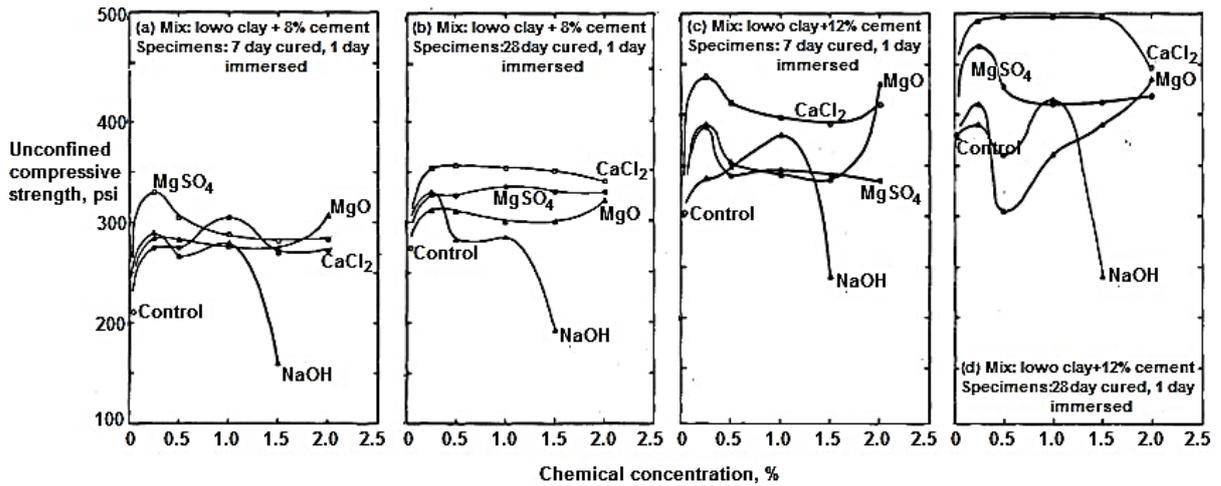
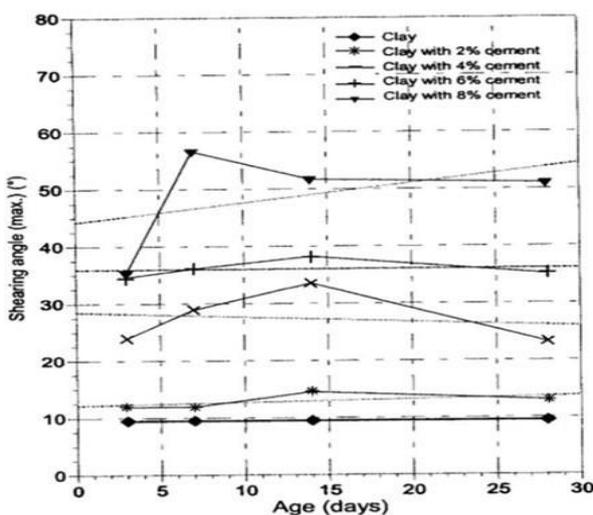


Figure 2.9: Effet de certains types de composés chimiques sur la résistance à la compression non confinée de l’argile d’Iowa après 7 et 28 jours de cure. (Laguros. 1962).

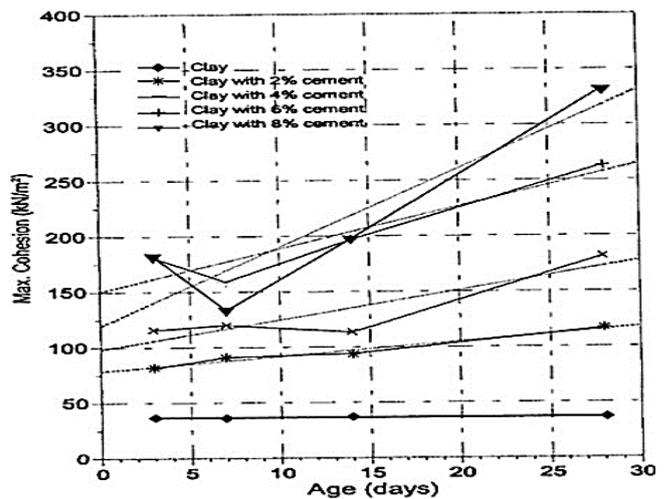
### 2.3.4 Effet du ciment sur la résistance au cisaillement

#### 2.3.4.1 En absence d’éléments perturbateurs

Gay and Schad. (2000) ont montré que les caractéristiques de cisaillement d’un sol instable traité avec différentes teneurs en ciment ont été améliorées d’une façon remarquable et ceci pour différentes périodes de cure (Voir la figure 2.10). Ainsi pour une teneur en ciment de 8% et une période de cure de 28 jours, l’angle de frottement interne est environ 5 fois celui du sol instable non traité. Ceci traduit bien la stabilité requise après l’amélioration par le ciment du sol instable. Le même comportement est observé pour la cohésion qui représente 7.5 fois celle du sol non traité.



A-variation de l’angle de frottement interne



B-variation de la cohésion

Figure 2.10: Effet du ciment sur les caractéristiques de cisaillement. (Gay and Schad. 2000).

### 2.3.4.2 En présence d'éléments perturbateurs

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 12% de ciment portland augmente de 10 à 20 kPa et de 15 à 37°, respectivement. Cependant, pour une même période de cure avec la présence de 2% de CaSO<sub>4</sub>, la valeur de la cohésion est devenue 3 fois plus grande par rapport au sol traité. Tandis que, l'angle de frottement interne a diminué seulement de 4° par rapport au sol traité. Ces résultats montrent que le sulfate de calcium porte un effet bénéfique pour un sol limoneux traité au ciment (**Tableau 2.6**).

**Tableau 2.6:** Effet de 2% de CaSO<sub>4</sub> sur les paramètres de cisaillement d'un sol limoneux traité avec 12% de ciment portland. (Laguros.1962).

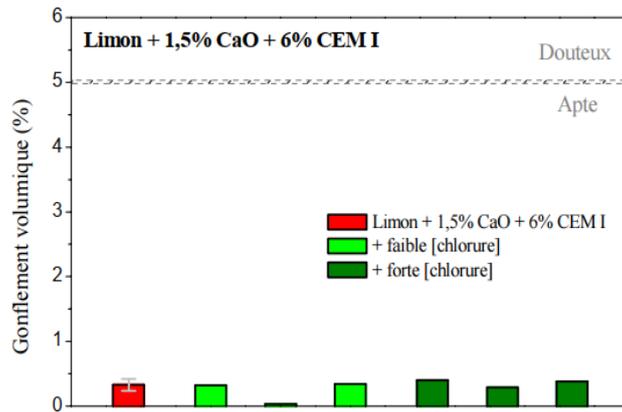
Désignation	Cohésion (KPa) après 7 jours	Angle de frottement interne (°) après 7 jours
Limons d'Iowa non traité	10	15
Limons d'Iowa + 12% de ciment	20	37
Limons d'Iowa + 12% de ciment + 2% de CaSO <sub>4</sub>	60	33

### 2.3.5 Effet du ciment sur le gonflement

#### 2.3.5.1 En présence d'éléments perturbateurs

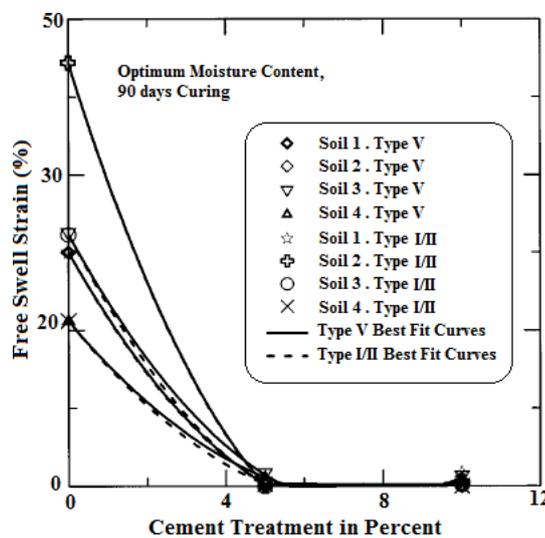
Selon le Borgne. (2010) le gonflement volumique d'un sable de Bouër traité avec du CEM I n'est pas affecté de manière significative par l'addition de NaCl, pour des faibles et fortes concentrations. Les mêmes résultats ont été trouvés pour un limon du Val d'Europe traité avec 6% du CEM I et 1.5% de chaux (**Voir la figure 2.11**).

Une autre étude par Nabil et AISSA. (2004), basée sur l'utilisation des chlorures pour limiter le gonflement de l'argile a permis d'obtenir des résultats significatifs : Les chlorures (KCl, NaCl, CaCl<sub>2</sub>) réduisent considérablement, jusqu'à 70% le gonflement de la bentonite qui est de la famille des smectites.



**Figure 2.11** : Essai d’aptitude : gonflement volumique sur le mélange limon + NaCl + CaO +CEM I ([dosage faible] = 100 mg.kg<sup>-1</sup> NaCl ; [dosage fort] = 2000 mg.kg<sup>-1</sup> NaCl) [Le Borgne \(2010\)](#).

[Puppala et al. \(2004\)](#) ont étudié l’efficacité des ciments résistants aux sulfates (types I/II et V) sur le potentiel de gonflement de quatre sols argileux très plastiques et riches en sulfates à savoir : Sol1, Sol2, Sol3 et Sol4. Les résultats obtenus ont montré que les deux types de ciment utilisés ont fait améliorer les propriétés physiques des sols traités en réduisant leur potentiel de gonflement libre (**Voir la figure 2.12**). En effet, pour 5% de ciment, le potentiel de gonflement est devenu nul après 90 jours de cure.



**Figure 2.12:** Effet de différents dosages en ciment sur le potentiel de gonflement de quatre sols argileux très plastiques contenant différentes teneurs en sulfate soluble après 90 jours de cure.

([Puppala et al. 2004](#)).

## 2.4 Effet des cendres volantes sur les propriétés des sols instables

### 2.4.1 Effet des cendres volantes sur la plasticité

#### 2.4.1.1 En absence d'éléments perturbateurs

D'après [Mohanty et al. \(2016\)](#), l'indice de plasticité et la limite de liquidité diminuent avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes. Mais, une augmentation de la limite de plasticité a été bien remarquée (Tableau 2.7) résume les résultats trouvés.

**Tableau 2.7:** Effet des cendres volantes sur les limites d'Atterberg ([Mohanty et al. 2016](#)).

(%) Sol+(%) CV	LL (%)	PL (%)	PI (%)
95% Sol + 5% CV	53.00	23.70	29.30
90% Sol + 10% CV	52.25	24.31	27.94
85% Sol + 15% CV	51.44	28.31	23.13
80% Sol + 20% CV	49.50	29.47	20.03
75% Sol + 25% CV	49.23	31.73	17.50
70% Sol + 30% CV	48.75	31.96	16.79

### 2.4.2 Effet de la combinaison chaux/ cendres volantes

#### 2.4.2.1 En absence d'éléments perturbateurs

[Ansary et al. \(2006\)](#) ont étudié deux sols (A et B) de plasticité faible par la combinaison de la chaux et de cendres volantes. Les résultats obtenus ont montré que la limite de liquidité et de plasticité augmente pour le sol -B- quel que soit le dosage en chaux/cendres volantes, tandis que la limite de liquidité du sol -A- diminue alors que sa limite de plasticité augmente avec l'augmentation du dosage en cendres volantes (**Tableau 2.8**).

**Tableau 2.8:** Effet de la combinaison chaux/cendres volantes sur la plasticité de deux sols (A et B) de plasticité faible à moyenne ([Ansary et al. 2006](#)).

Propriétés	Sols non traités		3% de chaux mélangée avec					
			6% de cendres volantes		12% de cendres volantes		18% de cendres volante	
	Sol -A-	Sol -B-	Sol -A-	Sol -B-	Sol -A-	Sol -B-	Sol -A-	Sol -B-
WL	43.7	25.5	42.5	31.2	41	32.3	41.5	33.7
WP	30.4	23.5	32.9	28.9	37.1	33.5	38.1	35.8

### 2.4.2.2 En présence d'éléments perturbateurs

Sivapullaiah and Jha. (2014) ont trouvés que l'indice de plasticité d'une argile très plastique diminue de 40.4 à 5,9% avec un traitement combiné de 10% des cendres volantes (CV) et de 6% de chaux (**Tableau 2.9**). Cela peut être dû à la diminution de la teneur en argile et la modification de son classement en raison de la taille plus grossière des particules et de la plus faible limite de liquidité de cendres volantes par rapport au sol. Cependant, pour la même combinaison (10%CV et de 6% de chaux), l'indice de plasticité diminue encore plus jusqu'à 1,4% en présence seulement de 1% de gypse. Cela peut être dû à la diminution supplémentaire de la double couche diffuse et de l'augmentation de la viscosité des fluides de pores par l'absorption de plus d'ions calcium présents dans le gypse.

**Tableau 2.9:** Effet de la combinaison de la chaux et des cendres volantes sur les limites d'Atterberg d'une argile gonflante en présence de 1% de gypse (Sivapullaiah and Jha. 2014).

Teneurs en eau	Argile non traitée	Argile traitée avec des combinaisons de Chaux/CV sans			Argile traitée avec des combinaisons de Chaux/CV avec		
		10%FA+ 2%L	10%FA+ 4%L	10%FA+ 6%L	10%FA+ 2%L	10%FA+ 4%L	10%F A+ 6%L
<b>WL (%)</b>	72.10	60.00	58.30	55.20	59.50	56.80	54.20
<b>WP (%)</b>	31.70	47.00	47.70	49.30	48.3.	51.70	52.80
<b>IP (%)</b>	40.40	13.00	10.60	5.90	11.20	5.10	1.40

### 2.4.3 Effet des cendres volantes sur le compactage

#### 2.4.3.1 En absence d'éléments perturbateurs

Kolay and Ramesh. (2015) ont constaté une diminution de la densité sèche et une augmentation de la teneur en eau optimale avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes (**Tableau 2.10**). Cette réduction est liée à la faible densité spécifique des cendres volantes par rapport au poids du sol. La réduction est de l'ordre de 15 à 20% où la teneur en eau optimale a augmenté avec l'augmentation progressive de la teneur en cendres volantes. L'augmentation de la teneur en eau réduit les densités sèches des sols.

**Tableau 2.10:** Effet des cendres volantes sur les paramètres de compactage. (Kolay and Ramesh, 2015).

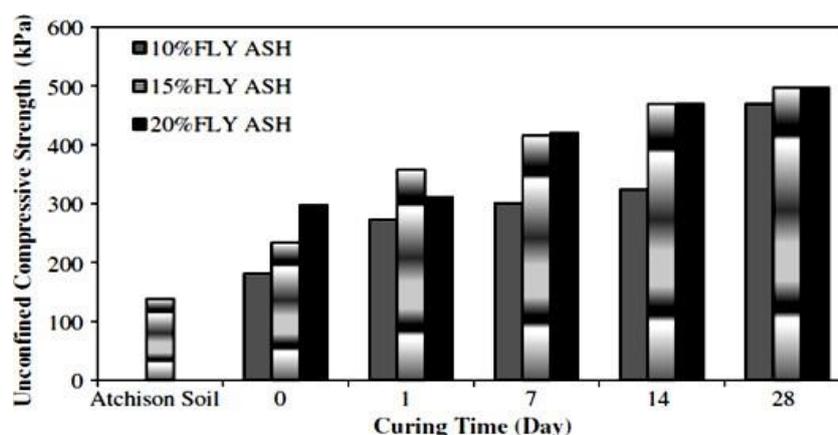
CV (%)	0	10	20	30	40	50
$\gamma_{dmax}$ (KN/m <sup>3</sup> )	13.44	13.24	13.04	12.95	12.85	12.75
Wopt (%)	30.02	30.97	32.20	33.00	34.50	35.40

## 2.4.4 Effet des cendres volantes sur la compression

### 2.4.4.1 En absence d'éléments perturbateurs

Kang et al. (2014) indiquent que l'amélioration de la résistance est due à l'augmentation du dosage des cendres volantes avec une durée suffisante (Voir la figure 2.13).

Bin-Shafique et al. (2010) ont trouvé que la résistance à la compression non confinée, traité avec 20% de cendres volantes augmente de 210 à 800KPa pour un sol de faible plasticité et de 180 à 560KPa pour un sol fortement expansif.



**Figure 2.13:** Effet de la durée de cure sur la résistance à la compression d'un sol argileux amélioré par les cendres volantes (Kang et al. 2014).

## 2.4.5 Effet des cendres volantes sur la résistance au cisaillement

### 2.4.5.1 En absence d'éléments perturbateurs

Sezer et al. (2006) ont démontré que les caractéristiques de cisaillement du sol instable traité présentent une grande amélioration prouvant ainsi l'efficacité du traitement aux cendres volantes. De plus pour un dosage de 20% de cendres volantes et après une cure de 28 jours, la cohésion est devenue 3.8 fois plus grande que celle du sol non traité. De même, l'angle de frottement interne est environ 0.5 fois celui du sol non traité. D'autre part, Senol et al. (2006) ont rapporté que l'augmentation ou la diminution des paramètres de cisaillement dépendent non seulement de la teneur en cendres volantes utilisée mais aussi de la nature du sol stabilisé (Tableau 2.11).

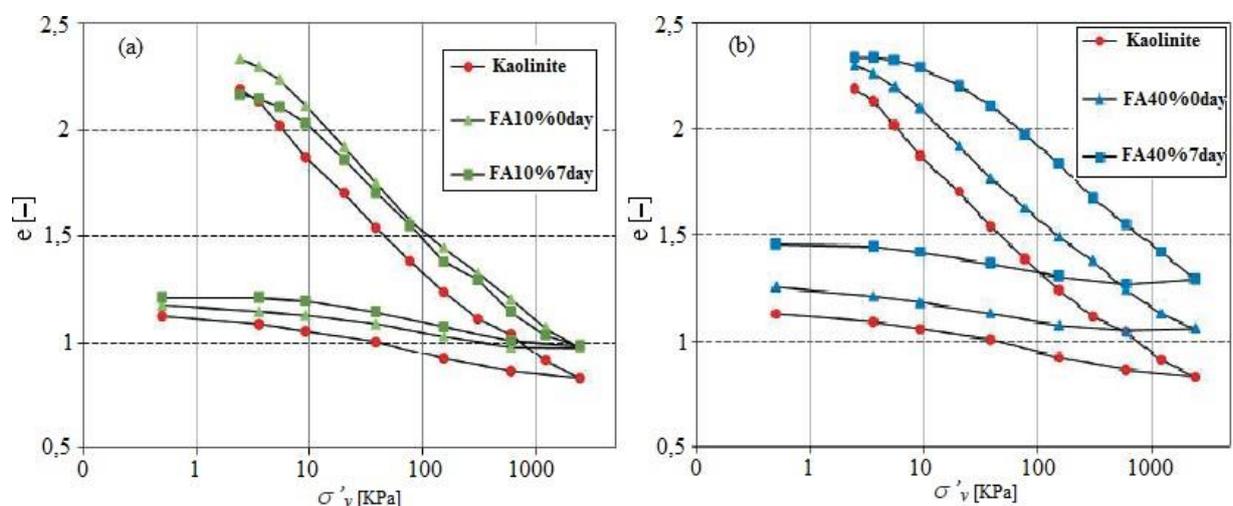
**Tableau 2.11:** Effet des cendres volantes sur les caractéristiques de cisaillement, (Senol et al. 2006).

échantillons N°	% cendres volantes	Cohésion (Kg/cm <sup>2</sup> )			Angle de frottement interne		
		Sol-A-	Sol-B-	Sol-C-	Sol-A-	Sol-B-	Sol-C-
1	0	0.250	0.185	0.530	30°15'	25°32'	17°10'
2	9.0	0.250	0.280	0.523	31°36'	24°13'	20°26'
3	20.0	0.270	0.300	0.475	33°1'	25°12'	21°58'
4	28.0	0.310	0.300	0.500	35°56'	28°18'	23°15'
5	35.5	0.340	0.330	0.480	34°12'	29°38'	26°17'
6	41.2	0.370	0.370	0.440	32°6'	29°53'	27°22'
7	46.0	0.395	0.380	0.395	28°38'	30°38'	27°56'
8	100.0	-	0.150	-	-	29°21'	-

## 2.4.6 Effet des cendres volantes sur la compressibilité

### 2.4.6.1 En absence d'éléments perturbateurs

Knapik et al. (2014) ont trouvé que l'indice des vides d'une kaolinite a augmenté par l'addition de 10 et 40 % de cendres volantes après 0 et 7 jours de cure. De plus, la compressibilité du sol traité diminue avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes. Ainsi, le rôle important du temps de cure peut être observé pour les mélanges de sol et de cendres volantes en quantité de 40% (Voir la figure 2.14). La diminution de la compressibilité du sol traité avec la période de cure est probablement due aux effets des Composés de cimentation (C-S-H et C-A-H) qui sont le résultat des réactions pouzzolaniques favorisées par un environnement fortement alcalin.



**Figure 2.14:** Effet de différentes teneurs en cendres volantes sur la compressibilité d'une kaolinite. (Knapik et al. 2014).

## 2.5 Effet de la pouzzolane naturelle sur les propriétés des sols instables

### 2.5.1 Effet de la pouzzolane naturelle sur la plasticité

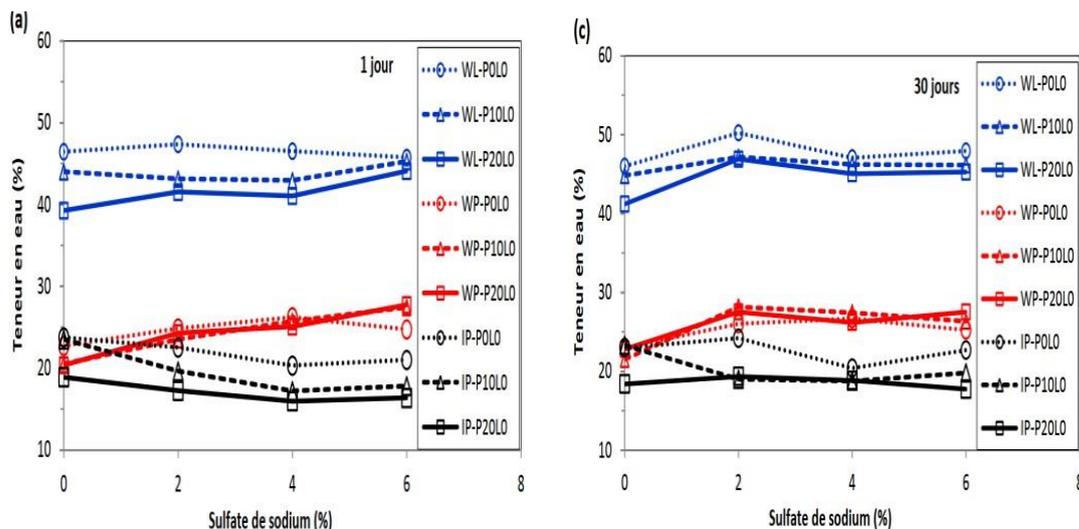
#### 2.5.1.1 En absence d'éléments perturbateurs

Gadouri. (2017) a démontré que la limite de liquidité (WL) et de plasticité (WP) des deux sols argileux traités (sol gris et sol rouge) diminuent avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle (PN), mais elles semblent d'être constante avec la cure. Par exemple, l'ajout de 20% de PN au sol gris (SG) fait diminuer la limite de liquidité de 82,8% jusqu'à 67,3 et 66,7% après 1 et 30 jours de cure. Ainsi qu'Avec 10% de PN, la limite de plasticité du sol rouge (SR) diminue de 22,7% à 20,5 et 21,5% pour la même période de cure.

Pour l'indice de plasticité(IP) il y'a une diminution légère dans le des deux sols argileux (SR et SG). Par exemple, l'indice de plasticité du sol gris diminue de 50.5% jusqu'à 43.1 et 42.4% par l'addition de 20 % de pouzzolane naturelle après une période de cure de 1 et 30 jours.

#### 2.5.1.2 En présence d'éléments perturbateurs

Selon Gadouri. (2017), la limite de liquidité du sol gris traité par la pouzzolane naturelle augmente avec l'augmentation de la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et de la période de cure. Cependant, la variation de la limite de liquidité du sol rouge semble d'être constante quand la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  augmente alors qu'elle diminue légèrement avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle additionnée et augmente avec la période de cure (**Voir la figure 2.15**). De plus, la présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  augmente la limite de plasticité du sol rouge mais diminue Celle du sol gris. Les valeurs de la limite de plasticité du sol gris traité avec l'ajout de la pouzzolane naturelle en présence de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sont presque comparables à celles du même sol traité sans présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . En comparaison de l'indice de plasticité de mêmes sols argileux traité. L'indice de plasticité du sol gris n'est pas vraiment influencé par la présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Par contre, les valeurs de l'indice de plasticité du sol rouge sont nettement supérieures à celles dumême sol traité sans présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .



**Figure 2.15:** Effet de différentes teneurs en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé par l'utilisation de la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure. (Gadouri. 2017).

## 2.5.2 Effet de la pouzzolane naturelle sur le compactage

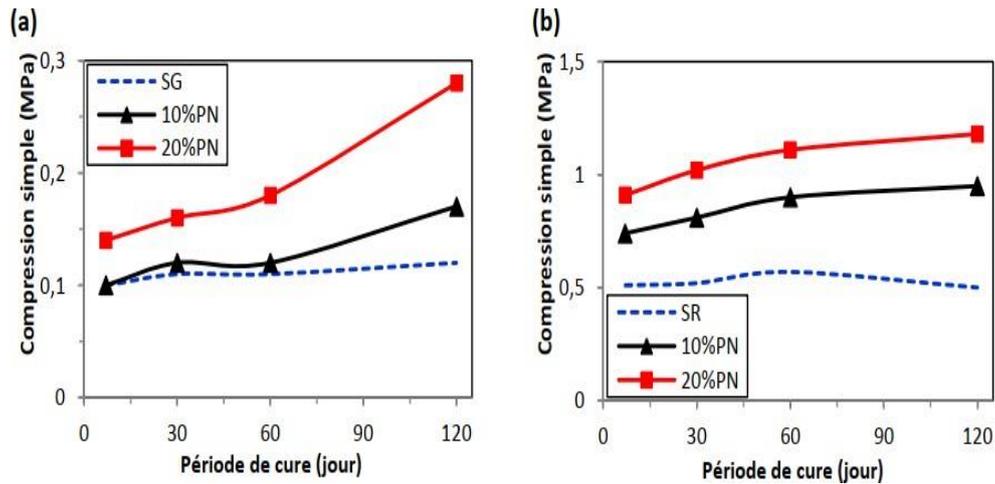
### 2.5.2.1 En absence d'éléments perturbateurs

Harichane et al. (2011a) ont étudié les caractéristiques de compactage de deux sols argileux, l'un très plastique et l'autre peu plastique, traités par l'ajout de 10 et 20% de pouzzolane naturelle. Les paramètres de compactage évoluent de la même manière dans les deux sols : une réduction légère de la teneur en eau optimale et également une augmentation de la densité sèche maximale avec l'addition de pouzzolane. Zoubir. (2009) a aussi observé la diminution de la teneur en eau optimale avec les mêmes proportions en pouzzolane, mais toutefois n'a pas remarqué de variation sur la densité sèche maximale.

## 2.5.3 Effet de la pouzzolane naturelle sur la compression

### 2.5.3.1 En absence d'éléments perturbateurs

Gadouri. (2017) a démontré que la résistance à la compression des échantillons du sol argileux traités (sol rouge et sol gris) augmente avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle ajoutée et de la période de cure (Voir la figure 2.16). Malgré cette augmentation, il n'y a pas d'influence notable sur la résistance à la compression lorsque la pouzzolane naturelle est utilisée seule en raison de sa faible réactivité avec les particules d'argile. Par conséquent, il n'est donc pas préférable d'utiliser la pouzzolane naturelle seule dans la stabilisation des sols argileux.

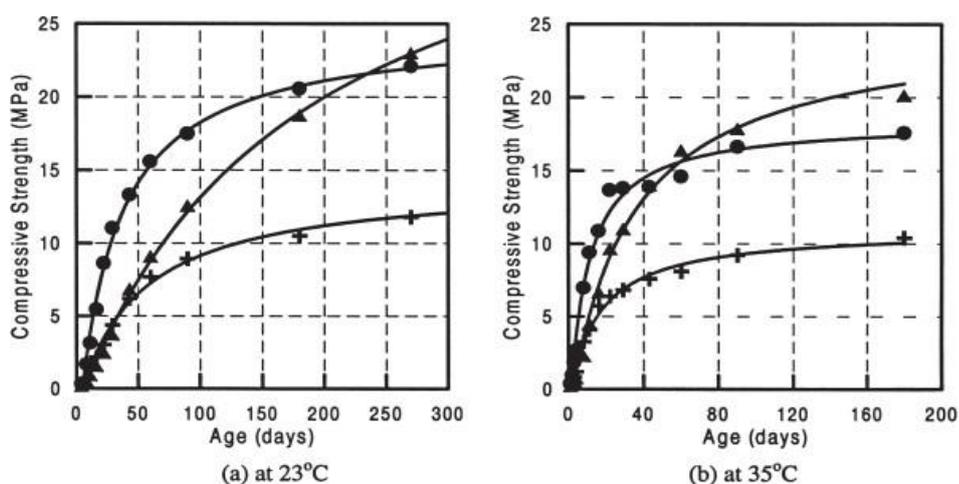


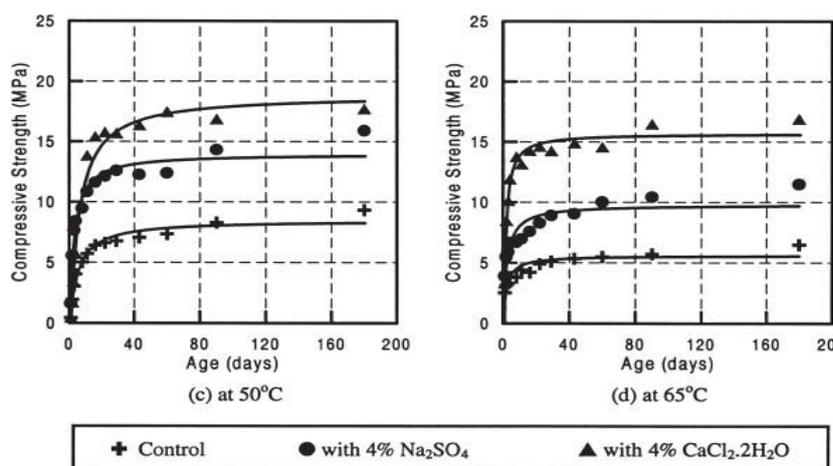
**Figure 2.16:** Effet de différents pourcentages de pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a) : sol gris, (b) : sol rouge. (Gadouri.2017).

### 2.5.3.2 En présence d'éléments perturbateurs

Shiet Day. (2000a) ont étudié les effets du  $\text{CaCl}_2$  et  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur le développement de la résistance, les résultats trouvés montrent que l'ajout de 4% de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  a diminué la résistance initiale mais augmente la résistance ultérieure à 23 ° C, et augmente la résistance initiale et ultérieure de 35 ° C à 65 ° L'addition de 4% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  augmente à la fois la résistance initiale et ultérieure des pates chaux-pouzzolane de 23 ° C à 65 ° C

(Voir la figure 2.17).





**Figure 2.17:** Le développement de la résistance des pâtes chaux -pouzzolane durcies à différentes températures. (Shiet Day. 2000a)

## 2.5.4 Effet de la pouzzolane naturelle sur la résistance au cisaillement

### 2.5.4.1 En absence d'éléments perturbateurs

Gadouri. (2017) a étudié l'effet de la pouzzolane naturelle sur les caractéristiques de résistance au cisaillement de deux sols argileux (sol gris et sol rouge). Les résultats trouvés indiquent que la cohésion et l'angle de frottement interne provoquent un effet marginal même avec la période de cure. La pouzzolane naturelle se comporte comme un sol naturel en absence d'un élément activateur des réactions pouzzolaniques. Cependant, la pouzzolane naturelle n'est pas recommandée d'être utilisée toute seule tant que stabilisant.

### 2.5.4.2 En présence d'éléments perturbateurs

Gadouri. (2017) a constaté une augmentation significative de la variation temporelle de la cohésion de deux sols argileux (SR et SG) et notamment avec la période de cure. Cependant, à très court terme, la cohésion des deux sols argileux augmente avec l'augmentation de la teneur en CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O et de la période de cure. Pour une faible teneur en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (2%), la pouzzolane naturelle ne fait provoquer qu'un effet négligeable sur la résistance au cisaillement même avec la durée de cure. Il est à constater que la résistance au cisaillement diminue avec l'augmentation de la teneur en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à l'exception du cas du sol rouge où tous les échantillons traités ont été complètement altérés après les périodes de cures de 30 et 60 jours en présence de 4 et 6% du Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

## 2.6 Effet de la fumée de silice sur les propriétés des sols instables

### 2.6.1 Effet de la fumée de silice sur la plasticité

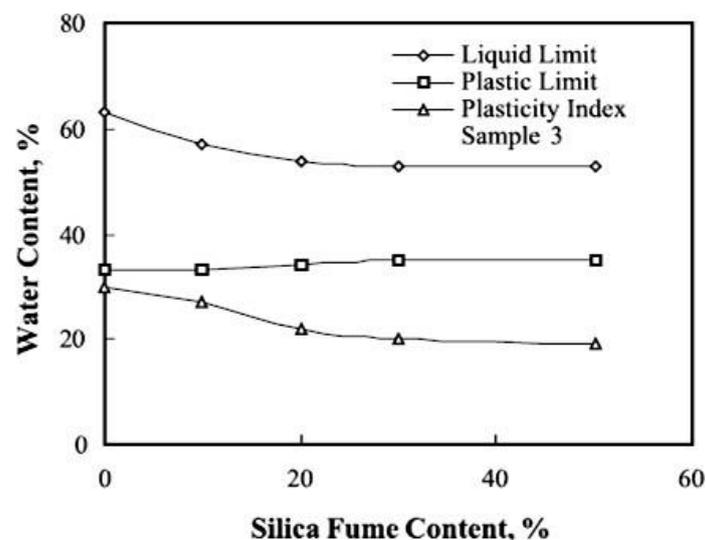
#### 2.6.1.1 En absence d'éléments perturbateurs

Negi et al. (2013) ont constaté que la limite de liquidité et l'indice de plasticité augmentent par l'addition de la fumée de silice. Par contre, la limite de plasticité diminue comme résumé dans (Tableau 2.12).

**Tableau 2.12:** Effet de la fumée de silice sur les limites d'Atterberg (Negi et al.2013).

Fs (%)	0	5	10	15	20
LL (%)	53.00	54.00	55.00	56.00	57.00
PL (%)	27.52	27.07	27.29	26.27	26.29
PI (%)	25.48	26.93	27.71	29.73	30.71

Un comportement différent a été observé par Kalkan and Akbulut. (2004) qui ont trouvé que l'ajout de la fumée de silice améliore l'ouvrabilité des sols argileux en diminuant l'indice de plasticité (Voir la figure 2.19). Ces résultats pourraient être expliquée selon le type de sol, les cations échangeables associés et la nature peut plastique des fumées de silice.



**Figure 2.18:** Influence de la teneur en fumée de silice sur les indices de consistance des argiles (Kalkan and Akbulut. 2004).

## 2.6.2 Effet de la fumée de silice sur le compactage

### 2.6.2.1 En absence d'éléments perturbateurs

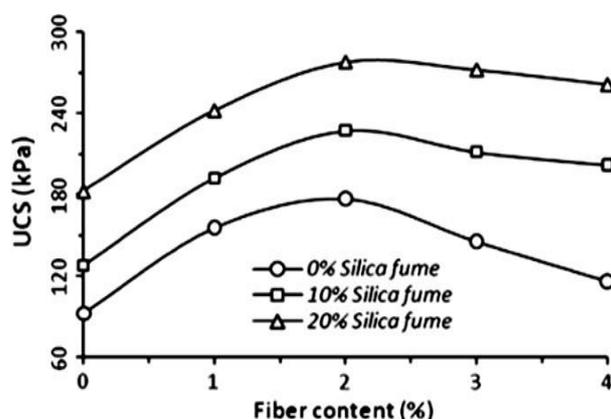
D'après [Bharadwaj and Trivedi. \(2016\)](#), la densité sèche maximale diminue et la teneur en eau optimale augmente en fonction du dosage de la fumée de silice (**Tableau 2.13**).

**Tableau 2.13:** Effet de la fumée de silice sur le compactage ([Bharadwaj and Trivedi. 2016](#)).

F <sub>s</sub> (%)	0	5	10	15
$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	16.43	16.30	16.10	15.90
w <sub>opt</sub> (%)	18.00	19.00	22.00	24.00

## 2.6.3 Effet de la fumée de silice sur la compression

[Kalkan. \(2013\)](#) a montré que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la concentration de la fumée de silice (**Voir la figure 2.19**).



**Figure 2.19:** Effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression ([Kalkan. 2013](#)).

[Kalkan. \(2009\)](#) a observé que l'addition de la fumée de silice modifie la composition, la minéralogie et la distribution granulométrique, ainsi que les résistances à la compression non confinées des sols stabilisés. De ce fait, les échantillons de sol stabilisés ont montré une résistance à la compression élevée. L'augmentation de la résistance à la compression est attribuée au frottement interne des particules de la fumée de silice et à la réaction chimique entre la fumée de silice et le sol traité. Les mêmes observations ont été rapportées par [Negi et al. \(2013\)](#) et [Thakare and Chauhan. \(2016\)](#) comme montré dans (**Tableau 2.14**).

**Tableau 2.14:** Effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression (Thakare and Chauhan, 2016).

Mélange	durée de cure	Résistance (kPa)
Sol+0% Fs	0	114.00
Sol+5% Fs	0	261.38
	7	270.63
	14	309.30
	21	347.98
	28	403.04

## 2.7 Conclusion

Le nombre importants de travaux de recherches bibliographiques présentés ci- dessus a pour but d'étudier l'effet des éléments perturbateurs (en particulier les sulfates, les chlorures) sur le traitement des sols instables en utilisant des additifs minéraux (chaux, ciment, pouzzolane naturelle, cendres volantes, fumée de silice...etc.). Ces ajouts minéraux améliorent les propriétés physiques des sols comme les paramètres de plasticité, de compactage et surtout les propriétés mécaniques telles que les paramètres de la résistance à la compression et le cisaillement. Cette amélioration est variable selon plusieurs facteurs tels que la nature et le type du sol, la nature chimique du liant et de l'élément perturbateur, ainsi que le dosage de stabilisateur et les conditions de cure (température, humidité).

Cette revue bibliographique nous a permis aussi d'étudier la durée de cure et son effet dominant sur les caractéristiques physiques et mécaniques des sols instables traités aux différents ajouts minéraux.

# Chapitre 3

---

---

## Etude Expérimentale

- 3.1** *Introduction*
- 3.2** *Lieu de prélèvement*
- 3.3** *Déroulement des essais*
- 3.4** *Propriétés étudiées*
- 3.5** *Conclusion*

### 3.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter l'étude expérimentale qui se rapporte à connaître et évaluer des effets apportés des chlorures sur la plasticité (limites d'Atterberg) et le compactage d'un sol argileux (densité sèche maximal, teneur en eau optimal), des sols fins Argileux de la région de Chlef stabilisé à la chaux en tant qu'un additif minéral.

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

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

### 3.2 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 (voir la figure 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 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 (voir les figures 3.2 et 3.3).

### 3.2.2 Identification et caractérisation du sol

Le tableau 3.1 résume les caractéristiques physico-mécaniques des sols fins utilisés ainsi que leur classification déterminée selon les normes françaises (NF EN 196-2., 2013) comme montrées dans (Tableau 3.1).



(a)



(b)

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



(a)



(b)

**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)

**Tableau 3.1:** Caractéristiques physico-mécaniques du sol. (Harichane et al. 2011a).

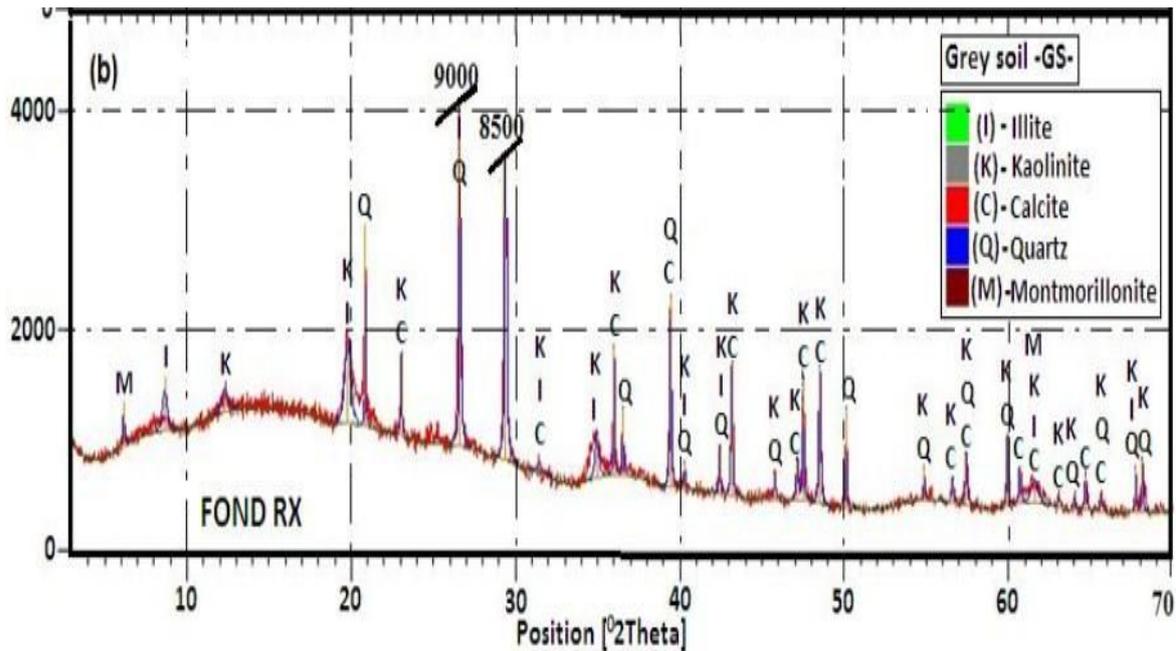
Caractéristiques de base	sol gris (SG)
Teneur en eau naturelle (%)	32.9
Densité spécifique	2.71
Eléments passant au tamis 80 $\mu$ m (%)	85
Limite de liquidité (%)	82.8
Limite de plasticité (%)	32.2
Indice de plasticité (%)	50.6
Classification (USCS)	CH
Teneur en eau optimale (%)	28.3
Densité sèche maximale (KN/m <sup>3</sup> )	13.8
Résistance à la compression non confinée	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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.56
Alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14, 15
Silice	SiO <sub>2</sub>	43, 67
Sulfite	SO <sub>3</sub>	0.04
Chlorure	Cl	0, 14
Potentiel d'hydrogène	pH	9, 18
Oxyde de sodium	Na <sub>2</sub> O	0, 34
Oxyde de potassium	K <sub>2</sub> O	1, 96
Dioxyde de titan	TiO <sub>2</sub>	0, 65
Phosphore	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0, 18

**Tableau 3.3:** Propriétés minéralogiques des sols étudiés. (Harichane et al. 2011a).

Nom minéralogique	Formule chimique	SG (%)
Quartz	SiO <sub>2</sub>	20
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	26
Albite	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	-
Illite	2K <sub>2</sub> O. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .24SiO <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	16
Kaolinite	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	12
Montmorillonite	Al <sub>2</sub> ((Si <sub>4</sub> Al) O10) (OH) <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	20
Chlorite	Mg <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> O <sub>18</sub> Si <sub>3</sub>	-
Minéraux ferrugineux et	-	6



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

### 3.3 La chaux

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 ( $\text{CaCO}_3$ ) 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 ( $\text{CaO}$ ) (**Voir la figure.3.5**). La chaux éteinte ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) 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.

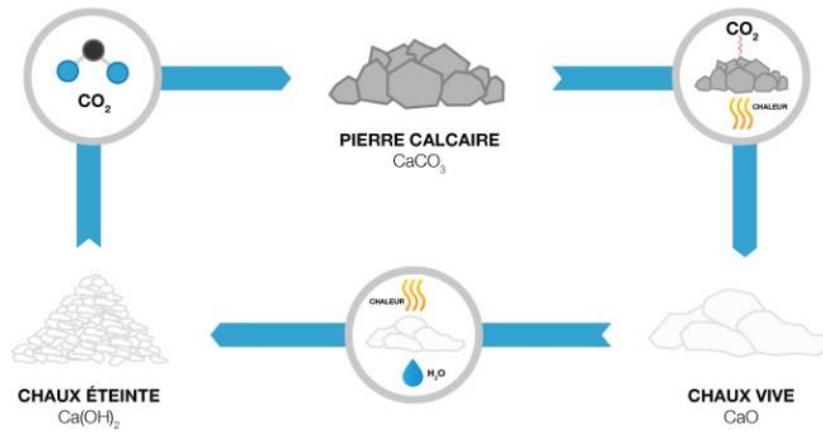


Figure 3.5: Cycle de production de la chaux

### 3.3.1 Chaux utilisée

La chaux utilisée dans cette étude est une chaux vive produite par la société BMSD-SARL située dans la ville de Saïda (Sud-ouest du territoire national) (voir la figure 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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 1.5
SiO <sub>2</sub>	< 2.5
SO <sub>3</sub>	< 0.5
Na <sub>2</sub> O	0.4 - 0.5
K <sub>2</sub> O	-
CO <sub>2</sub>	< 5
TiO <sub>2</sub>	-
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-

CaCO <sub>3</sub>	< 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	-

### 3.3.2 Produits chimiques

Dans cette étude deux produits chimiques sont utilisés (éléments perturbateurs du traitement) (Voir la figure 3.7). Le premier est un chlorure de sodium (NaCl), Alors que l'autre est un chlorure de calcium anhydre (CaCl<sub>2</sub>). Les quantités prédéterminées de chacun de ces deux types de chlorures seront mélangées à sec avec le sol sélectionné sous forme d'une poudre fine. Les concentrations des chlorures choisies pour l'étude sont (2%, 4% et 6%). Les propriétés physico-chimiques de ces deux éléments chimiques sont représentées dans le tableau 3.5.



**Figure 3.7:** Les chlorures utilisés dans l'étude expérimentale : chlorure de sodium (NaCl)

**Tableau 3.5:** Caractéristiques physico-chimiques des chlorures utilisées.

Propriétés	chlorure de sodium
Couleur	Blanche
Taille de particules	0/80 $\mu$ m
Formule chimique	NaCl
Masse molaire (g/mol)	58.44

### 3.4 Déroulement des essais

#### 3.4.1 Combinaison des échantillons

Les échantillons étudiées pour les essais des limites d'Atterberg et le proctor normal sont confectionnées à partir des différentes formulations de combinaisons sol-chaux et sont données dans le Tableau 3.6 et 3.7. (MC est un mélange de 75% de CaCl<sub>2</sub> et 25% de NaCl).

**Tableau 3.6:** Combinaisons des échantillons des sols stabilisés avec ou sans présence des chlorures pour les limites d'Atterberg et le compactage (en pourcentage)

Désignation	Sol (%)	Chaux (%)	Chlorure (%)	Références
<b>SC0NaCl0</b>	100	0	0	Gadouri et al. (2017)
<b>SC0NaCl2</b>	98	0	2	
<b>SC0NaCl4</b>	96	0	4	
<b>SC0NaCl6</b>	94	0	6	Présente étude
<b>SC4NaCl0</b>	96	4	0	
<b>SC4NaCl2</b>	94	4	2	
<b>SC4NaCl4</b>	92	4	4	
<b>SC4NaCl6</b>	90	4	6	
<b>SC8NaCl0</b>	92	8	0	
<b>SC8NaCl2</b>	90	8	2	
<b>SC8NaCl4</b>	88	8	4	
<b>SC8NaCl6</b>	86	8	6	

## 3.5 Propriétés étudiées

### 3.5.1 Limites d'Atterberg

#### 3.5.1.1 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 (NF EN 196-2., 2013) Les sols séchés à l'air (passant au tamis 400 $\mu$ m). D'abord, on mélange la quantité de sol avec la quantité prédéterminée de chlorure et de chaux ou la combinaison des deux dans un état sec (**Tableau 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 chlorures 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 chlorure de sodium ou de calcium 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 chlorure de sodium et de calcium 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 3.7:** Quantités des sols et des additifs utilisés avec ou sans présence des chlorures pour les limites d'Atterberg.

Désignation	Sol(g)	Chaux(g)	Chlorure(g)	Références
SC0NaCl0	300	0	0	Gadouri et al. (2017)
SC0NaCl2	294	0	6	
SC0NaCl4	288	0	12	
SC0NaCl6	282	0	18	Présente étude
SC4NaCl0	288	12	0	
SC4NaCl2	282	12	6	
SC4NaCl4	276	12	12	
SC4NaCl6	270	12	18	
SC8NaCl0	276	24	0	
SC8NaCl2	270	24	6	
SC8NaCl4	264	24	12	
SC8NaCl6	258	24	18	

### 3.5.1.2 Détermination de la limite de liquidité

La totalité du matériau sera malaxée afin d'obtenir une pâte homogène. Après chaque période de cure 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 10 mm. L'opération complète sera effectuée au moins quatre fois sur la même pâte mais avec une teneur en eau différente à chaque fois. L'essai ne sera poursuivi que lorsque NC est compris entre 15 et 35. Les nombres de chocs de la série d'essais doivent encadrer 25 et l'écart entre deux valeurs consécutives doit être inférieur ou égale à 10. Enfin, on prélève à partir de la coupelle à l'aide d'une spatule, environ 5 g de pâte, de chaque côté des lèvres de la rainure pour en déterminer la teneur en eau par dessiccation à l'étuve. La limite de liquidité (WL) est la teneur en eau du matériau qui correspond conventionnellement à une fermeture sur 13 mm des lèvres de la rainure après 25 chocs (**voir la figure 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.



(a)

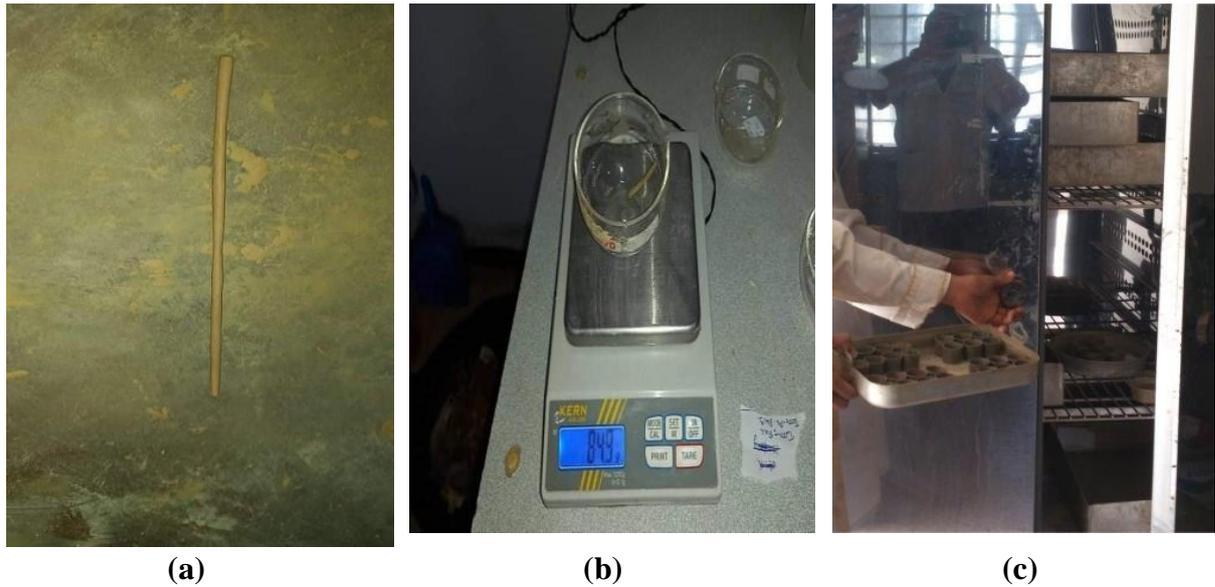
(b)

(c)

**Figure 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 lèvres à 13mm, (c) : prélèvement d'échantillon et dessiccation à l'étuve.

### 3.5.1.3 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 (**voir la figure 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 3.9:** 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.

#### 3.5.1.4 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.

$$IP = WL - WP. \quad (\text{Eq 3.1})$$

### 3.5.2 Compactage (Proctor Normal)

#### 3.5.2.1 Principe de l'essai Proctor

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 ([NF EN 196-2., 2013](#)). Et les quantités des matériaux utilisés sont résumées dans le Tableau 3.8.

**Tableau 3.8:** Quantités des sols et des additifs utilisés avec ou sans présence des chlorures pour l'essai de compactage.

Désignation	Sol(g)	Chaux(g)	Chlorure(g)	Références
SC0NaCl0	1800	0	0	Gadouri et al. (2019)
SC0NaCl2	1764	0	36	
SC0NaCl4	1728	0	72	
SC0NaCl6	1692	0	108	Présente étude
SC4NaCl0	1728	72	0	
SC4NaCl2	1692	72	36	
SC4NaCl4	1656	72	72	
SC4NaCl6	1620	72	108	
SC8NaCl0	1656	144	0	
SC8NaCl2	1624	144	32	
SC8NaCl4	1584	144	72	
SC8NaCl4	1584	144	72	
SC8NaCl6	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 0/1 mm. L'échantillon sec réduit est répandu dans un bac, homogénéisé et divisé en cinq parts aussi semblables que possible. Chacune de ces parts est ensuite humidifiée en introduisant la quantité d'eau voulue, à l'aide d'un pulvérisateur, tout en maintenant le malaxage (**Voir la figure 3.10**). 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 chlorure) sont introduits dans des sachets et en les conservant pendant une heure avant l'exécution de l'essai de compactage.

**Figure 3.10:** 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 (**Voir la figure.3.11**).



**Figure 3.11:** 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.

### 3.5.2.2 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.

$$\gamma_{dmax} = \frac{p_s}{v} \quad (\text{Eq3.2})$$

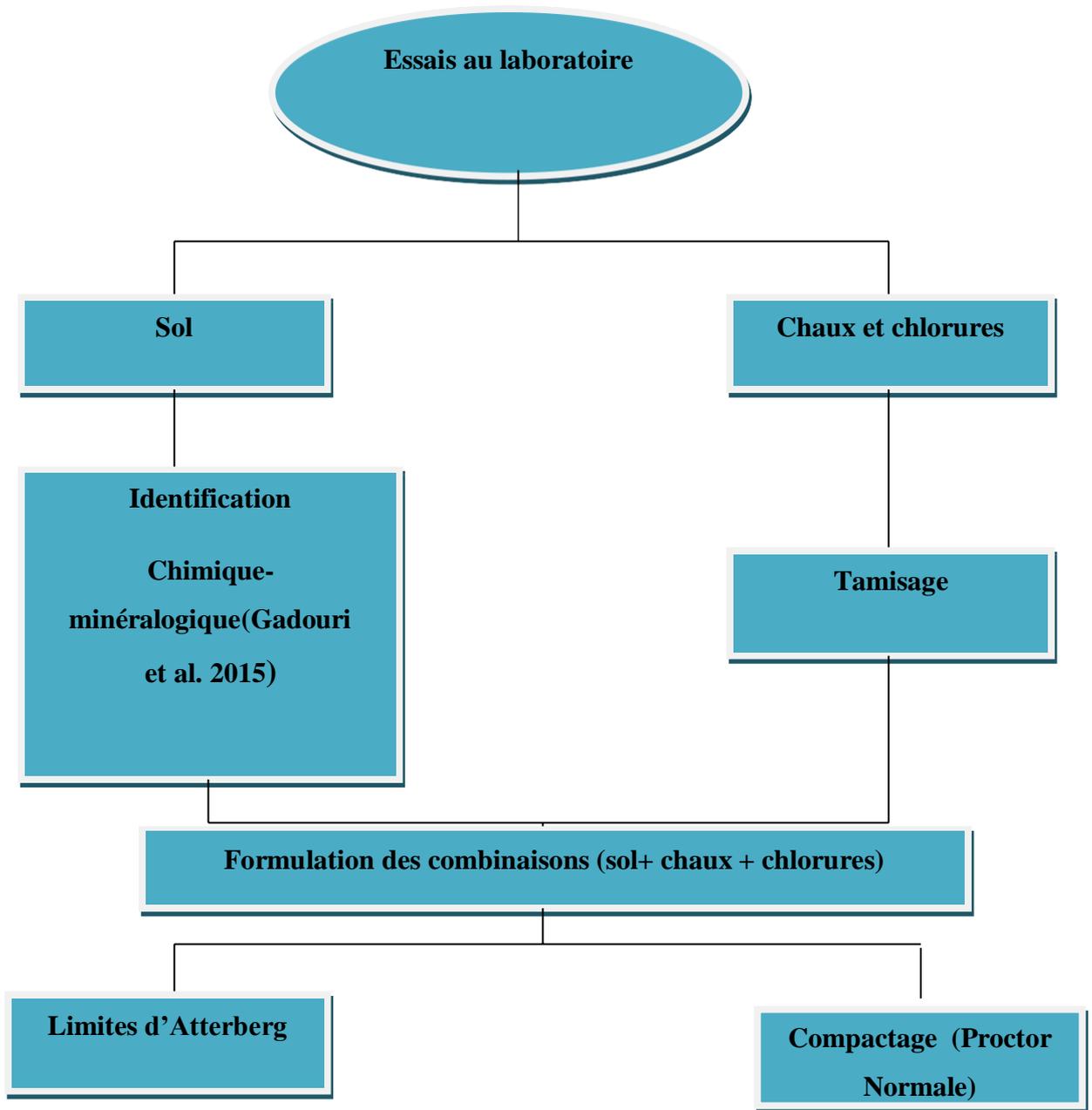
### 3.5.2.3 Détermination de la teneur en eau

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.

$$w_{opt} = \frac{p_w}{p_s} \quad (\text{Eq3.3})$$

**B Programme expérimental prévu**

Tous les essais sont réalisés suivant l’organigramme de la **Figure 3.12**



**Figure 3.12:** Organigramme des essais effectués au laboratoire

### 3.6 Conclusion

L'étude expérimentale de cette recherche vise à évaluer l'efficacité du traitement à la chaux et au chlorure de sodium d'un type de sol (argile gris) de Haouche El-Ghaba près de la ville de Chlef, et pour cela, une série de tests ont été programmé pour réaliser ce traitement.

Cette étude nous permet de connaître l'effet de la chaux et les chlorures de sodium sur le sol traité par les limites d'Atterberg, les caractéristiques de compactage au Proctor normale ( $W_{opt}$  et  $\gamma_{d_{max}}$ ) pour les sols traités de différents pourcentages de la chaux (0, 2, 4, et 8%) et de chlorures (0%, 2%, 4% et 6%).

A la fin de cette étude on a obtenus des résultats qu'on va les analyser et l'interpréter dans le prochain chapitre.

# Chapitre 4

---

---

## *Analyse et Interprétation des Résultats*

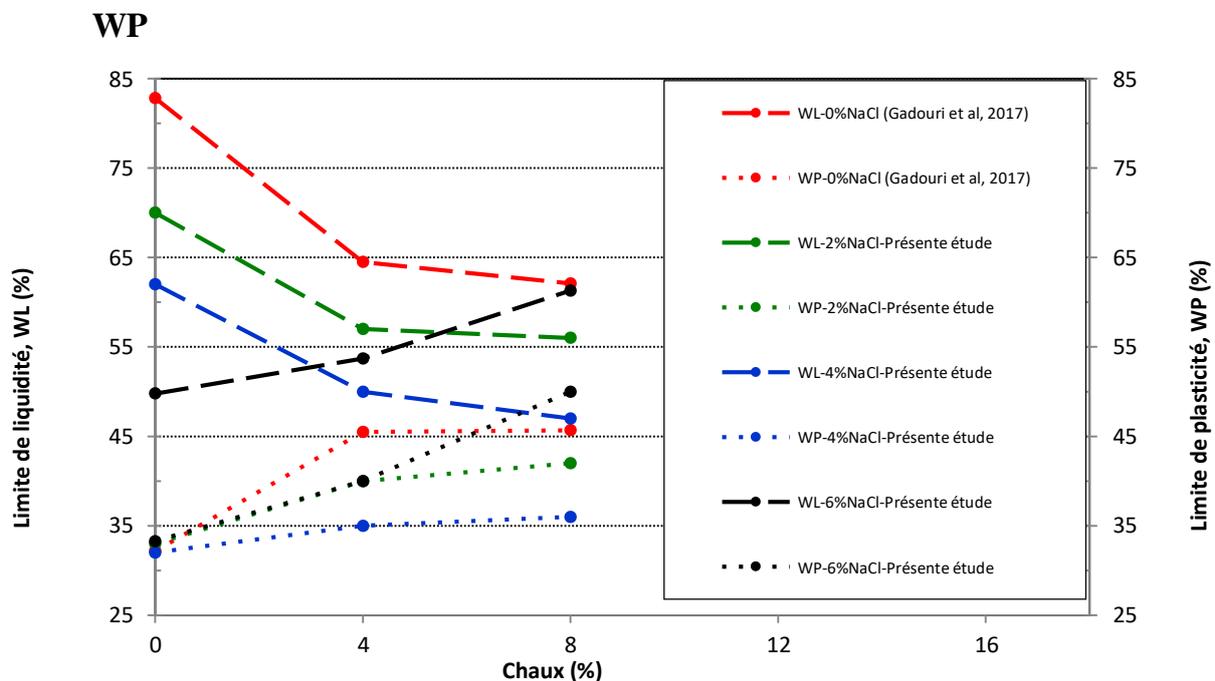
- 4.1** *Introduction*
- 4.2** *L'effet de la chaux sur les limites d'Atterberg*
- 4.3** *L'effet de la chaux sur le Compactage*
- 4.4** *L'effet des chlorures de sodium sur les limites d'Atterberg*
- 4.5** *L'effet des chlorures de sodium sur le compactage*
- 4.6** *Effet de NaCl et de la chaux sur la classification du sol traité*
- 4.7** *Conclusion*

## 4.1 Introduction

Ce chapitre a pour but d'analyser et d'interpréter les résultats obtenus à partir de l'étude expérimentale qui se rapporte à connaître et à évaluer les effets apportés par l'addition de différents pourcentages des chlorures de sodium (NaCl) sur la plasticité (Limites d'Atterberg) et le compactage d'un sol argileux (Proctor normal) d'un sol gris fin stabilisé avec plusieurs teneurs en chaux.

## 4.2 L'effet de la chaux sur les limites d'Atterberg

### 4.2.1 L'effet de la chaux sur la limite de liquidité WL et la limite de plasticité WP



**Figure 4.1:** L'effet de la chaux sur la WL et la WP d'un sol gris fin stabilisé à la chaux (Voir Annexe A.1).

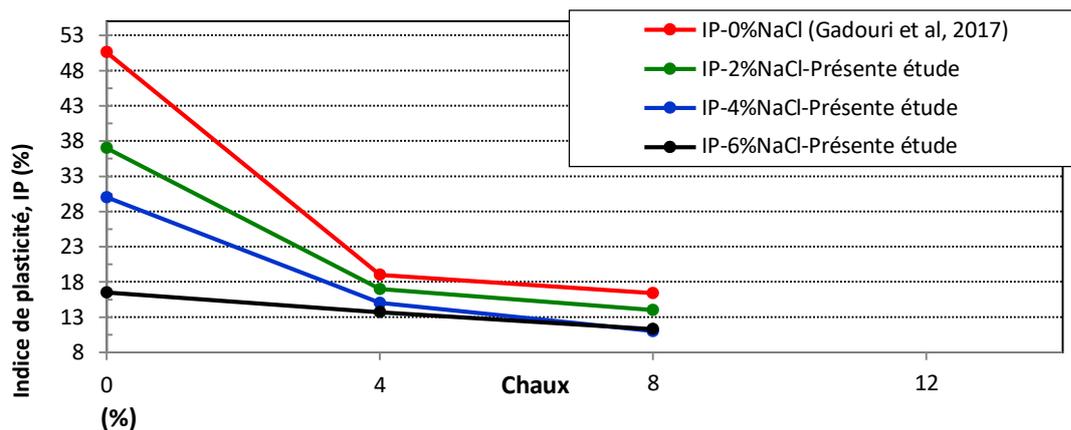
La figure 4.1 représente l'influence de l'addition de différents pourcentages de chaux sur la limite de liquidité et de plasticité du sol gris stabilisé. Nous constatons clairement que la limite de liquidité diminue significativement avec l'augmentation de la teneur en chaux. La diminution de la  $W_L$  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 (Goswami and Singh, 2005). Par ailleurs, Miller and Azad (2000) ont rapporté que la diminution de la  $W_L$  avec l'augmentation de la teneur en chaux utilisée est plus prononcée pour les argiles à cations de valence inférieure telle que l'ion  $Na^+$ . Il est à noter également que l'effet de la chaux (4 et 8%)

Il est à noter que la réduction des valeurs de la WL est presque négligeable si on passe de 4 à 8% de chaux 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.

D'autre part, on observe clairement une augmentation considérable de la limite de plasticité (WP) avec l'augmentation de la teneur en chaux utilisée (entre 0 et 4%) mais si on passe au-delà de 4%, l'augmentation semble d'être constante et, cela a été marqué soit en absence et soit en présence de 2 et 4% de NaCl. Pour une même classe de sol, [Nalbantoglu \(2006\)](#) a observé que la WP augmente de 22.2% à 37.5% pour l'addition de 7% de chaux. Un comportement similaire a été observé par [Rahman \(1986\)](#). Il est connu que l'utilisation de la chaux conduit à la floculation des particules d'argiles en provoquant une augmentation immédiate de la  $W_p$ . En outre, l'augmentation de la  $W_p$  provoque une diminution des propriétés plastiques du sol stabilisé en raison de l'altération du film d'eau entourant les minéraux d'argile dans le sol ([Osula, 1991](#)). Alors qu'on présence de 6% de NaCl une augmentation considérable a été accordée. Il est à constater aussi que la présence de 6% de NaCl fait accélérer l'augmentation de la WP est notamment avec l'addition de 8% de chaux.

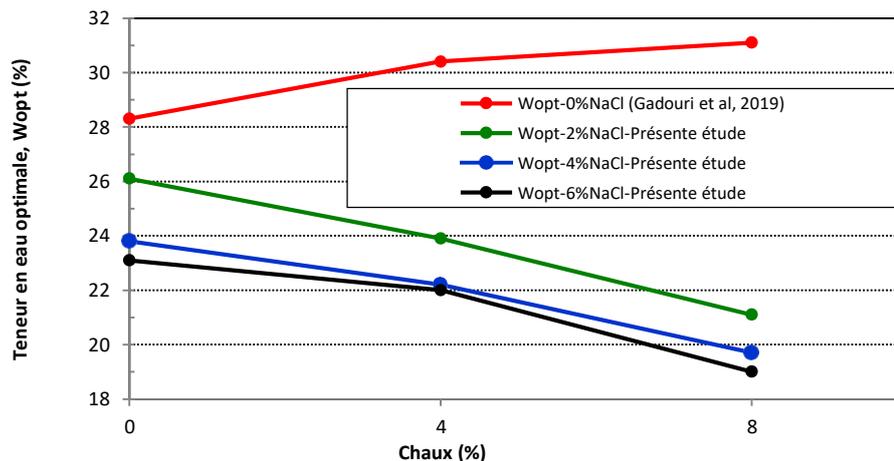
#### 4.2.2 L'effet de la chaux sur l'indice de plasticité

Les résultats de l'influence de la chaux sur l'indice de plasticité du sol gris traité sont présentés dans la figure 4.2. D'abord, une diminution importante de l'indice de plasticité a été observée si on fait augmenter le pourcentage de la chaux de 0 et 4 % et cela pour le sol naturel et également s'il contient de 2 ou 4 % de chlorure de sodium. Il est évident que l'addition d'une faible teneur en chaux est suffisante pour améliorer l'ouvrabilité du sol stabilisé. Un comportement similaire a été observé par plusieurs chercheurs pour une même classe de sol ([Nalbantoglu, 2006](#) ; [Harichane et al. 2011a](#)). Cela peut être attribuée à des réactions chimiques entre la chaux et le sol, y compris l'échange d'ions et des réactions de floculation associées ([Puppala et al. 2006](#)). Cependant, au-delà de 4% de chaux, nous constatons une diminution presque négligeable de 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.

**Figure 4.2 :** Effet de la chaux sur l'indice de plasticité d'un sol gris fin (Annexe A.2)

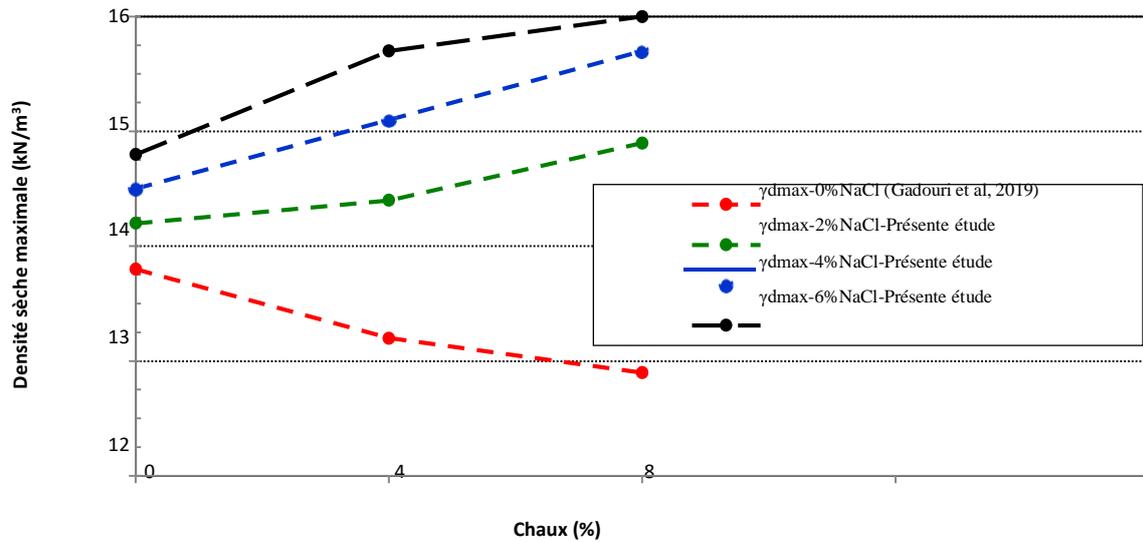
### 4.3 L'effet de la chaux sur le compactage (teneur en eau et densité sèche)

#### 4.3.1 L'effet de la chaux sur la teneur en eau optimal

**Figure 4.3:** Effet de la chaux sur la teneur en eau optimale du sol gris fin stabilisé (Annexe B.1)

La figure 4.3 représente l'influence de l'addition de différents pourcentages de chaux sur teneur en eau optimale (Wopt) du sol gris stabilisé. En absence de chlorure de sodium, en constatant clairement qui a une augmentation de la teneur en eau optimale en parallèle avec l'augmentation du pourcentage en chaux additionnée. Alors qu'un un comportement inverse a été constaté où la teneur en eau optimale diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux et cela quelque soit le pourcentage des chlorures de sodium utilisés. Cette diminution pourrait être due à la réaction d'échange de cations qui a provoqué la floculation des fractions argileuses du sol (Kinuthia et al 1999). D'autre part, Il est proposé qu'avec l'augmentation de la concentration en NaCl, l'occupation du volume solide a augmenté en diminuant par conséquent la teneur en eau.

### 4.3.2 L'effet de la chaux sur la densité sèche maximal

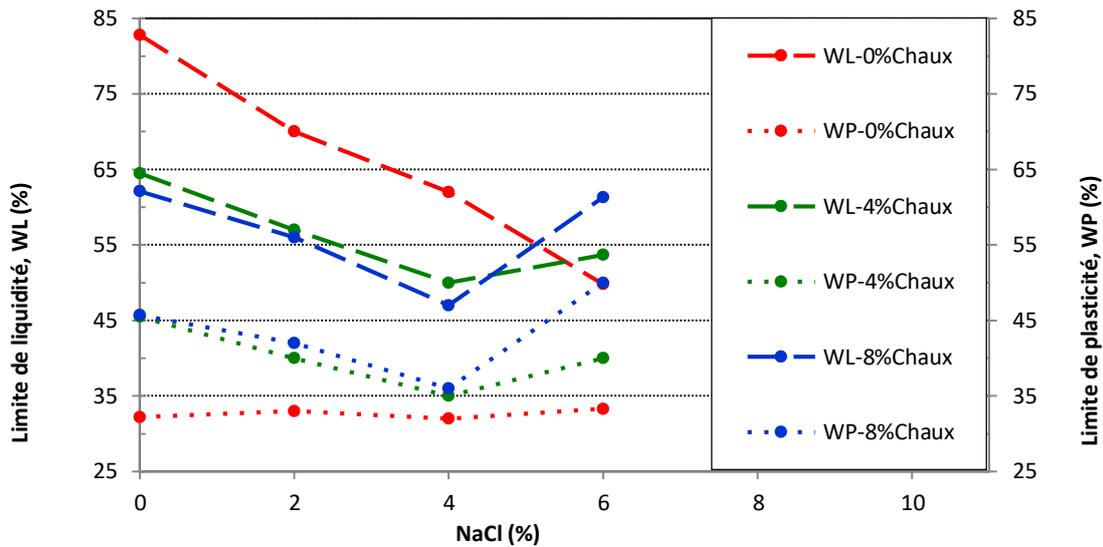


**Figure 4.4 :** L'effet de la chaux sur la teneur en eau optimal (Annexe B.2)

La figure 4.4 montre l'influence de l'addition de différents pourcentages de chaux sur la densité sèche maximale du sol gris stabilisé. Nous constatons clairement que la densité sèche maximale diminue significativement avec l'augmentation de la teneur en chaux et cela a été marqué en absence de NaCl (chlorure de sodium). Dans le cas de la présence de NaCl, il est suggéré qu'en ajoutant du NaCl au fluide interstitiel des échantillons du sol gris stabilisé, l'épaisseur de la double couche électrique diffuse diminuait, ce qui emballait mieux les particules d'argile, par conséquent la densité sèche augmentait. Alors qu'on présence de 2, 4 et 6% de NaCl, une augmentation considérable a été observée pour cette dernière avec l'augmentation du pourcentage de la chaux. Il s'est avéré que le NaCl a présenté la capacité de diminuer l'épaisseur de la double couche diffuse qui tasse mieux les particules d'argile ce qui nous conduire à constater à la fois que les cations monovalents ( $\text{Na}^+$ ) ont l'aptitude de faire agglomérer les particules d'argiles et surtout avec une forte concentration en  $\text{Na}^+$ .

## 4.4 L'effet de NaCl sur les limites d'Atterberg

### 4.4.1 L'effet de NaCl sur la limite de liquidité WL et la limite de plasticité WP



**Figure 4.5 :** L'effet de chlorure de sodium sur WL et WP (Voir Annexe C.1)

La figure 4.5 représente l'influence de l'addition de différents pourcentages de chlorure de sodium sur la limite de liquidité et de plasticité du sol gris stabilisé. En absence de NaCl, il est très clair de constater que la limite de liquidité du sol gris non traité diminue avec l'augmentation de la concentration en NaCl. Aussi, nous observons clairement que la limite de liquidité diminue significativement avec l'augmentation de la teneur en NaCl et cela en présence de 2% et 4% de NaCl. Mais si en allant au-delà de 4% de NaCl en présence de différents pourcentage de la chaux une augmentation de la limite de liquidité a été accordée.

Dans le cas de l'absence de chaux, nous observons une diminution considérable de la limite de plasticité avec l'augmentation de NaCl (de 2% à 4%) mais au-delà de 4% de NaCl, une augmentation de cette dernière a été marquée. En absence de chaux, il est très clair de constater que la limite de plasticité du sol gris non traité semble d'être constante malgré l'augmentation de la concentration en NaCl. Cet effet négligeable peut être attribué à l'absence d'autres éléments chimiques qui peuvent rentrer en interaction et/ou en réaction avec le NaCl ajouté. Il est à noter que, pour les deux limites de liquidité et de plasticité, l'optimum a été atteint pour 4% de NaCl et aucun optimum n'a été observé pour ces deux dernières en cas d'absence de chaux.

#### 4.4.2 L'effet de NaCl sur l'indice de plasticité

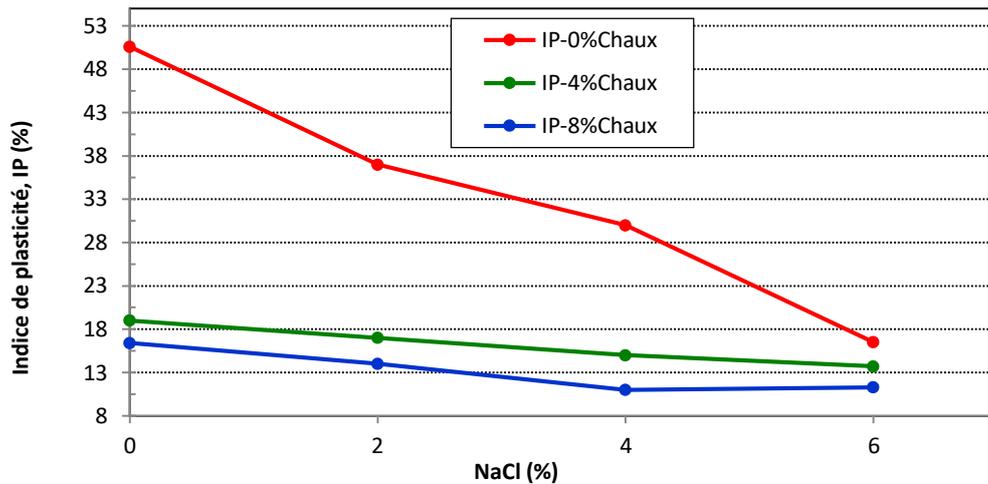


Figure 4.6 : L'effet de chlorure de sodium sur IP (Voir Annexe C.2)

Les résultats de l'influence de NaCl sur l'indice de plasticité du sol gris traité à la chaux sont présentés dans la figure 4.6. Une diminution considérable de l'indice de plasticité en parallèle avec l'augmentation du pourcentage de chlorure de sodium a été observée et cela en absence de la chaux.

Le même comportement a été accordé dans le cas de la présence de différent pourcentage de NaCl pour l'indice de plasticité mais avec une réduction assez faible et cela quel que soit le dosage en chaux additionné. De plus, il est à signaler que l'écart d'influence entre 4% et 8% de chaux est presque négligeable. Aussi, l'écart entre l'effet de NaCl ajouté tout seul et son effet en présence de chaux diminue si on fait augmenter la concentration en NaCl.

#### 4.5 L'effet des chlorures de sodium sur le compactage

##### 4.5.1 L'effet de NaCl sur la teneur en eau optimale

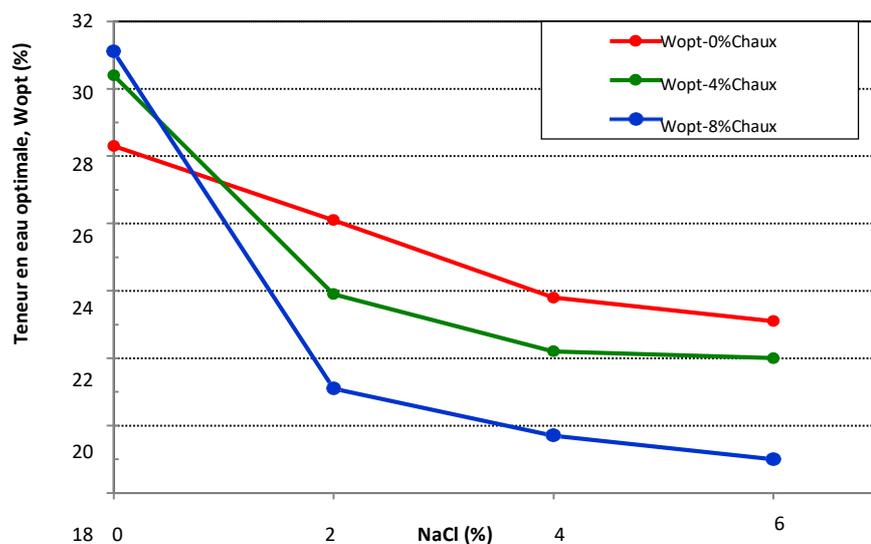
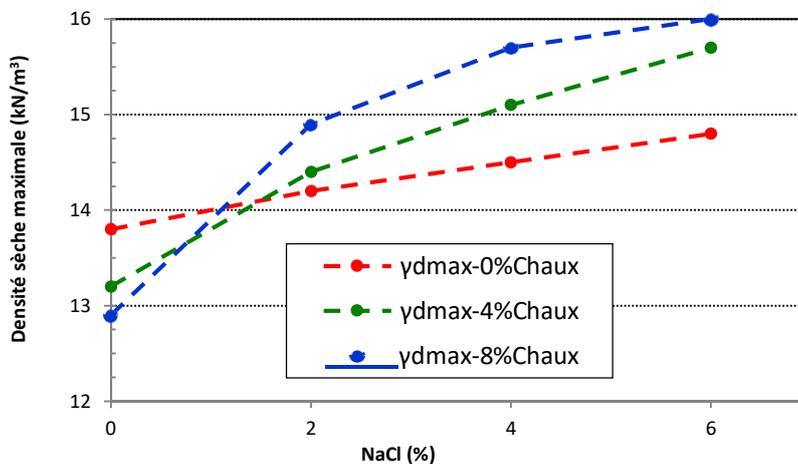


Figure 4.7: L'effet de chlorure de sodium sur la teneur en eau optimale du sol gris fin (Voir Annexe D.1).

La figure 4.7 représente l'influence de l'addition de différents pourcentages de chlorures de sodium sur teneur en eau optimale ( $W_{opt}$ ) du sol gris stabilisé. Une diminution importante de la teneur en eau optimale a été observée si on fait augmenter le pourcentage de chlorure de sodium de 2% à 6% et cela pour le sol traité ou non traité. Cependant, cette diminution est négligeable au-delà de 2% de NaCl. Dans le cas de l'absence de NaCl, la teneur en eau optimale du sol gris traité et non traité augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux additionnée alors qu'elle diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux en cas de présence de NaCl.

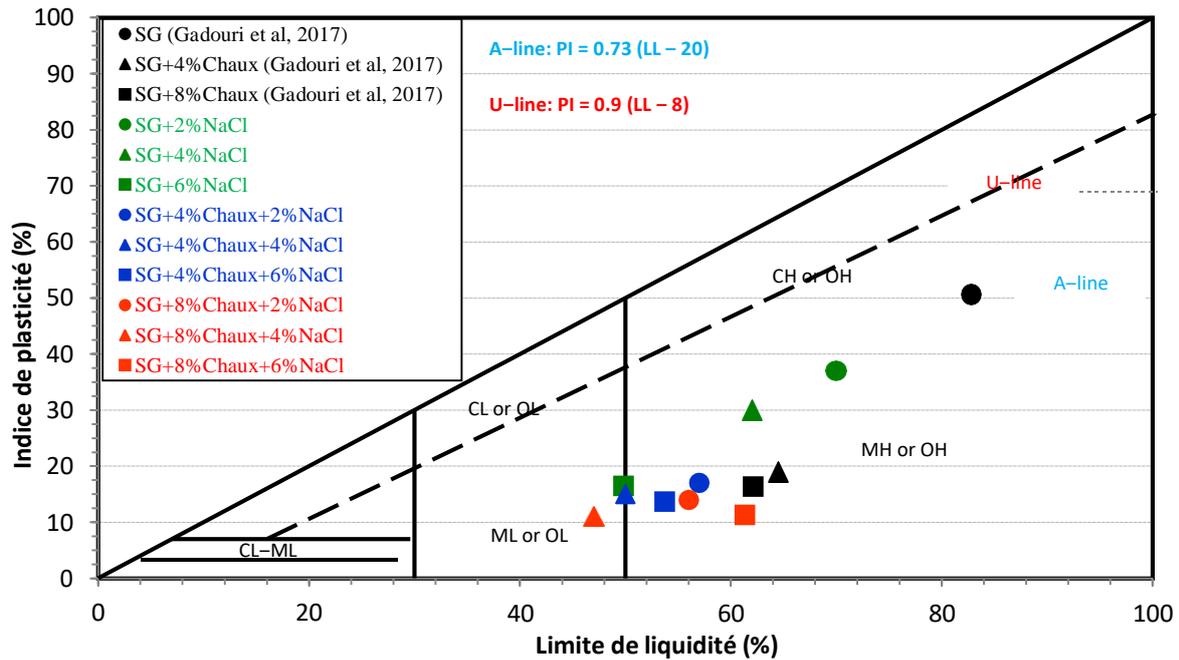
#### 4.5.2 L'effet de NaCl sur la densité sèche



**Figure 4.8 :** L'effet de chlorure de sodium sur la densité sèche maximale (Voir Annexe D.2)

La figure 4.8 montre l'influence de l'addition de différents pourcentages de NaCl sur la densité sèche maximale du sol gris stabilisé à la chaux. Nous constatons clairement que la densité sèche maximale augmente significativement avec l'augmentation de différents pourcentages des chlorures de sodium et notamment avec l'augmentation de la teneur en chaux ajoutée. A grosso modo, un comportement inverse a été observé pour la densité sèche maximale et cela par comparaison à l'effet du NaCl apporté sur la teneur en eau optimale.

#### 4.6 Effet de NaCl et de la chaux sur la classification du sol traité



**Figure 4.9:** Effet de Na Cl et de la chaux sur la classification du sol traité

En se basant sur la AFNOR, N. F. 1996., 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 NaCl 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 NaCl 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 NaCl, 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. la floculation des particules est le résultat de la réaction électrique entre le cation de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$  issu de la chaux) 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 réalisée sur l'effet de NaCl 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 NaCl. 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 WL 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 limite de liquidité est fortement dominée par les cations divalents  $\text{Ca}^{2+}$  que les cations monovalents ( $\text{Na}^+$ ) si la concentration en NaCl est supérieure à 4%.
- La chaux fait augmenter significativement la limite de plasticité du sol gris étudié avec et sans présence de NaCl. Alors qu'on présence de 6% de NaCl une augmentation considérable a été accordée.
- La présence de 6% de NaCl 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 NaCl.
- La chaux fait diminuer significativement l'indice de plasticité du sol gris étudié avec et sans présence de NaCl.
- 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 quelque soit le pourcentage des chlorures de sodium utilisés. 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 NaCl 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 Na Cl.
- Le NaCl a la capacité de diminuer l'épaisseur de la double couche diffuse qui fait tasser mieux les particules d'argile où les cations monovalents ( $\text{Na}^+$ ) ont l'aptitude de faire agglomérer les particules d'argiles et surtout avec une forte concentration en  $\text{Na}^+$  provenant de l'addition du NaCl.
- 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 NaCl 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 ( $\text{Ca}^{2+}$  issu de la chaux) 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

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

## **1. Conclusions générales**

Dans le premier chapitre, nous avons exposé les différentes caractéristiques des sols mous, et les principaux risques qui se manifestent par les sols médiocres. De plus, nous avons vu les méthodes les plus utilisés en pratique pour l'amélioration des sols, ainsi quelques types des sols pour lesquels elles sont adéquates.

La synthèse bibliographique dans le deuxième chapitre permet l'influence de certains additifs et compositions chimiques sur les différents types de sols.

Dans le chapitre trois nous avons présenté la région d'étude, les caractéristiques de notre sol et une étude expérimentale approfondie a été effectuée au niveau du Laboratoire de notre université afin d'évaluer quantitativement les effets apportés par la présence de différents teneurs en chaux en combinaison avec les chlorures de sodium.

Dans le chapitre quatre et à l'aide de l'étude en laboratoire réalisée sur l'effet de NaCl 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 NaCl. 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 limite de liquidité est fortement dominée par les cations divalents  $Ca^{2+}$  que les cations monovalents ( $Na^+$ ) si la concentration en NaCl est supérieure à 4%.
- La chaux fait augmenter significativement la limite de plasticité du sol gris étudié avec et sans présence de NaCl. Alors qu'on présence de 6% de NaCl une augmentation considérable a été accordée.
- La présence de 6% de NaCl 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 NaCl.
- La chaux fait diminuer significativement l'indice de plasticité du sol gris étudié avec et sans présence de NaCl.

- 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 des chlorures de sodium utilisés. 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 NaCl 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 Na Cl.
- Le NaCl a la capacité de diminuer l'épaisseur de la double couche diffuse qui fait tasser mieux les particules d'argile où les cations monovalents ( $\text{Na}^+$ ) ont l'aptitude de faire agglomérer les particules d'argiles et surtout avec une forte concentration en  $\text{Na}^+$  provenant de l'addition du NaCl.
- 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 NaCl 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 ( $\text{Ca}^{2+}$  issu de la chaux) 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 chlorures de sodium avec ou sans chaux en raison de son effet bénéfique sur notre type de sol. Et cela se traduit dans les résultats obtenus à partir des essais qui sont réalisés au niveau de laboratoire, et donc une modification du sol témoin.
- ✓ Puisque nous n'avons pas atteint l'optimum nous suggérons de poursuivre les expériences avec autre pourcentage déférente de la Chaux et Chlorure du sodium.
- ✓ Le traitement des sols par la méthode chimique évite beaucoup de difficultés qui sont :
  - Une diminution des couts
  - Respect de délai
  - Evite les pénalités

## **3. Perspectives**

- ✓ Pour les futures études, il sera important d'approfondir la recherche sur les effets qui peuvent être apportés par d'autre éléments perturbateurs (les sulfates, les phosphates, les nitrates...) sur les sols traités ou bien non traités.
- ✓ Il a été démontré que les chlorures de sodium fait améliorer considérablement les propriétés géotechniques (physico-mécaniques) des sols argileux stabilisés. Donc, il sera très utile d'élargir l'investigation sur d'autres types de sol

---

---

# **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

Afès, M. and Didier, G. (2000). *Stabilization of expansive soils: the case of clay in the area of Mila (Algeria)*. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 59, No. 1, pp. 75–83, doi: 10.1007/s100649900022.

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.

Al-Mukhtar, M., Khattab, S., and Alcover, J. F., (2012). *Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil*. *Engineering Geology*, 139, 17-27.

Al-Rawas, A.A. (1999). *The factors controlling the expansive nature of the soils and rocks of northern Oman*. *Engineering Geology*, Vol. 53, No. 3, pp. 327–350, doi : 10.1016/S0013-7952(98)00085-4.

*Annexes techniques, 101 p. Laboratoire central des ponts et chaussées, Parise et Service d'études techniques des routes et autoroutes, Bagneux (1992).*

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. and Bayat, M. (2015). *Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime*, *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 8, No. 3, pp. 1439–1452, doi: 10.1007/s12517-013-1173-1.

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.

Bharadwaj, S., and Trivedi, M. K., 2016. *Impact of Micro Silica Fume on Engineering Properties of Expansive Soil*. *International Journal of Science Technology & Engineering*, 2 (12), 435-440.

Bin-Shafique, S., Rahman, K., Yaykiran, M. and Azfar, I. (2010). *The long-term performance of two fly ash stabilized fine-grained soil subbases*. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 54, No. 10, pp. 666–672, doi: 10.1016/j.resconrec.2009.11.007.

Broms, B. and Boman, P. (1975). *Lime stabilized columns. Fifth Asian Regional Conference on SM and FE, Bangalore, India, Vol. 1, pp. 227–234.*

Brown, B. E., and Bailey, S. W., (1963), *Chlorite polytypism: II. Crystal structure of a one-layer Cr-chlorite, Note: variety called kammererite, American Mineralogist, Vol. 48, p. 42-61.*

Cabane, N. (2004). *Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, Université Jean Monnet.*

Debats, J.-M. (2012). *Descriptifs des procédés d'amélioration et renforcement de sol.* 28.

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.*

Eades, J.L., Nichols Jr., F.P. and Grim, R.E. (1962). *Formation of new minerals with lime stabilization as proven by field experiments in Virginia. Highway Research Board Bulletin, Vol. 335, pp. 31–39.*

Ejjaouani, H. (2008). *Interactions of foundations and expansive soils: Pathology, calculations and experimental studies.* 244.

ESLINGER E., PEAVER D. (1988). *Clay Minerals for the Petroleum Geologists and Engineers, SEPM Short Course Notes n°22, pp. 343, Tulsa in Economic Geology vol. 84 (2), pp. 464-465.*

Estabragh, A. R., Beytolahpour, I., and Javadi, A. A., (2010). *Effect of resin on the strength of soil-cement mixture. Journal of Materials in Civil Engineering, 23 (7), 969-976.*

Fouad, BERRABAH2015. *Évaluation numérique de l'effet du renforcement par nappes de géosynthétique sur la stabilité et le tassement des remblais sur sol compressible. Université Mohamed Khider – Biskra : s.n .*

France, Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements, & Laboratoire central des ponts et chaussées (France). (2000). *Etude et réalisation des rambles sur sols compressible. SETRA.*

Gadouri H (2017) *Influence of sulphates on the stabilization of clayey soils using mineral additives*. Ph.Dthesis, Medea University, Algeria. [https://www.researchgate.net/publication/330912668\\_Influence\\_of\\_sulphates\\_on\\_the\\_stabilization\\_of\\_clayey\\_soils\\_using\\_mineral\\_additivs](https://www.researchgate.net/publication/330912668_Influence_of_sulphates_on_the_stabilization_of_clayey_soils_using_mineral_additivs)

Gadouri H, Harichane K, Ghrici M (2016) *Effects of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> on the geotechnical properties of clayey soils stabilised with mineral additives*. *Int J Geotech Eng* 11(5):500–512. doi:10.1080/19386362.2016.1238562

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*, 11, 19-32.

Grari, K. (2016). *Études des propriétés physico-mécaniques des soil-mixing*. 108.

Grim, R.E. (1959). *Physio-chemical properties of soils: Clay minerals*. *Journal of the soil mechanics and foundations division, ASCE*, Vol. 85, No. 2, pp. 1–18.

Harichane K., Ghrici M., Kenai S., (2011b), *Effet de la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur le compactage et la résistance des sols mous argileux*, *Séminaire International, Innovation & Valorisation en génie civil & Matériaux de construction, Rabat Maroc*, pp. 1-7.

Harichane, K. and Ghrici, M. (2009). *Effect of combination of lime and natural pozzolana on the plasticity of soft clayey soils*. *2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 30 May 2009, Near East University, Nicosia, North Cyprus.

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.

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.

<http://www.wikipedia.fr>

IFSTTAR (2012). *Identification du processus de modification / agrégation du sol*. Livrable A.1 du module A, projet TerDOUEST.

Jean-Pierre MAGNAN, & Georges PILOT. (1988). *Amélioration des sols*.pdf.

Kalkan, E., (2004). *Effects of silica fume on the geotechnical properties of fine-grained soils exposed to freeze and thaw*. *Cold Regions Science and Technology*, 58 (3), 130-135.

Kalkan, E., (2009). *Preparation of scrap tire rubber fiber-silica fume mixtures for modification of clayey soils*. *Applied Clay Science*, 80, 117-125

Kalkan, E., and Akbulut, S., (2013). *The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners*. *Engineering Geology*, 73 (1-2), 145-156, doi: 10.1016/j.enggeo.2004.01.001.

Kang, X., Kang, G. C., Chang, K. T., and Ge, L., 2014. *Chemically stabilized soft clays for road-base construction*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (7), 04014199,1-9.

Khebizi W., (2011), *Etude de la durabilité des sols argileux améliorés avec des ajouts minéraux*, Université Hassiba Ben-Bouali de Chlef.

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.

Knapik, K., Bzówka, J. and Russo, G. (2014). *Compressibility of kaolinite treated with fly ash from fluidized bed combustion*. *Budownictwo I Architecture*, Vol. 13, No. 2, pp. 33–38.

Kolay, P.K., and Ramesh, K.C., (2016). *Reduction of expansive index, swelling and compression behavior of kaolinite and bentonite clay with sand and class C fly ash*. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34 (1), 87-101.

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/>.

Lambe, T.W. (1953). *The structure of inorganic soil*. *Proceedings, ASCE*, Vol. 79. Tiré à 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.

LCPC-SETRA. – *Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique. Fascicule*

Le Borgne T (2010) *Effects of potential deleterious chemical compounds on soil stabilisation. Dissertation, Nancy-Université, France. <http://hdl.handle.net/10068/842439>.*

Leger, C.-L. (18 septembre 1997). *Etude expérimentale des solutions solides octaédriques ternaires dans les smectites. Poitiers: 156.*

Leong, E. C., Soemitro, R. A. A., and Rahardjo, H., 2000. *Soil improvement by surcharge and vacuum preloading's. Géotechniques, 50 (5), 601-605.*

Lin, D.F., Lin, K.L., Hung, M.J. and Luo, H.L. (2007). *Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil. Construction and Building Materials, Vol. 145, No. 1, 58–64, doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.087.*

Lucile Saussaye (2012). « *Traitement des sols aux liants hydrauliques : aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification.* » - *Thèse de doctorat de l'ESITC de Caen.*

Madhyannapu, R. S., 2007. *Deep mixing technology for mitigation of swell-shrink behavior of expansive soils of moderate to deep active depths. Doctoral dissertations, University of Texas at Arlington.*

Magnan, J.-P. (1997). *Description, identification et classification des sols. 17.*

Manasseh, J. and Olufemi, A.T., (2008), *Effect of lime on some geotechnical properties of Igumale Shale, EJGE, Vol. 13. Material Bull Engineering Geology Environment, Vol. 66, pp.143-151.*

Mohanty, S.K., Pradhan, P.K., and Mohanty, C.R., 2016. *Consolidation and drainage characteristics of expansive soil stabilized with fly ash and dolochar. Geotechnical and Geological Engineering, 34 (5), 1435-1451.*

N. Denies, (23 février 2015), *Enjeux et développements récents des techniques d'amélioration des sols, P 2-55.*

Ndiaye C., 2018. *Thèse de doctorat (application des concepts d'état limite et d'état critique à des sols tropicaux), université de Thiès.*

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*

Okumura, T. and Terashi, M. (1975). *Deep-lime-mixing method of stabilization for marine clays. Proc. 5th Asian Regional Conf. on SMFE, Bangalore, Vol. 1, pp. 69–75.*

Osula, D. O., 1991. *Lime modification of problem laterite. Engineering Geology, 30 (2), 141-154.*

Ottawa (1977). *Conseil national de recherche du Canada. Les effets des halogénures alcalins dans l'environnement canadien. CNRC n o 15019, Comité associé des critères scientifiques concernant l'état de l'environnement.*

Ouhadi, V.R., Yong, R.N., Amiri, M. and Ouhadi, M.H. (2014). *Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays. Applied Clay Science, Vol. 95, pp. 111–118, doi : 10.1016/j.clay.2014.03.020.*

Pansu M., Gautheyrou J., (2003), *L'analyse du sol minéralogique, organique et minérale, Editions Springer.*

Parker, J. W., 2008. *Evaluation of laboratory durability tests for stabilized subgrade soils. Master of Science, Brigham Young University.*

part, No. 315, p. 49.

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.*

*Principe généreux, 98. Fascicule*

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).*

Puppala, A.J., Punthutaecha, K. and Vanapalli, S.K. (2006). *Soil-water characteristic curves of stabilized expansive soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, No. 6, pp. 736–751, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006) 132:6(736) C.*

Rajasekaran G, Narasimha Rao S (1997) *The microstructure of lime-stabilization marine clay. Ocean Engineering* 24(9):867–878. doi: 10.1016/S0029-8018(96)00041-8

Rajasekaran, G. and Narasimha Rao, S. (2002). *Compressibility behaviour of lime-treated marine clay. Ocean engineering*, Vol. 29, No. 5, pp. 545–559, doi: 10.1016/S0029-8018(01)00010-5.

Rodriguez, R., 2008. *Engineering behavior of soft clays treated with circulating fluidized bed combustion fly ash. Master of Science, Université of Puerto Rico Mayagüez Campus.*

Saussaye, Lucile. s. d. « *Traitement des sols aux liants hydrauliques : aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification* », 318.

SCHÖN (Ch.). – *Classification géotechnique des sols basée sur la classification USCS. Bulletin de liaison des Laboratoires routiers*, no 16, pp. 3-5 à 3-16 nov.-déc. 1965.

Senol, A., Edil, T.B., Bin-Shafique, M.S., Acosta, H.A. and Benson, C.H. (2006). *Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes. Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 46, No. 4, pp. 365–376, doi: 10.1016/j.resconrec.2005.08.005.

Sezer, A., Inan, G., Yilmaz, H.R. and Ramyar, K. (2006). *Utilization of a very high lime-fly ash for improvement of Izmir clay. Building and Environment*, Vol. 41, No. 2, pp. 150–155, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.12.009.

Shi, C. and Day, R. L. 2000a. *Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators: Part I. Reaction kinetics, Cement and Concrete Research*, 30, (1), 51–58.

Sivapullaiah, P.V., Sridharan, A. and Ramesh, H.N. (2000). *Strength behaviour of lime-treated soils in the presence of sulphates. Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, No. 6, pp. 1358–1367, doi:10.1139/t00-052

Thakare, S. W., and Chauhan, P., 2016. *Stabilization of expansive soil with micro silica, lime and fly ash for pavement. International Journal of Engineering Research*, 5 (1), 9-13.

Thompson, M.R. (1966). *Lime reactivity of Illinois soils. J. SM FE, Proc. ASCE*, Vol. 92, pp. 67–92, <https://trid.trb.org/view.aspx?id=119340>.

TP, P. (2007, November 6). *Techniques anti-fissures. http://www.planete-tp.com/techniques-anti-fissures-a785.html*

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.

Truche, C. (2010.). *Caractérisation et quantification des minéraux argileux dans les sols expansifs par spectroscopie infrarouge aux échelles du laboratoire et du terrain*. 230.

Umesha, T. S., Dinesh, S. V., and Sivapullaiah, P. V., 2009. *Control of dispersivity of soil using lime and cement*. *International journal of geology*, 3 (1), 8-16.

Unruh, J. T., 2010. *Evaluation of lime pretreatment for cementitious stabilization of highplasticity soil*. Master of Science, Oklahoma State University.

[www.reddysglobal.com](http://www.reddysglobal.com)

[www.Researchgat.com](http://www.Researchgat.com)

XING H., YANG X., XU C., YE G. *Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil-cement* *Engineering Geology*, vol. 103, 2009, pp.33-38.

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.

ZIGHMI, Imène-Bassma. (2011). *Etude numérique de l'influence des paramètres géotechniques sur le comportement des sols renforcés par colonnes ballastées*. Tizi Ouzou.

Zoubir W., (2009), *Effet des résidus minéraux sur l'amélioration des sols argileux de la région de Chlef*, Université Hassiba Ben-Bouali de Chlef.

Zoubir, W., 2012. *Effet des résidus minéraux sur l'amélioration des sols fins argileux*. *Memoir*

Nalbantoglu, Z. (2006). *Lime stabilization of expansive clay*. *Expansive soils-recent advances in characterization and treatment*. Taylor & Francis group, London, pp. 341–348.e de Magister, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef.

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 sociométrique en laboratoire*
- NF P94-077 Essai de compression uni axiale*

---

---

# **Annexe**

## Annexe A

### Effet de la chaux sur la limite de liquidité et de plasticité (Annexe A.1)

Chaux	0	4	8
WL-0%NaCl (Gadouri et al, 2017)	82,8	64,5	62,1
WP-0%NaCl (Gadouri et al, 2017)	32,2	45,5	45,7
WL-2%NaCl-Présente étude	70	57	56
WP-2%NaCl-Présente étude	33	40	42
WL-4%NaCl-Présente étude	62	50	47
WP-4%NaCl-Présente étude	32	35	36
WL-6%NaCl-Présente étude	49,8	53,7	61,3
WP-6%NaCl-Présente étude	33,3	40	50

### Effet de la chaux sur l'Indice de plasticité (Annexe A.2)

Chaux	0	4	8
IP-0%NaCl (Gadouri et al, 2017)	50,6	19	16,4
IP-2%NaCl-Présente étude	37	17	14
IP-4%NaCl-Présente étude	30	15	11
IP-6%NaCl-Présente étude	16,5	13,7	11,3

## Annexe B

### Effet de la chaux sur la teneur en eau optimale (Annexe B.1)

Chaux	0	4	8
Wopt-0%NaCl (Gadouri et al, 2019)	28,3	30,4	31,1
Wopt-2%NaCl-Présente étude	26,1	23,9	21,1
Wopt-4%NaCl-Présente étude	23,8	22,2	19,7
Wopt-6%NaCl-Présente étude	23,1	22	19

### Effet de la chaux sur la densité sèche maximale (Annexe B.2)

Chaux	0	4	8
$\gamma_{dmax}$ -0%NaCl (Gadouri et al, 2019)	13,8	13,2	12,9
$\gamma_{dmax}$ -2%NaCl-Présente étude	14,2	14,4	14,9
$\gamma_{dmax}$ -4%NaCl-Présente étude	14,5	15,1	15,7
$\gamma_{dmax}$ -6%NaCl-Présente étude	14,8	15,7	16

## Annexe C

### Effet de NaCl sur la limite de liquidité et de plasticité (Annexe C.1)

NaCl	0	2	4	6
WL-0%Chaux	82,8	70	62	49,8
WP-0%Chaux	32,2	33	32	33,3
WL-4%Chaux	64,5	57	50	53,7
WP-4%Chaux	45,5	40	35	40
WL-8%Chaux	62,1	56	47	61,3
WP-8%Chaux	45,7	42	36	50

### Effet de NaCl sur l'Indice de plasticité (Annexe C.2)

NaCl	0	2	4	6
IP-0%Chaux	50,6	37	30	16,5
IP-4%Chaux	19	17	15	13,7
IP-8%Chaux	16,4	14	11	11,3

## Annexe D

### Effet de NaCl sur la teneur en eau optimale (Annexe D.1)

NaCl	0	2	4	6
Wopt-0%Chaux	28,3	26,1	23,8	23,1
Wopt-4%Chaux	30,4	23,9	22,2	22
Wopt-8%Chaux	31,1	21,1	19,7	19

### Effet de NaCl sur la densité sèche maximale (Annexe D.2)

NaCl	0	2	4	6
γdmax-0%Chaux	13,8	14,2	14,5	14,8
γdmax-4%Chaux	13,2	14,4	15,1	15,7
γdmax-8%Chaux	12,9	14,9	15,7	16