

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieure 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 Sciences de la Terre**  
**Spécialité : Géotechnique**



**Mémoire présenté pour l'obtention d'un diplôme de Master en**  
**Géotechnique**

## **Thème**

**Etude des changements apportés par la présence de composés  
chimiques sur les propriétés géotechniques des sols argileux  
stabilisés à la chaux**

**Présenté par :**

**Melle.** Ghouti Linda  
**Melle.** Chelghoum Chaimaa

Soutenu publiquement le : 09 /07 /2019

Devant le jury composé de :

<b>Mme. Chouchane Karima</b>	MAA	Université Khemis-Miliana	Présidente
<b>Mme. Filali Mira</b>	MAA	Université Khemis-Miliana	Examinatrice
<b>Mr. Méziani Brahim</b>	MAB	Université Khemis-Miliana	Examinateur
<b>Mr. Gadouri Hamid</b>	MAB	Université Khemis-Miliana	Promoteur

**Promotion : 2018-2019**

## *Dédicaces*

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

*À mes très chers parents ma mère Mibabil Nacera sur tous mon marie Attou Yassin qui n'ont cessé de me combler par leur tendresse et leur amour, que Dieu leur bénisse et leur accorde une longue vie.*

*À mes sœur Dalila, Yasmin et tous les membres de ma famille de mon père, ma mère et mon marie sans aucune exception*

*À mes très chers amis ma binôme Chelghoum Chaima Larbi Bouameran Faiza, Hannachi Bouchra Matoug Dalila pour leur soutien moral*

*Et à tous ceux que ma réussite leur tient à cœur*

*Linda*



## *Dédicaces*

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

*À mes très chers parents Chelghoume Mehdi et ma mère Ben raiba Houria et sur tous mon grand père Chelghoume Mohammed qui n'ont cessé de me combler par leur tendresse et leur amour, que Dieu leur bénisse et leur accorde une longue vie.*

*À mes sœurs Amel et Zola, Houdaifa et tous les membres de ma famille sans aucune exception*

*À mes très chers amis ma binôme Ghouti Linda aussi un gros bisou à ma chère amie Mekki Kenza, Larbi Bou Ameran Faiza, Matoug Dalilia et a tous la famille de Hannachi Bouchra .Imane .Nadjwa et tous mes collègues de mon promotion 2019-2020 leur soutien moral*

*Et à tous ceux que ma réussite leur tient à cœur*

*Chaimaa*



# Remerciements

En premier lieu, nous exploitons cette occasion qui nous est offerte pour adresser nos plus vifs remerciements et exprimer nos profonde gratitude à notre promoteur de mémoire **Mr. Gadouri Hamid**, Enseignant chercheur à l'Université de Khemis-Miliana et membre au laboratoire de recherche « Géomatériaux » de l'université de Chlef, d'avoir nous proposé un sujet ambitieux et motivant, leur appui constant, leurs encouragements et leurs conseils d'or depuis notre stage, pour leur patience, leur générosité et disponibilité au cours de notre formation, pour nous avoir fait confiance tout au long de ce projet, pour leur encadrement bienveillant et pour leurs critiques constructives et leur intérêt qu'ils ont porté tout au long de l'élaboration de ce projet de mémoire.

Il nous est agréable de remercier sincèrement **Mme. Chouchane Karima**, Enseignante chercheur à l'Université de Khemis Miliana d'avoir accepté de présider le jury.

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

Nos vifs remerciement sont également adressés à **Mr. Meziani Brahim**, Enseignant chercheur à l'Université de Khemis-Miliana d'avoir accepté d'examiner avec toute l'attention voulue le présent travail.

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

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

## ملخص

إن وجود بعض المركبات الكيميائية في المواد الأسمنتية (الإضافات المعدنية)، وفي المواد التي تتطلب معالجة (التربة) وفي المياه المستخدمة في الخلط أو في المياه الجوفية له آثار معقدة من خلال الإخلال بتبادل الكاتيونات والتفاعلات البوزولانية. يمكن أن يحدث هذا الإضطراب بسبب عدة عوامل وهي: طبيعة التربة المستقرة، ونوع وتركيز المركبات الكيميائية الموجودة في النظام المراد استقراره، والجرعة ونوع المعالج المستخدم، ودرجة حرارة التخزين وفترة المعالجة. لهذا الغرض، أجريت دراسة تجريبية لتقييم تأثير خلط كبريتات أحادية التكافؤ (كبريتات الصوديوم) وكبريتات ثنائية التكافؤ (كبريتات الكالسيوم) المضافة بنسب 2 و 4% على حدود أتربرغ وخصائص إنضغاط التربة الطينية المعالجة ب 4 و 8% من الجير المعالج. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن مؤشر اللدونة للتربة المعالجة يتزايد إلى غاية 2% ثم يتناقص تدريجياً بعد هذه النسبة. بالمقارنة مع النتائج المنشورة في المجالات العلمية، تظل قيم مؤشر اللدونة للتربة المعالجة بالجير أقل من تلك التي تم إيجادها في وجود كبريتات الصوديوم والتي تعكس التأثير المفيد لكبريتات الكالسيوم. من ناحية أخرى، فإن وجود 4% من كبريتات الكالسيوم يزيد بشكل كبير من الحد الأقصى للكثافة الجافة والمحتوى المائي الأمثل للتربة المعالجة بالجير والسبب راجع إلى تحسن ملحوظ في خاصية الإنضغاط للتربة الطينية (ملء الفراغات بالجسيمات الدقيقة بكبريتات الكالسيوم). من الواضح جداً أن كبريتات الكالسيوم يعتبر بمثابة عامل استقرار لأنه يحسن من ليونة وضغط التربة الطينية المعالجة بالجير.

**الكلمات المفتاحية:** التربة الطينية، الجير، الكبريتات، الثبات، حدود أتربرغ، خصائص الضغط

## Résumé

La présence de certains composés chimiques dans les matériaux de stabilisation (ajouts minéraux), dans le matériau stabilisé (sol), dans l'eau utilisée pour le malaxage et/ou dans la nappe phréatique présente des effets complexes en perturbant l'échange cationique et les réactions pouzzolaniques. Cette perturbation peut être provoquée par plusieurs facteurs à savoir : la nature du sol stabilisé, le type et la concentration des composés chimiques qui se présentent dans le système stabilisé, le dosage et le type du liant utilisé, la température de conservation et la période de cure. A cet effet, une étude expérimentale a été entreprise pour estimer l'effet du mélange d'un sulfate monovalent (25% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et divalent (75% de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ajouté avec des teneurs de 2 et 4%MS sur les limites d'Atterberg et les propriétés de compactage d'un sol argileux traité avec 4 et 8% de chaux. Les résultats obtenus ont montré que l'indice de plasticité du sol traité augmente jusqu'à un optimum de 2% puis il décroît en présence de 4% de MS. Par comparaison aux résultats publiés dans la littérature, les valeurs de l'indice de plasticité du sol traité à la chaux restent inférieures à celles développées par le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ce qui reflète l'effet bénéfique du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . D'autre part, la présence de 4% de MS fait augmenter considérablement la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale du sol traité à la chaux en raison de l'amélioration de sa compacité (remplissage des vides par les particules fines du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Il est donc très clair que le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  joue le rôle d'un stabilisateur du fait qu'il améliore la plasticité et le compactage du sol argileux traité à la chaux.

**Mots-Clés :** Sol argileux, Chaux, Sulfates, Stabilisation, Limites d'Atterberg, Propriétés de compactage

## **Abstract**

The presence of some chemical compounds in the cementing materials (mineral additions), in the stabilized material (soil) and in the water used for mixing and/or in the groundwater has complex effects by disturbing the cation exchange and pozzolanic reactions. This disturbance can be caused by several factors, namely: the nature of the stabilized soil, the type and concentration of the chemical compounds present in the stabilized system, the dosage and type of the binder used, the storage temperature and the curing period. For this purpose, an experimental study was undertaken to assess the effect of mixing a monovalent (25%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) and divalent (75%  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) sulfate added with 2% and 4% SM concentrations on the Atterberg's limits and compaction properties of a clay soil treated with 4 and 8% lime. The obtained results showed that the plasticity index of the treated soil increases to an optimum of 2% and then decreases in the presence of 4% of SM. In comparison with the results published in the literature, the values of the plasticity index of the soil treated with lime remain lower than those developed by  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , which reflects the beneficial effect of  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . On the other hand, the presence of 4% SM significantly increases the maximum dry density and optimum water content of the lime-treated soil due to the improvement of its compactness (filling of the voids with the fine particles of  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). It is therefore very clear that  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  acts as a stabilizer because it improves the plasticity and compaction of the clay soil treated with lime.

**Keywords:** Clay soil, Lime, Sulfates, Stabilization, Atterberg limits, Compaction properties

# Table des Matières

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

## Introduction générale 1

### Chapitre 1 : Techniques d'amélioration des sols instables

<b>1.1 Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Définition du sol.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Classification des sols .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4 Les trois principaux sols .....</b>	<b>6</b>
1.4.1 les argiles.....	6
1.4.1.1 Définition des minéraux argileux.....	6
1.4.1.2 Les argiles du groupe de la kaolinite .....	7
1.4.1.3 Les argiles du groupe de l'illite (MICAS).....	8
1.4.1.4. Les argiles du groupe des smectites (montmorillonite) .....	8
1.4.1.5. Problèmes des sols argileux.....	9
1.4.1.5.1 Le gonflement.....	9
1.4.1.5.2 Le tassement.....	9
1.4.1.5.3 Les glissements.....	10
1.4.1.6 Pathologies rencontrées dans les ouvrages.....	10
1.4.1.6.1 Les limons .....	11
1.4.1.6.2 Les marnes .....	11
<b>1.5 Méthodes d'amélioration des sols instables.....</b>	<b>12</b>
1.5.1 Méthodes mécaniques.....	13
1.5.1.1 Compactage de surface.....	13
1.5.1.1 Compactage dynamique.....	14
1.5.1.3 Vibrocompactage .....	16
1.5.2 Méthodes hydrodynamiques.....	16
1.5.2.1 Préchargement ou Précompression.....	18
1.5.2.2 Accélération de la consolidation par les drains verticaux.....	18
1.5.3 Méthodes thermiques .....	18
1.5.4 Méthodes Chimiques.....	22
1.5.4.1 Utilisation de la chaux.....	23
1.5.4.2 Mécanisme de la stabilisation à la chaux.....	24
<b>1.6 Conclusion.....</b>	<b>24</b>

## **Chapitre 2 : Effet des additifs minéraux en présence et en absence des sulfates sur les sols instables**

<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2 Effet de la chaux .....</b>	<b>25</b>
2.2.1 Effet de la chaux sur la plasticité .....	25
2.2.2 Effet de la chaux sur le compactage.....	28
2.2.3 Effets de la chaux sur la résistance à la compression.....	30
2.2.4 Effet de la chaux sur la résistance au cisaillement.....	32
<b>2.3 Effet du ciment .....</b>	<b>35</b>
2.3.1 Effets du ciment sur la plasticité.....	35
2.3.2 Effets du ciment sur le compactage.....	36
2.3.3 Effet du ciment sur la résistance à la compression .....	36
2.3.4 Effet du ciment sur la résistance au cisaillement.....	39
<b>2.4 Effet des cendres volantes.....</b>	<b>40</b>
2.4.1 Effet des cendres volantes sur la plasticité.....	40
2.4.2 Effet des cendres volantes sur le compactage .....	41
2.4.3 Effet des cendres volantes sur la résistance à la compressibilité... ..	42
2.4.4 Effet des cendres volantes sur la résistance au cisaillement.....	43
<b>2.5 Effet de la pouzzolane naturelle.....</b>	<b>43</b>
2.5.1 Effets de la pouzzolane naturelle sur la plasticité .....	43
2.5.2 Effets de la pouzzolane naturelle sur le compactage .....	43
2.5.3 Effets de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression .....	44
2.5.4 Effets de la pouzzolane naturelle sur résistance au cisaillement .....	46
<b>2.6. Conclusion.....</b>	<b>47</b>

## **Chapitre 3 : Eude expérimentale**

<b>3.1 Introduction.....</b>	<b>48</b>
<b>3.2 Matériaux utilisés et préparation .....</b>	<b>48</b>
3.2.1 Sols naturels.....	48
3.2.1.1 lieux de prélèvement .....	48
3.2.1.2 Préparation .....	49
3.2.1.3 Identification et caractérisation .....	49
3.2.2 Chaux.....	51
3.2.2.1 Produits chimiques .....	53
<b>3.3 Déroulement des essais.....</b>	<b>54</b>
3.3.1 Combinaison des échantillons .....	54
3.3.2 Propriétés étudiées.....	54
3.3.2.1 Limites d'Atterberg.....	54
3.3.2.1.1 Limite de liquidité.....	55
3.3.2.1.2 Limite de plasticité.....	56
3.3.2.1.3 Indice de plasticité.....	58
3.3.2.2 Compactage.....	58
<b>3.4 Programme expérimental.....</b>	<b>61</b>
<b>3.5 Conclusion.....</b>	<b>62</b>

## **Chapitre 4 : Présentation et interprétation des résultats obtenus**

<b>4.1 Introduction .....</b>	<b>63</b>
<b>4.2 Variation des limites d'Atterberg .....</b>	<b>63</b>
4.2.1 Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg.....	63
4.2.2 Effet des sulfates sur les limites d'Atterberg.....	66
<b>4.3 Variation des caractéristiques de compactage.....</b>	<b>68</b>
4.3.1 Effet de la chaux sur les propriétés de compactage.....	68
4.3.2 Effet des sulfates sur les propriétés de compactage.....	70
<b>4.4 Conclusion .....</b>	<b>72</b>

## **Chapitre 5 : Etude comparative entre les résultats obtenus et publiés**

<b>5.1 Introduction .....</b>	<b>73</b>
<b>5.2 Variation des limites d'Atterberg .....</b>	<b>75</b>
5.2.1 Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg.....	73
5.2.2 Effet des sulfates sur les limites d'Atterberg.....	76
<b>5.3 Variation des caractéristiques de compactage.....</b>	<b>79</b>
5.3.1 Effet de la chaux sur les propriétés de compactage.....	79
5.3.2 Effet des sulfates sur les propriétés de compactage.....	80
<b>5.4 Conclusion .....</b>	<b>82</b>

<b>Conclusions générales, Recommandations et Perspectives</b>	<b>83</b>
---	-----------

<b>Références bibliographiques</b>	<b>86</b>
------------------------------------	-----------

### **Annexes**

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre 1

<b>Fig.1.1</b>	Relation entre la limite de liquidités l'indice de plasticité pour des sols caractéristiques (Schon, 1965).	4
<b>Fig.1.2</b>	Diagramme de plasticité de Casagrande (Schon, 1965).	6
<b>Fig.1.3</b>	Structure de base des argiles (S.Caillère, 2016).	7
<b>Fig.1.4</b>	Structure cristallographique du feuillet de la kaolinite (Zoubir, 2009).	8
<b>Fig.1.5</b>	Structure cristallographique du feuillet de l'illite, de la smectite et de la vermiculite : deux couches de tétraèdres $\text{SiO}_4$ (T) encadrant une couche d'octaèdres $\text{AlO}_6$ (O). Le cation interfoliaire lie deux feuillets consécutifs [5] (Zoubir, 2009).	8
<b>Fig. 1.6</b>	(a)Schéma da la structure de la montmorillonite (Iambe, 1953). (b) : vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite (Grime 1959).	10
<b>Fig.1.7</b>	Fissures au niveau d'une structure de génie civil.	11
<b>Fig.1.8</b>	Déformation d'une chaussée de sol instable.	11
<b>Fig.1.9</b>	Types de compactage de surface [Lawton, 2004].	14
<b>Fig.1.10</b>	Chantier d'un compactage dynamique profond	16
<b>Fig.1.11</b>	Vibrocompactage.	17
<b>Fig.1.12</b>	Amélioration d un terrain par induction hydraulique (substitution du sol par des gravier dans un chantier à saint martin d hère en 2006, France)	18
<b>Fig.1.13</b>	Amélioration d'un sol mou par la technique de préchargement (Varghese, 2005).	19
<b>Fig.1.14</b>	Chantier utilisant la congélation du sol. Killer France (2013)	20
<b>Fig.1.15</b>	Chantier de traitement d'un sol à la chaux [France ,2009]	22
<b>Fig.1.16</b>	Action de la chaux à court terme (modification par floculation), (Cabane, 2004).	23
<b>Fig.1.17</b>	Effet de la chaux sur le pH d'une argile (bentonite très plastique riche en kaolinite et en montmorillonite), (Al-Mukhtar et al. 2010).	23

## Chapitre 2

<b>Fig.2.1</b>	Effet des sulfates monovalents et divalents sur les limites d'Atterberg d'une kaolinite traitée à 6% chaux, (Kinuthia et al. 1999).	28
<b>Fig.2.2</b>	Modification des caractéristiques de compactage d'un sol suite à l'ajout de chaux, d'après le GTS (LCPC –SETRA, 2000).	30
<b>Fig.2.3</b>	L'effet des différents types de cations sulfatiques sur la densité sèche maximale (a), et la teneur en eau optimum (b), d'une kaolinite sans présence de sulfates, (Kinuthia et al, 1999).	31
<b>Fig.2.4</b>	Effet apporté par l'utilisation de gypse comme additif sur la résistance à la compression non confinée d'un sol peu plastique traité à la chaux, (Aldaood et al., 2014a).	33
<b>Fig.2.5</b>	Effet des sulfates sur la résistance au cisaillement d'une montmorillonite traitée avec 6% de chaux après une année de cure (pression de confinement: PC = 100 KPa), (Sivapullaiah et al. 2000).	36

## LISTE DES FIGURES

<b>Fig.2.6</b>	Effet de l'utilisation du ciment (CEM II) et de la chaux comme additifs sur la résistance à la compression non confinée d'un sol argileux peu plastique, (Ouhadi et al. 2014).	38
<b>Fig.2.7</b>	Effet de l'utilisation du ciment sur la résistance à la compression non confinée d'un sol peu plastique préparé à différentes teneur en eau après 7 et 60 jours de cure, (Asgari et al., 2015).	39
<b>Fig.2.8</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).	39
<b>Fig.2.9</b>	Variation de la résistance au cisaillement d'une argile organique très plastique traitée au ciment après différentes périodes de cure, (a): sol non traité, (b): sol traité avec 10% de ciment, (Ho and Chan, 2011).	40
<b>Fig.2.10</b>	Effet des cendres volantes sur l'indice de plasticité d'un sol moyennement plastique, (Parsons and Kneebone, 2005).	41
<b>Fig.2.11</b>	Variation des caractéristiques de compactage d'une argile traitée avec différents pourcentages de cendres volantes et de GGBS, (McCarthy et al. 2012).	42
<b>Fig.2.12</b>	Effet de différents pourcentages de cendres volantes sur la résistance à la compression non confinée d'un sédiment marin après différentes périodes de cure, (Silitonga et al., 2011).	43
<b>Fig.2.13</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	45
<b>Fig.2.14</b>	Courbes diffractométriques issus de diffraction par des rayons X (DRX) montrant les changements dans la minéralogie du SR stabilisé avec 8%L, 20%PN et 20%PN+8%L en présence ou non de 4% du Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> et du CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O après 60 jours de cure	46
<b>Fig.2.15</b>	Images de MEB montrent les changements dans la macrostructure du sol argileux traités avec 20% de pouzzolane naturelle en absence des sulfates après 60 jours de cure (GADOURI 2017)	47
<b>Fig.2.16</b>	Effet de différents pourcentages de chaux, de PN et de L-PN sur la résistance au cisaillement du sol rouge stabilisé en absence des sulfates pour différentes périodes de cure (Gadouri 2017).	47
<b>Fig.2.17</b>	Effet de 4% du Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure.	48

### Chapitre 3

<b>Fig.3.1</b>	Prélèvement du sol argileux rouge (SR) à partir d'un projet d'autoroute Est-Ouest (Harchoun, Algérie).	50
<b>Fig.3.2</b>	Moyens utilisés pour la préparation des sols, (a): concasseur, (b): broyeur.	51
<b>Fig.3.3</b>	Préparation des sols pour les essais au laboratoire, (a): broyage et tamisage au tamis 1mm, (b): sols après tamisage, (c): conservation hors humidité dans des sacs hermétiques.	51
<b>Fig.3.4</b>	Le diagramme diffractométrique présentant la composition minéralogique du sol argileux rouge étudié.	53

## LISTE DES FIGURES

<b>Fig.3.5</b>	Préparation de la chaux, (a): emballage utilisé pour la chaux vive de Saida, (b): tamisage au tamis 0.4mm, (c): conservation dans des sacs hermétiques pour l'utilisée.	54
<b>Fig.3.6</b>	Les sulfates utilisés dans l'étude expérimentale, (a): sulfate de sodium anhydre( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), (b): sulfate de calcium hydraté ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).	55
<b>Fig.3.7</b>	Préparation de la pâte du sol avec de l'eau distillée en présence ou en absence du sulfate et la chaux pendant 1, 15 jours.	57
<b>Fig.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 10 mm.	58
<b>Fig.3.9</b>	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.	59
<b>Fig.3.10</b>	Homogénéisation du sol avec la chaux et sulfate, (b) : humidification du sol et conservation dans des sacs hermétiques.	61
<b>Fig.3.11</b>	Compactage du sol (Proctor normal).	61
<b>Fig.3.12</b>	Séquence des étapes post-compactage. (a) : sol compacté en trois couches, (b) : taillage et élimination des vides après avoir retiré la rehausse, (c) : pesage avant séchage et (d) pesage après séchage et détermination de la teneur en eau.	62
<b>Fig.3.13</b>	Organigramme des essais effectués au laboratoire.	63

## Chapitre 4

<b>Fig.4.1</b>	L'influence de différents dosages en chaux sur les propriétés de compactage du sol argileux traité en présence de 2% de sulfates seuls et combinés.	67
<b>Fig.4.2</b>	L'influence de différents dosages en chaux sur les propriétés de compactage du sol argileux traité en présence de 4% de sulfates seuls et combinés.	67
<b>Fig.4.3</b>	L'influence de différentes concentrations en sulfates (seuls et combinés) sur les propriétés de compactage du sol argileux traité avec 4% de chaux.	68
<b>Fig.4.4</b>	L'influence de différentes concentrations en sulfates (seuls et combinés) sur les propriétés de compactage du sol argileux traité avec 8% de chaux.	69
<b>Fig.4.5</b>	L'influence de différents dosages en chaux sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité en présence de 2% de sulfates seuls et combinés après 1 jour de cure.	70
<b>Fig.4.6</b>	L'influence de différents dosages en chaux sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité en présence de 2% de sulfates seuls et combinés après 15 jours de cure.	70
<b>Fig.4.7</b>	L'influence de différents dosages en chaux sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité en présence de 4% de sulfates seuls et combinés après 1 jour de cure.	71
<b>Fig.4.8</b>	L'influence de différents dosages en chaux sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité en présence de 4% de sulfates seuls et combinés après 15 jours de cure.	71
<b>Fig.4.9</b>	L'influence de différentes concentrations en sulfates (seuls et combinés) sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité avec 4% de chaux après 1 jour de cure.	72

## LISTE DES FIGURES

<b>Fig.4.10</b>	L'influence de différentes concentrations en sulfates (seuls et combinés) sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité avec 4% de chaux après 15 jours de cure.	73
<b>Fig.4.11</b>	L'influence de différentes concentrations en sulfates (seuls et combinés) sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité avec 8% de chaux après 1 jour de cure.	74
<b>Fig.4.12</b>	L'influence de différentes concentrations en sulfates (seuls et combinés) sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité avec 8% de chaux après 15 jours de cure.	75

## LISTE DES TABLEAUX

### Chapitre 1

<b>Tab.1.1</b>	Classification des sols selon leurs propriétés mécaniques (Costet et Sanglerat, 1983).	<b>5</b>
----------------	--	----------

### Chapitre 2

<b>Tab.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).	<b>29</b>
<b>Tab.2.2</b>	Effet de la chaux sur le compactage de la kaolinite, montmorillonite, quartz (Bell, 1996).	<b>30</b>
<b>Tab.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-Mukhtar et al. 2012).	<b>32</b>
<b>Tab.2.4</b>	Variation des paramètres de cisaillement effectifs ( $C'$ et $\phi'$ ) de deux sols argileux (montmorillonite et kaolinite) stabilisés avec 6% de chaux à différentes période de cure.	<b>34</b>
<b>Tab.2.5</b>	Effet des sulfates sur les paramètres de cisaillement effectifs ( $C'$ et $\phi'$ ) d'une montmorillonite traité à 6% de chaux à différentes périodes de cure,[16] (Sivapullaiah et al. 2000).	<b>35</b>
<b>Tab.2.6</b>	Effet du ciment sur les limites d'Atterberg (Okagbue et Ochulor, 2007).	<b>36</b>
<b>Tab.2.7</b>	Effet de 2% de $CaSO_4$ sur les paramètres de cisaillement d'un sol limoneux traité avec 12% de ciment portland, (Laguros, 1962).	<b>41</b>
<b>Tab.2.8</b>	Effet des cendres volantes sur les caractéristiques de cisaillement, (Senol et al 2006).	<b>44</b>

### Chapitre 3

<b>Tab.3.1</b>	Caractéristiques physico-mécaniques des sols.	<b>52</b>
<b>Tab.3.2</b>	Propriétés chimiques des sols étudiés.	<b>52</b>
<b>Tab.3.3</b>	Propriétés minéralogiques des sols étudiés.	<b>53</b>
<b>Tab.3.4</b>	Propriétés physico-chimiques des ajouts utilisés.	<b>54</b>
<b>Tab.3.5</b>	Caractéristiques physico-chimiques des sulfates utilisés.	<b>55</b>
<b>Tab.3.6</b>	Combinaisons des échantillons des sols stabilisés avec ou sans présence des sulfates.	<b>56</b>

---

---

# **Introduction Générale**

## **Introduction générale**

Les mauvais sols (ex : argiles gonflantes, tourbes, vases, sols organiques...etc.) ont été longtemps ignorés en raison qu'ils présentent des difficultés techniques et de construction. A travers la géologie des terrains du territoire nord de notre pays (Algérie), des sols peu convenables présentant une plasticité élevée et une faible capacité portante sont fréquemment rencontrés, il a été donc nécessaire d'améliorer ces sols afin de les rendre acceptables pour la construction. Ces limitations pourraient être surmontées par l'amélioration des propriétés géotechniques des sols en employant différentes méthodes mécaniques ou chimiques d'où le processus de stabilisation des sols.

D'une part, l'utilisation des ajouts minéraux pour la stabilisation des sols argileux est potentiellement promoteur. Ces ajouts combinés avec le ciment et/ou la chaux ont été longtemps employés comme stabilisants de sol tels que le calcaire, les cendres volantes, la fumée de silice, le laitier... De plus, ces ajouts sont généralement additionnés aux sols argileux pour améliorer leurs propriétés géotechniques (physiques et mécaniques). Ce processus s'avère bénéfique pour diminuer la plasticité et augmenter la résistance des sols argileux étudiés. D'autre part, la présence de certains composés chimiques dans les matériaux de stabilisation (ajouts minéraux), dans le matériau stabilisé (sol), dans l'eau utilisée dans le malaxage et/ou dans la nappe phréatique présente des effets complexes qui sont liés à la perturbation de l'échange cationique et des réactions pouzzolaniques. Cette perturbation devient de plus en plus importante et raison de plusieurs facteurs à savoir : la nature du sol stabilisé, le type et la concentration des composés chimiques qui se présentent dans le système stabilisé, le dosage et le type du liant utilisé, la température de conservation et enfin la période de cure.

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

- **L'objectif du travail**

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'influence et les changements apportés par certains composés chimiques (ex : chlorures, sulfates, nitrates, phosphates...etc.) sur certaines propriétés géotechniques des sols argileux améliorés par l'utilisation de la chaux en tant qu'un additif minéral.

- **Plan de travail**

Le mémoire est structuré en quatre chapitres à savoir :

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

Le **premier chapitre** présente en première partie un aperçu sur la caractérisation des sols fins et dans une deuxième partie un panorama sur les différentes techniques d'amélioration des sols instables.

Le **deuxième chapitre** présente une synthèse bibliographique sur les divers aspects des effets des ajouts cimentaires sur les propriétés géotechniques des mauvais sols à traiter.

Dans le **troisième chapitre**, un programme expérimental est établi pour effectuer des essais au laboratoire (physiques) sur des sols argileux à améliorer. Les propriétés étudiées sont la plasticité et le compactage.

Le **quatrième chapitre** consiste en la présentation des résultats et de leurs confrontations avec d'autres travaux de recherche effectués. De plus, ce chapitre discute de l'efficacité du traitement à la chaux en présence des sulfates sur le comportement du sol argileux amélioré.

Enfin, en dernier lieu sont exposées les principales conclusions et les recommandations des futurs travaux de recherche.

# Chapitre 1

---

## **Techniques d'Amélioration des Sols Instables**

## 1.1 Introduction

Selon le type de l'ouvrage et son mode de conception, le sol peut constituer une base d'appuis pour l'ensemble de l'ouvrage (route, tunnel, barrage poids) ou un point d'appuis pour quelques éléments seulement (bâtiment, pont, barrage en arc). Certains sols en raison de leurs propriétés géotechniques sont considérés comme des sols instables créant donc un handicap économique et technique pour les différentes parties impliquées dans ce domaine. Ces sols donc nécessitent une certaine amélioration pour augmenter leur stabilité mécanique et améliorer leur performance.

Dans ce chapitre on va décrire les différentes techniques d'amélioration des sols qui sont actuellement utilisées et classées comme méthodes mécaniques, hydrodynamiques, thermiques et chimiques.

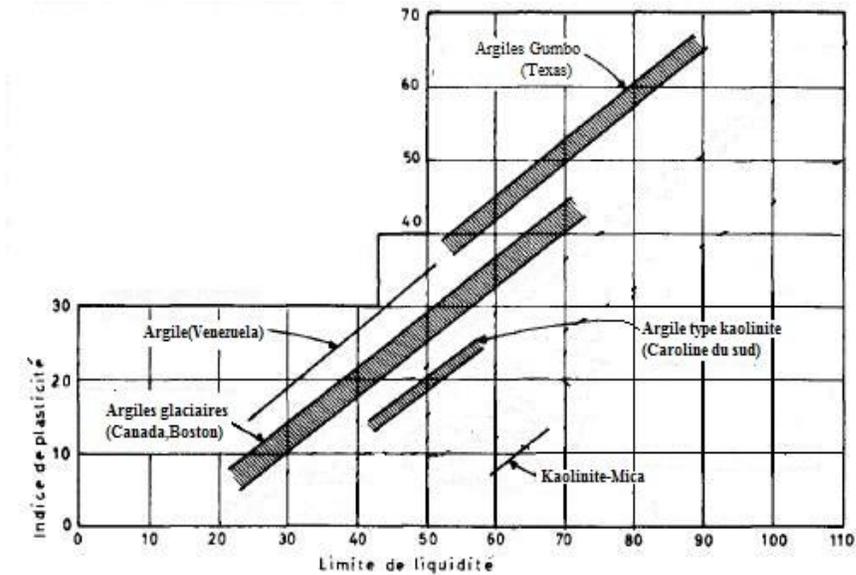
## 1.2 Définition du sol

Le sol se présente comme un système comprenant trois phases que l'on retrouve dans la nature: liquide, gazeuse et solide. La phase liquide est représentée par l'eau du sol et la phase gazeuse par l'air du sol. La phase solide est constituée de grains minéraux de taille variable qui proviennent de la désagrégation et de l'altération des roches sous-jacentes, et d'une fraction organique minoritaire (Hillel, 1988; Gelin and Stengel, 1998).

## 1.3 Classification des sols

Une classification géotechnique des sols a pour but de ranger les sols par catégories présentant des caractéristiques géotechniques voisines. Il existe plusieurs classifications géotechniques utilisant différents paramètres et caractéristiques distinctes.

Deux sols peuvent être les même d'un point de vue géologique mais différents selon leurs caractéristiques géotechniques et aussi selon la classification choisie. Dans la figure 1.1, on trouve des sols argileux de différentes origines mais qui n'ont pas la même considération géotechnique : la limite de liquidité et l'indice de plasticité varient considérablement d'une argile à une autre.



**Fig.1.1 :** Relation entre la limite de liquidités l'indice de plasticité pour des sols caractéristiques (Schon, 1965).

Les résultats d'essai in-situ (pressiomètre et pénétromètre) permettent aussi de classer le sol évolutif en fonction de la pression limite et résistance à la pointe Tableau 1.1.

**Tableau 1.1 :** Classification des sols selon leurs propriétés mécaniques (Costet et Sanglerat, 1983)

Classe de sol		Préssiomètre P <sub>1</sub> (MPa)	Pénétromètre Q <sub>c</sub> (MPa)
<b>Argiles et Limons</b>	A-Argiles et limons mous	<0,7	<3,0
	B- Argiles et limons fermes	1,2 à 2,0	3,0 à 6,0
	C- Argiles très fermes à dures	>2,5	>6,0
<b>Sables, graves</b>	A-Lâches	<0,5	<5
	B-moyennement compacts	1,0 à 2,0	8 à 15,0
	C-Compacts	>2,5	>20,0
<b>Marnes</b> <b>Marno-calcaires</b>	A-Tendres	1,5 à 4,0	-
	B-Fragmentées	>4,5	-

Parmi les classifications, on retrouve le triangle de texture de Taylor, la classification Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées (L.C.P.C), le Guide de Travaux Routiers (G.T.R)...

La classification L.C.P.C utilise soit les résultats classiques d'essais de laboratoire (granulométrie, limites d'Atterberg), soit l'appréciation visuelle et des tests simples sur le chantier. Il faut avoir une grande expérience pour employer correctement la méthode rapide ou méthode de chantier.

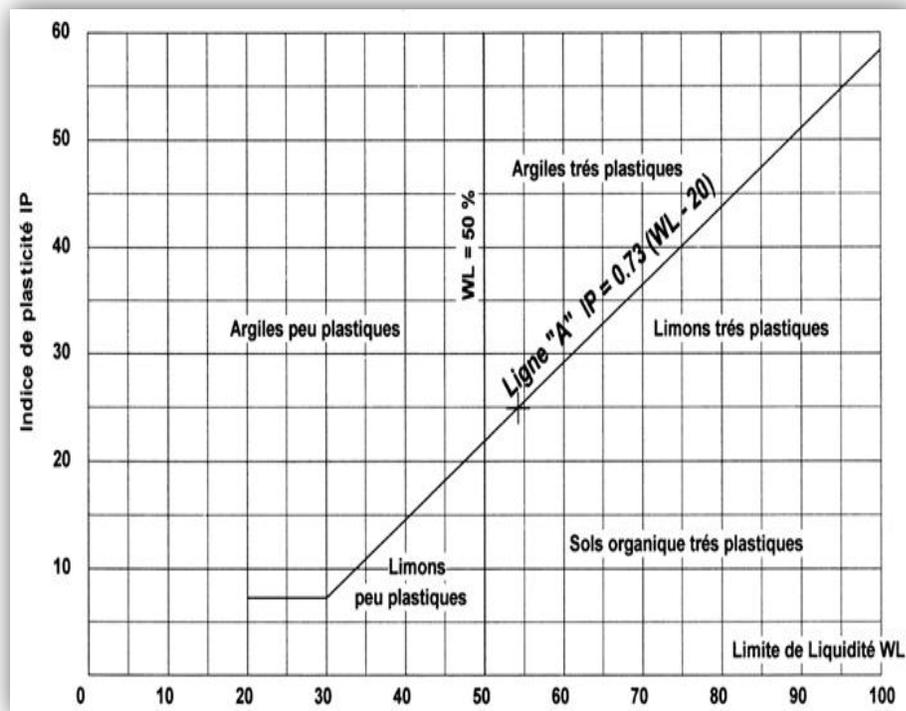
Pour particulièrement les sols évolutifs (fins) deux étapes indissociables sont à observer au laboratoire :

Une première subdivision (analyse granulométrique), d'après la proportion massique des grains inférieurs et supérieurs à 0,08 mm, permet de distinguer :

— les sols grenus : lorsque plus de 50 % des éléments  $> 0,08$  mm

— les sols fins : quand plus de 50 % des éléments  $< 0,08$  mm

Les limites d'Atterberg sont par après déterminées et aident à classer le sol en utilisant la courbe de Casagrande.



**Fig1.2** : Diagramme de plasticité de Casagrande (Schon, 1965)

Dans la 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).

## 1.4 Les trois principaux sols

### 1.4.1 Les argiles

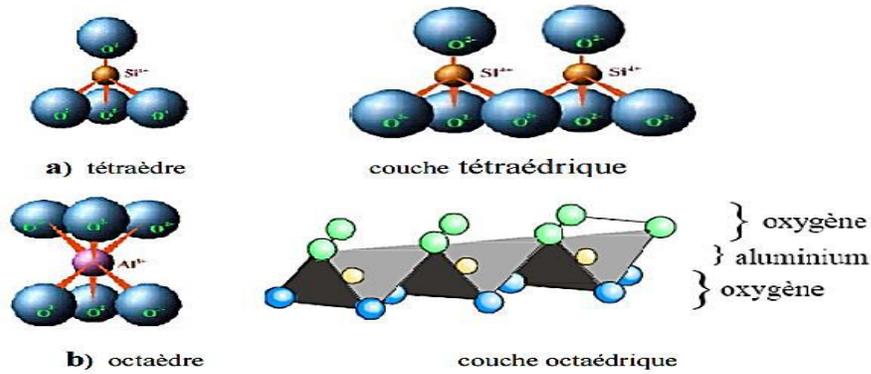
L'argile est une roche sédimentaire composée pour une large part de minéraux argileux, en général des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant une structure feuilletée (phyllosilicates) expliquant leur plasticité, ou fibreuse (sépiolite et palygorskite) expliquant leurs qualités d'absorption.

#### 1.4.1.1 Définition des minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des silicates d'alumine hydratés provenant de la décomposition des feldspaths et des micas, ils ont une formule chimique de la forme :  $(SiO_2)_M (Al_2O_3)_N (H_2O)_P$

Les particules d'argile sont formées d'un empilement de feuillets qui sont constitués par l'association de deux unités structurales de base :

- Unité Tétraèdre : au sommet du tétraèdre, il existe quatre ions d'oxygènes ( $O^{2-}$ ) enserrant un ion de silicium ( $Si^{4+}$ ), équidistant à chacun d'eux. Ces tétraèdres s'ordonnent entre eux pour former une couche tétraédrique.
- Unité Octaèdre : au centre d'octaèdre, Un ion d'Aluminium ( $Al^{3+}$ ) ou bien le magnésium ( $Mg^{2+}$ ) est équidistant aux six hydroxyles ( $OH^-$ ) des sommets. Ces octaèdres se combinent pour composer des couches planes dites couches octaédriques, et la liaison avec la couche tétraédrique se fait au niveau des oxygènes.



**Fig1.3 :** Structure de base des argiles (S.Caillère, 2016).

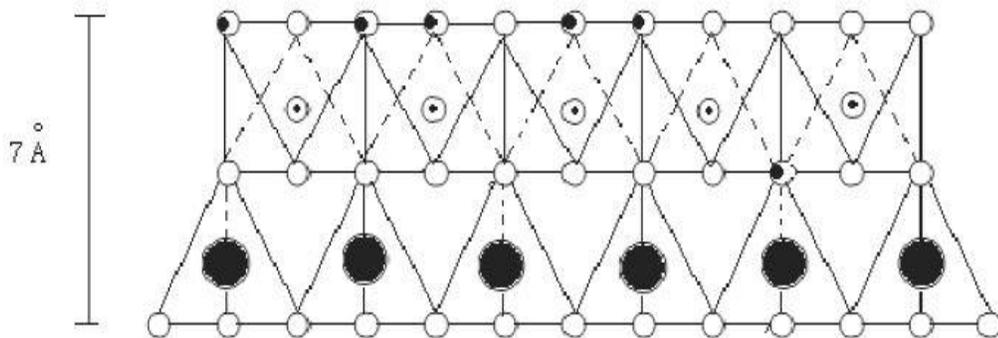
A partir des structures de base nous pouvons définir plusieurs familles d'argiles, selon le nombre de feuillets variable par particules et suivant le type d'argile considéré. Précisons actuellement les propriétés principales des trois grands groupes d'argile :

### 1.4.1.2 Les argiles du groupe de la kaolinite

La structure du groupe de la Kaolinite comprenant une couche tétraédrique (Si) et une autre octaédrique (Al). Dans la (figure 1.4) L'ensemble forme un seul feuillet de kaolinite de formule général:



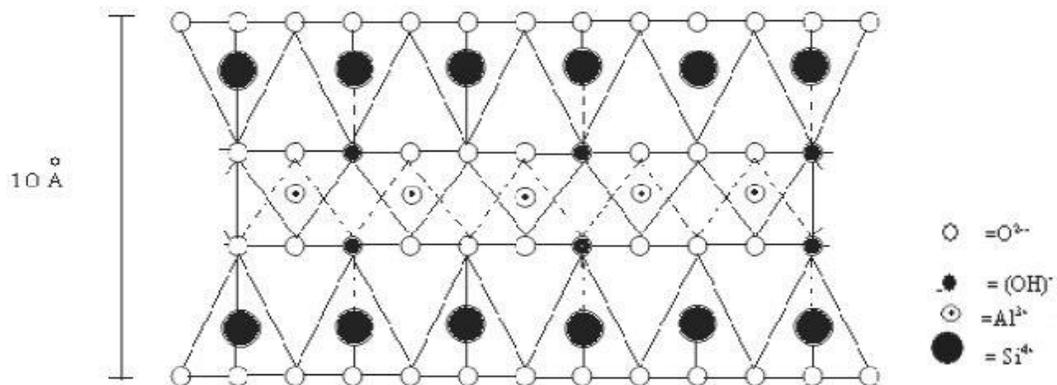
Notons que l'épaisseur du feuillet élémentaire est d'environ 7Å° mais les dimensions dans les deux autres directions sont infinies, Les intensités des liaisons d'hydrogènes entre éléments sont fortes ce qui n'autorise pas l'eau de circuler entre les feuillets et alors assurer la stabilité de ce minéral.



**Fig1.4 :** Structure cristallographique du feuillet la kaolinite (Zoubir, 2009)

### 1.4.1.3 Les argiles du groupe de l'illite (MICAS)

L'illite est l'un des minéraux argileux du groupe des micas le plus répandu dans la nature de diamètre équivalent moyen de  $0.3\mu\text{m}$  et d'une épaisseur de  $100 \text{ \AA}$ , il est connue par sa stabilité par rapport la montmorillonite, ils ont la même structure La différence provient du remplacement d'une partie de  $\text{Si}^{4+}$  par  $\text{Al}^{3+}$  qui atteint les 20% dans les tétraèdres et une liaison des ions  $\text{K}^+$  inter feuillets afin de rétablir l'équilibre des charges rompu par le remplacement. Cette liaison rend l'illite une argile non gonflante.



**Fig.1.5 :** Structure cristallographique du feuillet de l'illite, de la smectite et de la vermiculite : deux couches de tétraèdres  $\text{SiO}_4$  (T) encadrant une couche d'octaèdres  $\text{AlO}_6(\text{O})$ . Le cation interfoliaire lie deux feuillets consécutifs (Zoubir, 2009)

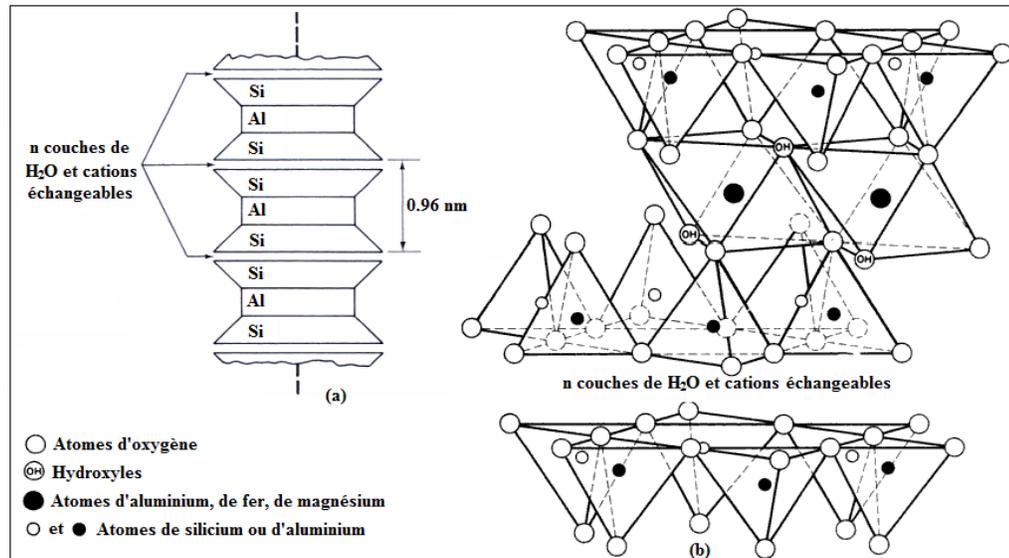
### 1.4.1.4 Les argiles du groupe des smectites (montmorillonite)

Elles se constituent d'une couche octaédrique comprise entre deux couches tétraédriques mais les liaisons entre feuillets sont plus faibles l'ensemble à la formule suivante :



La montmorillonite se caractérise par l'existence entre deux feuillets d'un certain nombre de couches d'eau contenant généralement des cations sodiques ou calciques libres, ce qui entraîne un écartement des feuillets variables suivant les conditions du milieu.

Le déficit de charge est composé par des cations généralement  $\text{Na}^+$  ou  $\text{Ca}^{2+}$  situés entre les feuillets et qui sont échangeables ou compensateurs (figure. 1.6).



**Fig. 1.6 :** (a) Schéma de la structure de la montmorillonite (Lambe, 1953), (b): vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite (Grim, 1959).

### 1.4.1.5 Problèmes des sols argileux

En Afrique particulièrement les problèmes de gonflement-retrait d'argile engendrent des dommages conséquents sur les structures comme dans le monde entier. En Algérie le gonflement, glissement, tassement sont des risques multipliés selon la sismicité de la zone et aussi l'activité anthropique.

#### 1.4.1.5.1 Le gonflement

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

Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes et varient en fonction de leur teneur en eau) ; la variation de volume d'un terrain est consécutive à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle) et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'élément jointifs).

#### 1.4.1.5.2 Le tassement

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

### 1.4.1.5.3 Les Glissements

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

### 1.4.1.6 Pathologies rencontrées dans les ouvrages

Les désordres provoqués par le gonflement affectent généralement les constructions apportant de faible contrainte sur le sol support. La pathologie dépend du type d'ouvrage. Les phénomènes de retrait et de gonflement de certains sols argileux ont été observés depuis longtemps dans les pays à climat aride et semi-aride où ils sont à l'origine de nombreux dégâts causés tant aux bâtiments qu'aux réseaux et voiries.

#### 1.4.1.6.1 Cas des bâtiments

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

- fissuration des structures ;
- Distorsion des ouvertures ;
- rupture des canalisations ;
- décollement des bâtiments.

La (figure 1.7) représente des fissures au niveau d'une structure légère de génie civil due au gonflement du sol de fondation.



**Fig 1.7** : Fissures au niveau d'une structure de génie civil.

### 1.4.1.6.2 Cas des chaussées

Dans le cas de chaussée le cycle de saturation-séchage du sol dû aux variations des saisons (été, hiver) crée des vides dans le corps de chaussée ce qui permet l'infiltration de l'eau, la diminution de la cohésion dans le matériau constituant la chaussée et le gonflement de la chaussée. Ce gonflement s'observe par des fissures longitudinales assimilées par la chute de la portance du sol et accélérées par le flux routier. La (figure 1.8) nous donne un aperçu de ces pathologies.



**Fig 1.8** : Déformation d'une chaussée de sol instable.

### 1.4.2 Les limons

On appelle « sol limoneux » une terre riche en limons. Typique des bords de Loire, ce sol particulier a été déposé par les alluvions. Il s'oppose au sol sableux comme au sol argileux.

Le sol limoneux contient moins de 10 % d'argile. Il est formé de grains de diamètre moyen : plus gros que le sable et plus petits que les argiles. Selon sa texture, on parle de « limon léger » ou de « limon moyen ».

### 1.4.3 Les marnes

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

- les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35 % de carbonate de calcium ;
- les marnes 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 ou en souterrain pour donner respectivement : de la chaux avec les marnes argileuses ; de la chaux hydraulique avec les marnes proprement dites ; et du ciment avec les marnes calcaires ou calcaires marneux. Elles ont également été utilisées pour amender les terres des exploitations agricoles. D'une façon générale, les marnes sont une assise de fondations bonne à moyenne en l'absence de gypse. En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse, avec risque de formation de fontis.

Les marnes sont des roches relativement tendres, elles subissent une géodynamique très active à leur surface et leur fragilité les rend très vulnérables aux aléas de la nature et des hommes. Une combinaison de facteurs naturels et anthropiques a provoqué une érosion hydrique intense qui s'est manifestée par une dégradation des sols et une diminution importante de leur productivité.

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

## 1.5 Méthodes d'amélioration des sols instables

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

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

- par sol de remplacement (remplacement du mauvais sol par le bon) ;
- mécanique (compactage de surface, compactage dynamique, vibrocompactage...etc.) ;
- hydrodynamique (préchargement ou précompression, accélération de la consolidation par les drains verticaux...etc.) ;

- thermique (congélation, cuisson...etc.) ;
- chimique (ajouts de produits minéraux: chaux, ciment, pouzzolane naturelle, fumé de silice, cendres volantes, laitier...etc.) ;
- par renforcement (terre renforcé, matériaux synthétiques...etc.) ;
- par substitution ou inclusion souples constituées de gravier (colonnes ballastées, inclusion solide...etc.) ;
- hydraulique (drainage, rabattement de la nappe...etc.) ;
- électrique (électro-osmose, électrochimie...etc.) ;

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

Dans ce chapitre, nous allons présenter en bref un exemple pour chaque technique. Cependant, la technique de la stabilisation chimique sera détaillée où nous présenterons quelques principaux additifs (chaux et ciment) qui peuvent être utilisés ainsi que le mécanisme de la stabilisation des sols fins aux liants hydrauliques.

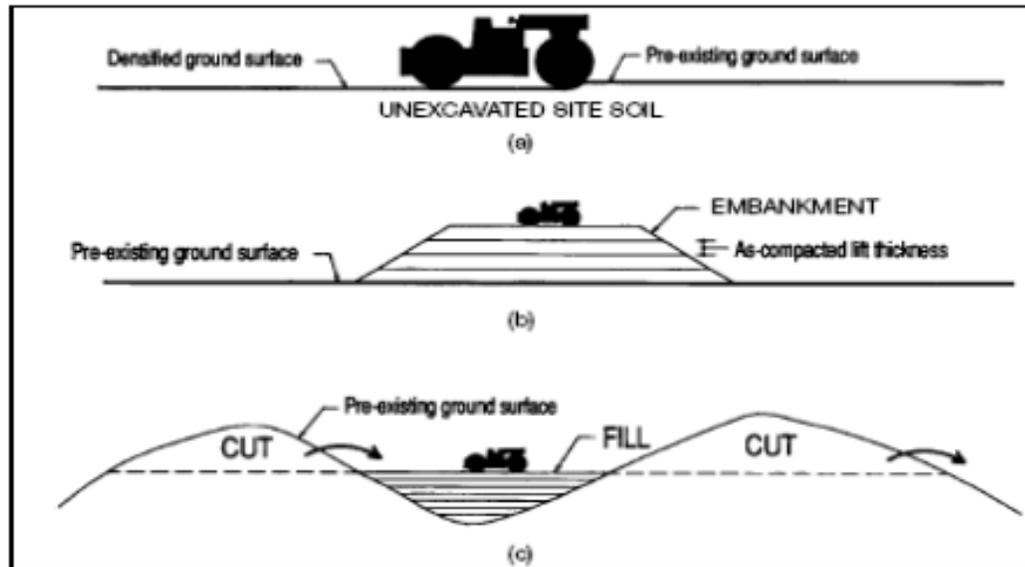
## 1.5.1 Méthodes mécaniques

### 1.5.1.1 Compactage de surface

Le compactage est la densification des sols par application d'énergie mécanique en vue d'améliorer les propriétés géotechniques des sols (figure1.9). La densité obtenue après compactage dépend de la teneur en eau du sol. En effet, la masse volumique sèche du sol augmente avec la teneur en eau jusqu'à un optimum, puis elle décroît avec l'augmentation de la teneur en eau. Donc il est important de déterminer cet optimum pour obtenir des sols suffisamment denses. 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), elle sert à :

- augmenter la densité jusqu'à l'optimum ;
- améliorer la résistance donc la capacité portante du sol ;
- diminuer la déformabilité ainsi qu'une réduction de la perméabilité ;
- réduire ou éliminer les risques de tassement ;

- augmenter la stabilité des talus ;
- prévenir la liquéfaction des sols ;
- limiter les variations de volumes indésirables causées, plus souvent, par le phénomène retrait-gonflement.



**Fig. 1.9** : Types de compactage de surface [Lawton, 2004].

### 1.5.1.2 Compactage dynamique

Le compactage dynamique permet de densifier les sols à grande profondeur sous l'effet d'impacts de forte énergie obtenus par la chute d'une masse sur la surface à compacter. Le principe de base consiste à transmettre des chocs de forte énergie à la surface d'un sol initialement compressible et de faible portance afin d'en améliorer en profondeur les caractéristiques mécaniques. Le pilonnage est associé à un contrôle géotechnique particulièrement intensif de manière à atteindre le plus rationnellement possible le but recherché. Cette technique est applicable dans tous les types de sols à comportement granulaire. Il s'applique particulièrement bien aux remblais hétérogènes ainsi qu'aux terrains de composition variable. Il peut s'appliquer aussi bien à des sols non saturés qu'à des sols situés sous la nappe.

En pratique, la technique consiste à laisser tomber en chute libre ou en quasi-chute libre, d'une hauteur de 10 à 30 mètres, une masse pesant de 10 à 35 tonnes (figure 1.10). Les impacts sont répétés selon un maillage défini en fonction du site à traiter et du futur ouvrage. Les paramètres

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

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



**Fig. 1.10** : Chantier d'un compactage dynamique profond.

Cette technique présente plusieurs champs d'applications à savoir:

- traitement sous bâtiments industriels, plates-formes portuaires et aéroportuaires, remblais routiers et ferroviaires...etc. ;
- particulièrement adaptée pour le traitement des sols de composition variable ou des remblais hétérogènes inertes contenant des blocs, source de faux-refus pour les solutions de renforcement de sol (inclusions, colonnes ballastées...etc.) ;
- bien adaptée pour les ouvrages de grande surface par sa très grande vitesse d'exécution ;
- bien adaptée et couramment utilisée pour réduire, ou voire éliminer, le risque de la liquéfaction des sols.

### 1.5.1.3 Vibrocompactage

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

Ces vibrations, émises par l'outil, se propagent de grains en grains et provoquent un réarrangement optimal du volume initial occupé. La réduction de la porosité du matériau permet aussi d'augmenter sa capacité portante de manière significative (figure 1.11).



**Fig. 1.11** : Vibrocompactage.

Ce procédé de vibrocompactage est appelé aussi la vibro-flottation. Cette méthode trouve son application dans les sols granulaires particulièrement les sables propres et les sables silteux avec une teneur en fines inférieure à 20%. Les vibrations engendrent un phénomène localisé de liquéfaction sous l'effet des surpressions interstitielles qui met les grains du sol dans un état liquéfié. Les grains se réarrangent en un état plus dense.

### 1.5.1.4 Induction hydraulique

Elle se distingue du vibrocompactage par l'utilisation d'un vibreur spécifique de fabrication Keller, monté sur un porteur qui permet d'exercer en plus des vibrations, une poussée sur celui-ci. L'induction hydraulique combine donc les vibrations horizontales générées par le vibreur et le

refoulement latéral du sol pour obtenir un compactage optimal de celui-ci. Dans le cas de plot isolé de substitution, le refoulement latéral du matériau compacté par induction hydraulique permet d'assurer un confinement du sol décomprimé en périphérie.

En fonction de la nature et de l'importance des charges à reprendre, on peut procéder à un traitement dans la masse par un maillage régulier ou un traitement localisé sous des semelles (figure 1.12). Si des couches superficielles de sols limono-argileux non compactables sont présentes, il faudra procéder au préalable à une purge partielle ou totale de ces matériaux pour les remplacer par un matériau sablo-graveleux. Le plot substitué induit peut être associé par un traitement en profondeur de type colonnes ballastées, inclusions rigides ou colonnes à modules mixte (CMM).



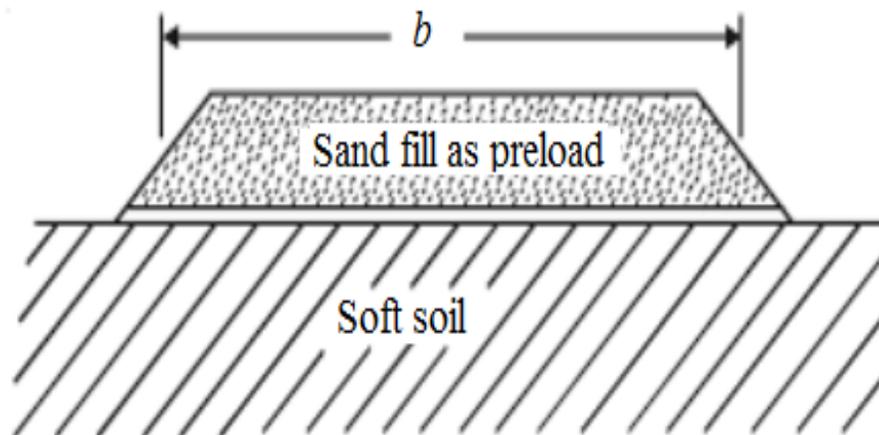
**Fig 1.12:** Amélioration d'un terrain par induction hydraulique (Substitution du sol par du gravier dans un chantier à Saint Martin d'Hères en 2006, France).

La technique d'induction hydraulique présente beaucoup d'avantages à savoir dans le cas de plot isolé de substitution, le refoulement latéral du matériau compacté par inclusion hydraulique permet d'assurer un confinement du sol décomprimé en périphérie. De plus, cette technique permet d'obtenir des tassements faibles sous les sollicitations cycliques (machines vibrantes, éoliennes, turbines...etc.) et un compactage optimal des matériaux de substitution même sous l'eau.

## 1.5.2 Méthodes hydrodynamiques

### 1.5.2.1 Préchargement ou Précompression

La technique de précompression ou de préchargement est tout simplement de placer une surcharge en supplément au dessus du sol qui nécessite un grand tassement de consolidation qui doit avoir lieu avant que la construction soit réalisée (figure 1.13). Une fois la consolidation suffisante a eu lieu, la surcharge peut être retirée et le processus de construction peut être entamé. D'une manière générale, cette technique est plus efficace et adéquate dans le sol argileux. Comme les sols argileux ont une faible perméabilité, la consolidation souhaitée prend très longtemps à se produire, même avec une surcharge en supplément très élevée. Par conséquent, avec les calendriers de construction serrés, le préchargement peut ne pas être une solution réalisable. A ce moment là, des drains de sable verticaux peuvent être utilisés pour accélérer le processus de consolidation en diminuant la longueur des chemins de drainage. L'installation des drains de sable verticaux offre une meilleure solution pour accélérer le processus de consolidation pour acquérir une résistance au cisaillement suffisant (Radhakrishnan et al. 2010).



**Fig. 1.13** : Amélioration d'un sol mou par la technique de préchargement (Varghese, 2005).

## 1.5.3 Méthodes thermiques

La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le

niveau de la nappe. Ces propriétés font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé.

○ *Cas des sols fins*

La méthode de renforcement temporaire des sols par congélation, développée principalement pour les matériaux grenus (sables, graviers), peut être appliquée aux argiles molles et aux limons, lorsque aucune autre solution n'est possible. L'effet de la congélation dépend de la température (il augmente quand la température diminue). Par ailleurs, il faut réaliser la congélation le plus rapidement possible pour limiter le gonflement du sol et il faut tenir compte de la déstabilisation du massif de sol au dégel.

Les techniques de refroidissement utilisées reposent, comme pour les sables et les graviers, sur la circulation d'un fluide froid (azote liquide, habituellement) dans des tubes enfoncés dans le massif de sol

○ *Cas des sols grenus*

La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé. La congélation est réalisée par circulation de saumure ou d'un gaz réfrigérant (azote liquide, habituellement) dans des tubes mis en place dans le sol à traiter. L'utilisation d'azote liquide permet à une progression rapide du front de gel et une plus grande souplesse dans le maintien de la zone gelée (figure. 1.14).

Le problème majeur de cette technique c'est que l'augmentation du volume de l'eau lors de sa transformation en glace peut engendrer des désordres dans le voisinage de la zone traitée et doit être prise en compte lors de l'élaboration du projet de traitement.



**Fig. 1.14** : Chantier utilisant la congélation du sol. Killer France (2013)

#### **1.5.4 Méthodes Chimiques**

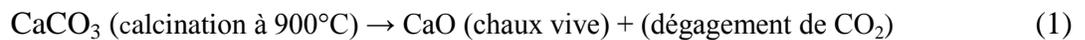
Traiter un sol consiste à mélanger intimement ses éléments à une certaine quantité d'addition. Cette opération provoque une modification physico-chimique qui intervient dans la stabilisation du sol telles que les réactions d'échange de base avec les particules d'argile (cation) et les réactions pouzzolaniques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

Le traitement des sols en place ou rapportés par l'utilisation des additifs seuls ou combinés (ciment, chaux, pouzzolane naturelle, cendres volantes, fumée de silice...etc.) est actuellement très largement employé dans la plupart des pays du monde.

### 1.5.4.1 Utilisation de la chaux

La chaux a été utilisée depuis longtemps comme stabilisateur des sols sensibles à l'eau (remblai, couches de formes... etc.). De plus, la chaux est employée dans de nombreux domaines tels que le bâtiment, la sidérurgie, la dépollution. Le premier guide de base a été établi par le SETRA et le LCPC en 1972 : «Recommandation pour le traitement des sols fins à la chaux». Le second a été élaboré en 1992 nommé GTR (Guide des terrassements routiers, Réalisation des remblais et des couches de formes). Le dernier qui les complète issu en 2000 portant le titre «Traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques». Ces guides peuvent fournir des informations importantes sur le choix du type de traitement à utiliser (Le Borgne 2010).

La chaux est généralement une poudre fine obtenue par la calcination de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), à une température supérieure à  $900^\circ\text{C}$ , qui donne lieu à la naissance d'un oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) ou la chaux vive munie d'un dégagement du gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) (Eq. 1).



Au contact de l'eau, la chaux vive obtenue par calcination, peut se transformer en chaux éteinte ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) accompagné par un fort dégagement de chaleur, (Eq. 2).



La chaux vive  $\text{CaO}$  peut, après hydratation par l'humidité ambiante ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), se carbonater sous l'action du  $\text{CO}_2$  atmosphérique, (Eq. 3).



Les caractéristiques des chaux aériennes vis-à-vis du traitement des sols dépendent de la forme sous laquelle elles sont utilisées, diverses formes de chaux étant utilisées dans le traitement des sols. Les formes les plus communes sont la chaux vive et la chaux éteinte. La réactivité définie par la norme (NF P 98-102). Elle exprime la rapidité d'action d'une chaux lors de son emploi et est essentiellement fonction de la surface de contact entre la chaux et le corps avec lequel elle réagit. Elle dépend donc de la surface spécifique et de la finesse de la chaux.



Fig. 1.15 : Chantier de traitement d'un sol à la chaux [France ,2009]

#### 1.5.4.2 Mécanisme de stabilisation à la chaux

Le principe de l'action de chaux avec les minéraux argileux en présence d'eau, peuvent être résumés en deux phases principales à savoir:

*a) Action à court terme*

Elle peut se résumer en cinq étapes successives (figure 1.16) (Locat et al. 1990; Bell, 1996; Cabane, 2004; Le borgne, 2010):

- l'ajout de la chaux provoque l'évaporation de l'eau avec l'ionisation de la Chaux éteinte qui libère des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$  ;

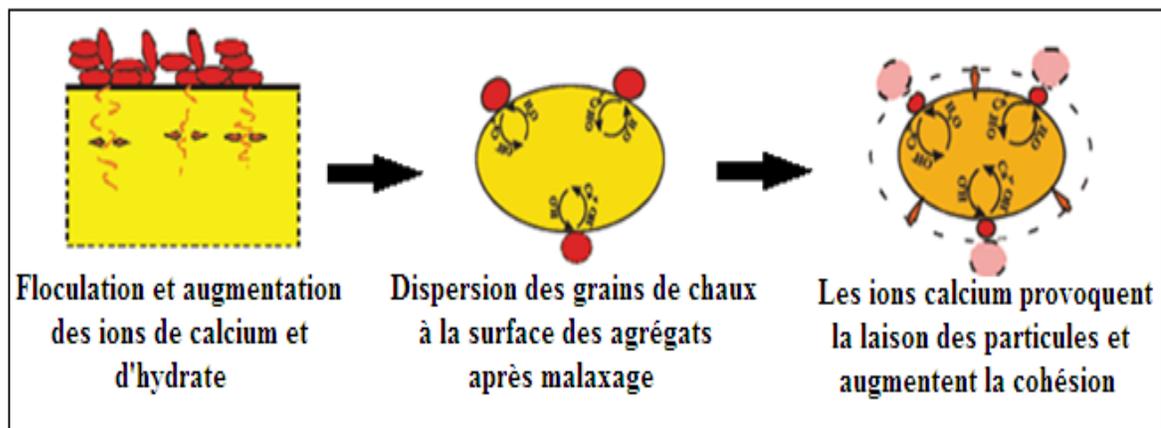
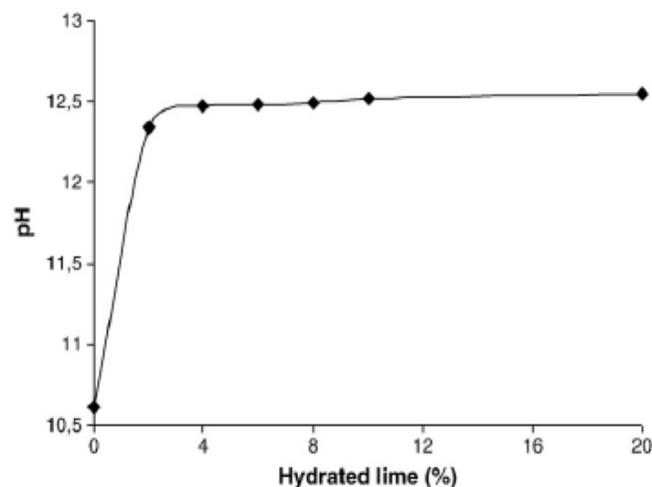


Fig. 1.16: Action de la chaux à court terme (modification par floculation), (Cabane, 2004).

- la forte concentration en ion  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$  entraîne un échange cationique entre les ions absorbés et les cations apportés qui modifie la CEC et augmente le pH du sol à plus de 12.5 (figure 1.17) (Al-Mukhtar et al. 2010) ;
- réduction de la taille de la double couche des particules argileuses et diminution des forces de répulsion entre elles ;
- floculation (par l'ajout de chaux) et agrégation (par malaxage) des particules argileuses ;
- modification des propriétés géotechniques, formation des grumeaux de taille millimétrique et diminution de la sensibilité à l'eau.



**Fig. 1.17 :** Effet de la chaux sur le pH d'une argile (bentonite très plastique riche en kaolinite et en montmorillonite), (Al-Mukhtar et al. 2010).

*b) Action à moyen et à long terme*

L'amélioration des caractéristiques mécaniques ainsi que la diminution ou la suppression du gonflement est liée à la formation des nouveaux produits cimentaires par l'action de chaux à long terme qui peut se faire comme suit:

- la forte concentration en ion  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$  augmente le pH du sol ( $\text{pH} \geq 12.5$ ) ;
- un fort pH, entraîne la dissolution de la silice et de l'alumine des particules argileuses et rentrent en réaction avec le calcium apporté par la chaux d'où viennent les réactions pouzzolaniques ;
- formation des produits cimentaires à savoir les silicates de calcium hydratés (C-S-H) et les aluminates de calcium hydratés (C-A-H).

## 1.6 Conclusion

Les facteurs qui interviennent dans le choix entre les différentes techniques d'amélioration sont assez divers tels que les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la destination de l'ouvrage à implanter sur ce sol, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement

Les méthodes d'amélioration mécaniques et hydromécaniques des sols sont coûteuses et demandent un savoir faire élevé ce qui n'est toujours permis dans les pays en voie de développement comme l'Algérie. De plus, les méthodes d'amélioration thermiques des sols restent elles aussi efficaces mais dont l'emploi reste limité en raison de leurs coûts très élevés.

Par ailleurs, la méthode d'amélioration chimique des sols par addition de la chaux, ou d'autres ajouts reste la plus utilisée et la moins onéreuse. Cette technique s'est développée très rapidement à travers le monde et qui est encore menée à connaître une importante croissance. Aisée à mettre en œuvre, économique et efficace, elle permet surtout d'éviter de lourds travaux de terrassement destinés à rejeter les sols inadéquats et à faire appel à des matériaux d'emprunt de bonne qualité. Dans le chapitre suivant il est exposée une analyse des travaux effectués par des chercheurs concernant l'effet de la durée de cure sur les différents propriétés géotechniques (physiques et mécaniques) des sols fins argileux améliorés par la chaux.

# Chapitre 2

---

**Effet des additifs minéraux  
en présence et en absence  
des sulfates sur les sols  
instables**

## 2.1 Introduction

Les caractéristiques médiocres d'un sol ont un impact majeur sur les ouvrages de génie civil et leurs durées de vie. Ces sols peuvent être améliorés avec des additifs minéraux (cendres volantes, fumé de silice, etc.) ou cimentaires (chaux, ciment, etc.). On peut ajouter ces additifs aux divers types de sols pour améliorer les caractéristiques géotechniques. L'efficacité de ces additifs dépend de la nature du sol traité et la quantité d'additif ajoutée. Les additions couramment utilisés sont le ciment, la chaux et les sous produits industriels qui sont considérés comme une pouzzolane artificielle.

De nombreuses études et recherches expérimentales ont été menées sur l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux. Le potentiel de la stabilisation s'est avéré dépendre du type de sol, la quantité des stabilisants, des combinaisons de la stabilisation et de l'âge (durée de cure).

Dans ce chapitre, on présente une synthèse des travaux de recherche effectués par plusieurs chercheurs sur l'effet des additifs minéraux en présence et absence des sulfates sur les sols instables.

## 2.2 Effet de la chaux

### 2.2.1 Effet de la chaux sur la plasticité

En absence des sulfates, l'addition de la chaux provoque une amélioration de la consistance liée à une réduction significative de l'indice de plasticité qui se traduit par une augmentation de la limite de plasticité s'accompagnent ou non d'une augmentation de la limite de liquidité. Ainsi, la surface spécifique est réduite immédiatement après l'incorporation de la chaux à l'issue de la floculation des argiles (Ola, 1977; Indraratna, 1996, Guney et al., 2007; Kavak and Kyarah, 2007; Al-Mukhtar et al., 2012; Celik and Nalbantoglu, 2013; Khemissa and Mahamedi, 2014; Gadouri et al. 2015, 2016a, 2016b, 2017a, 2017b, 2017c, 2017d, 2018, 2019).

Kinuthia et al. (1999) ont montré que la limite de liquidité d'une kaolinite augmente de 60 à 73% pour l'addition de 3% de chaux et elle reste constante jusqu'à 14%, mais elle diminue graduellement au-delà de cette teneur en chaux (Fig. 2.1). Cependant, la limite de plasticité continue à augmenter quelque soit la teneur en chaux. Cependant, l'indice de plasticité du sol reste toujours en diminution malgré l'augmentation de la teneur en chaux. La réduction de l'indice de plasticité est accompagnée plus souvent par l'augmentation de la limite de plasticité plutôt que la diminution de la limite de liquidité (George et al. 1992; Al-Mukhtar et al, 2010). D'ailleurs, Sakr et al. (2009) ont indiqué que la stabilisation d'un sol argileux très

organique par différents pourcentages de chaux provoque une augmentation de la limite de liquidité avec l'âge de cure (7, 15, 30 et 60 jours) qui est probablement lié au remplacement des ions de  $\text{Na}^+$  qui se présentent dans le sol par des ions de  $\text{Ca}^{2+}$  apportés par l'addition de la chaux. Un comportement inverse a été observé par Indraratna (1996) et Jha and Sivapullaiah (2015) où la limite de liquidité des sols stabilisés diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux additionnée.

D'après Locat et al. (1990), l'augmentation de la limite de plasticité s'accompagne ou non d'une augmentation de la limite de liquidité. Cette évolution provoque un déplacement du domaine de plasticité vers des teneurs en eau plus importantes. Le taux du décalage de l'indice de plasticité est lié à la quantité de chaux utilisée. L'évolution de la consistance favorise la granulation du sol lors du malaxage. Différents facteurs influencent la granulation (floculation) du sol à savoir la nature du sol, la teneur en eau et le dosage en chaux. Ce phénomène est expliqué par l'augmentation des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$  dans le sol. En effet, suite à des échanges cationiques qui se produisent alors entre les ions absorbés à la surface des particules argileuses et les cations apportés par l'addition de la chaux, la capacité d'échange cationique (CEC) est donc modifiée. La modification de la CEC et l'augmentation de la concentration en électrolytes ( $\text{OH}^-$ ) ont pour effet de réduire la taille de la double couche électrique des particules argileuses et ainsi de réduire les forces de répulsion entre elles. Celles-ci ont alors tendance à s'agréger, c'est le processus de floculation.

Afès et al. (2000) ont reporté que la limite de plasticité d'une argile stabilisée par 6% de chaux augmente de 24% jusqu'à 32.4 et 34% après une cure de 7 et 30 jours, respectivement. Le même comportement a été observé par plusieurs chercheurs (Attoh-Okine, 1995; Okagbue and Yakubu, 2000; Yong and Ouhadi, 2007). Cela peut être expliqué par l'utilisation de la chaux qui conduit à la floculation des particules d'argiles en causant une augmentation immédiate de la limite de plasticité du sol stabilisé. De plus, l'augmentation de la limite de plasticité provoque une réduction des propriétés plastiques du sol stabilisé. Cela peut être lié à l'altération du film d'eau entourant les minéraux argileux dans le sol (Osula, 1991).

En présence des sulfates, Kinuthia et al. (1999) ont étudié l'influence des sulfates monovalents ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) et divalents ( $\text{CaSO}_4$  et  $\text{MgSO}_4$ ) sur les paramètres de consistance d'une kaolinite traitée à 6% de chaux Figure 2.1. Ils ont constaté que toutes les limites d'Atterberg varient en fonction du type et de la concentration en sulfate utilisé. De plus, les sulfates divalents présentent une variation cadencée tandis que les sulfates monovalents montrent une variation perturbée. En effet, pour des fortes concentrations, les sulfates divalents diminuent fortement la plasticité du sol stabilisé plus que les sulfates monovalents. Cependant, la réduction de la plasticité du sol stabilisé dépend de la

concentration du sulfate utilisé et du type de cations qui s'attachent à l'anion sulfate ( $\text{SO}_4^{-2}$ ). Un comportement similaire a été observé par Celik and Nalbantoglu (2013) où ils ont constaté que l'indice de plasticité d'un sol argileux traité avec 5% de chaux diminue de 32% à 15% en présence de 2000 ppm de sulfate de sodium alors qu'il augmente jusqu'à 34 et 38% en présence de 5000 et 10000 ppm de sulfate de sodium, respectivement.

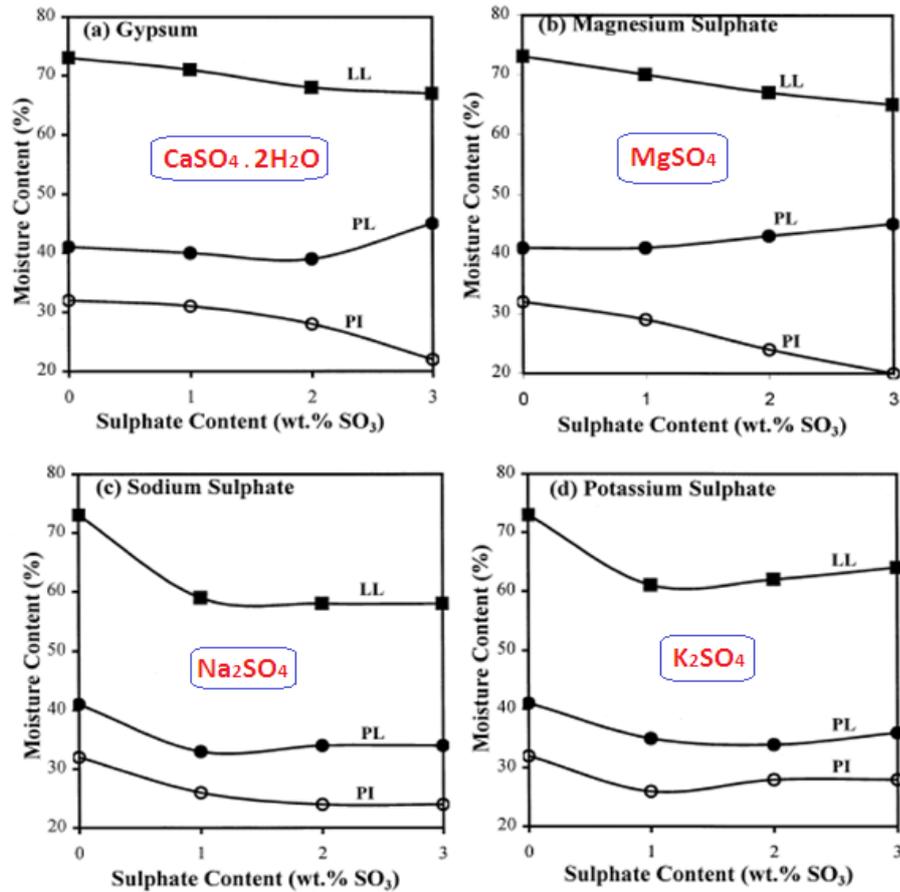


Fig. 2.1 : Effet des sulfates monovalents et divalents sur les limites d'Atterberg d'une kaolinite traitée à 6% chaux, (Kinuthia et al. 1999).

Sivapullaiah et al. (2000) ont étudié l'effet apporté par les différentes concentrations (0.5, 1 et 3%) d'un sulfate monovalent ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et divalent ( $\text{CaSO}_4$ ) sur la limite de liquidité d'un sol montmorillonitique traitée à 6% de chaux éteinte. Les résultats obtenus ont montré que la limite de liquidité augmente avec l'augmentation de la concentration en sulfate à savoir que le sulfate de sodium a une influence considérable par rapport au sulfate de calcium Tableau 2.1. Il s'avère que le taux d'augmentation de la limite de liquidité dépend de la concentration en sulfate utilisé et du type de cation associé à l'anion sulfate. Par contre, Kinuthia et al. (1999) ont constaté que la limite de liquidité d'une kaolinite traitée avec 6% de chaux en présence des mêmes concentrations en sulfate monovalent ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) décroît initialement pour une

faible concentration (1%.SO<sub>3</sub>) puis elle augmente avec son augmentation (2 et 3%SO<sub>3</sub>). Contrairement au sulfate divalent (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), la limite de liquidité diminue avec leur augmentation. Cela mis en évidence l'effet de la nature des minéraux argileux qui se présentent dans les sols du fait que les sols montmorillonitiques possèdent généralement une capacité d'échange cationique (CEC) bien plus élevée que celle des sols kaoliniques.

**Tableau 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 (%)
<b>Sol naturel (Montmorillonite)</b>	0.0	68.0
	0.5	78.6
<b>Sulfate monovalent (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)</b>	1.0	78.9
	3.0	82.7
	0.5	70.0
<b>Sulfate divalent (CaSO<sub>4</sub>)</b>	1.0	73.0
	3.0	76.0

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

### 2.2.2 Effet de la chaux sur le compactage

En absence de sulfates d'après Bell (1996) l'addition de la chaux avec les sols argileux augmente leur teneur en eau optimale et réduit leur densité sèche maximale, le LPCP, SETRA (2000) confirme ces résultats figure 2.2. Bell (1996) a constaté (Tableau 2.2) une densité de compactage plus élevée a été obtenue par l'argile de kaolinite, que par les argiles expansibles tel que la montmorillonite. Dans les trois sols étudiés le quartz a développé la densité la plus élevée.

Tab 2.2 : Effet de la chaux sur le compactage de la kaolinite, montmorillonite, quartz (Bell, 1996).

Matériaux	Teneur en chaux optimale(%)	Teneur en eau optimale(%)	Densité sèche maximale (Mg/m <sup>3</sup> )
Kaolinite	0	29	1.4
	6	31	1.33
Montmorillonite	0	20	1.29
	4	25	1.15
Quartz	0	28	1.41
	6	32	1.40

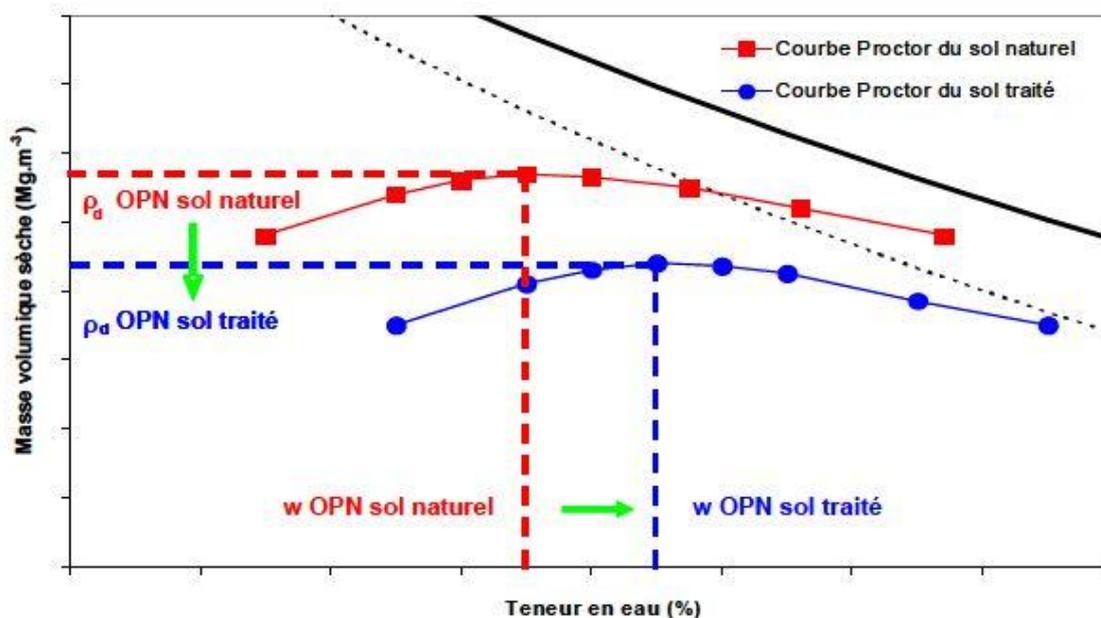


Fig. 2.2 : Modification des caractéristiques de compactage d'un sol suite à l'ajout de chaux, d'après le GTS (LCPC –SETRA, 2000)

En présence de sulfates Kinuthia et al. (1999) ont étudié l'influence des sulfates monovalents (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) et divalents (CaSO<sub>4</sub> et MgSO<sub>4</sub>) sur les paramètres de compactages d'une kaolinite traitée à 6% de chaux. Les résultats trouvés montrent que la densité sèche maximale diminue en présence de sulfate : Dans le cas des sulfates monovalents on a une variation non-uniforme avec la concentration et le sulfate de potassium donne une plus faible valeur de densité. Alors que les sulfates divalents diminuent avec la concentration. Les résultats

montrent aussi que la teneur en eau optimum augmente : pour les sulfates monovalents on a une augmentation de pour les faibles concentrations 1% et une diminution en forte concentration 2 à 3%. Alors que pour les sulfates divalents l'augmentation est régulière Figure.2.3.

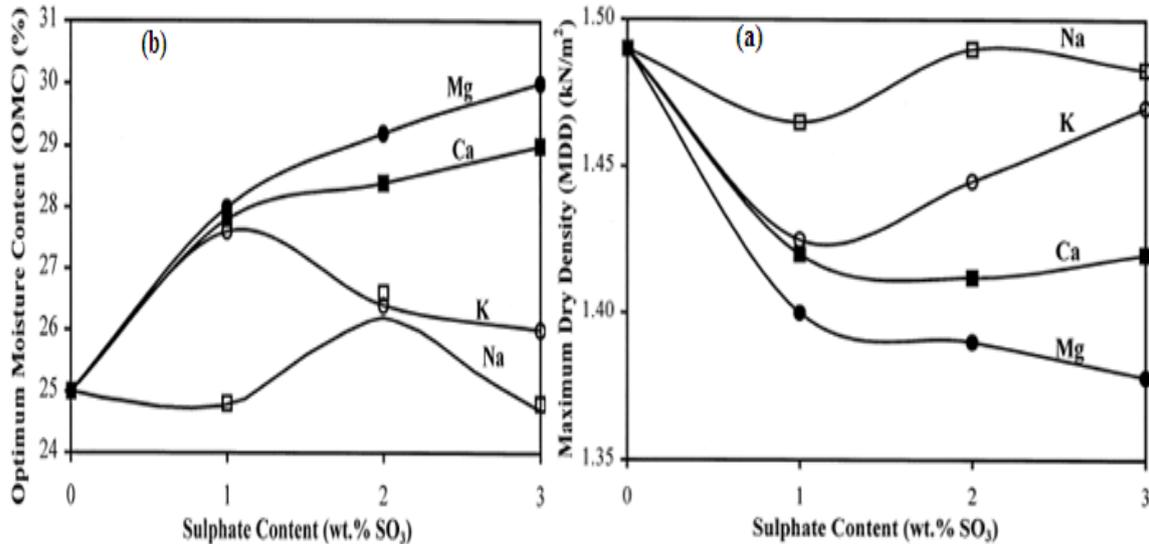


Fig : 2.3 : l'effet des différents types de cations sulfatiques sur la densité sèche maximale (a), et la teneur en eau optimum (b), d'une kaolinite sans présence de sulfates, (Kinuthia et al, 1999).

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

En absence des sulfates, plusieurs chercheurs (Ingles and Metcalf, 1972; Al-Rawi, 1981; Lees et al., 1982; Bell, 1988; Locat et al., 1990; Rao and Venkataswamy, 2002; Le Borgne, 2010; Al-Mukhtar et al., 2012) ont indiqué que l'effet de l'addition de la chaux sur la résistance d'un sol dépend de nombreux facteurs:

- le type du sol ;
- le temps et la méthode de cure ;
- la teneur en eau et la densité sèche ;
- le temps séparant le malaxage du compactage du sol.

D'après Wang (2002), la résistance à la compression non confinée est l'une des essais qui permet de faire une bonne évaluation de la capacité portante des sols traités du fait que la résistance est directement liée à la densité du sol. A savoir que la densité dépend de sa part de l'énergie du compactage et de la teneur en eau. C'est pour cette raison qu'on prépare les éprouvettes de sol en fonction du couple (OMC et MDD).

George et al. (1992) ont trouvé que la résistance mécanique de deux sols de plasticité moyenne augmente avec le dosage en chaux. Les mêmes résultats ont été obtenus par

plusieurs chercheurs (Attoh-Okine, 1995; Ola, 1977; Bell, 1996; Ghobadi et al, 2014; Jha and Sivapullaiah, 2015). D'ailleurs, 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, Al-Mukhtar et al. (2010) ont étudié l'effet de différents pourcentages de chaux sur la résistance à la compression non confinée d'une bentonite très plastique. Pour 20% de chaux, la résistance à la compression non confinée a augmenté de 0.21 à 3.6 MPa après une cure de 90 jours. Le même comportement a été observé par Manasseh and Olufmi (2008) et Aldaood et al. (2014a, b). 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

En présence des sulfates, Dermatas and Meng (2003) ont reporté 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) a 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 80 KPa pour 7.5 et 10% de gypse.

Aldaoood et al. (2014a) ont reporté que l'utilisation de différents pourcentages de gypse seul ou combinée avec 6% de chaux dans la stabilisation d'un sol peu plastique fait augmenter considérablement sa résistance à la compression non confinée avec l'augmentation de la température et de la période de cure Figure 2.4. L'augmentation de la résistance est liée aux grains fins de gypse qui font améliorer la compacité par le remplissage des vides des échantillons traités et par conséquent l'augmentation de la résistance à la compression non confinée. Le même comportement a été observé par Segui et al. (2013).

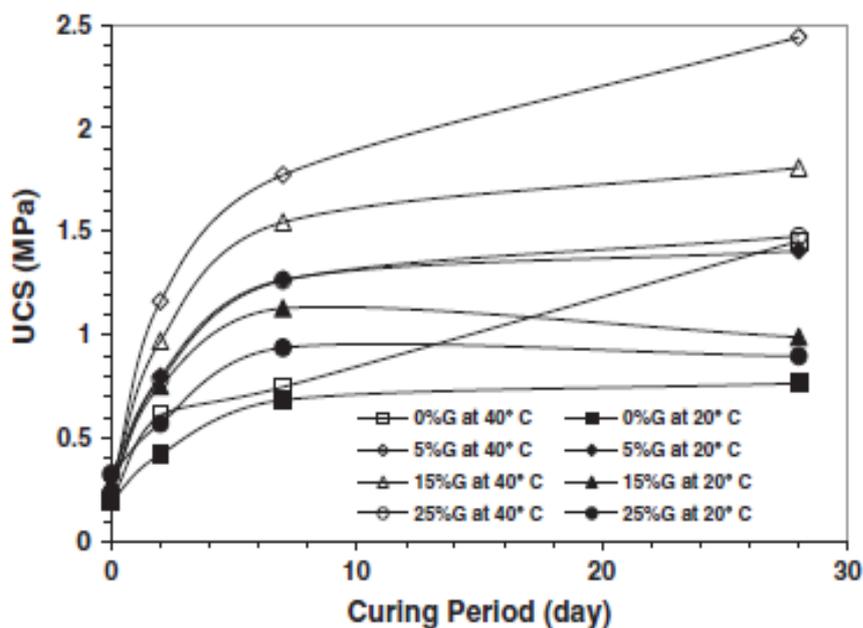


Fig. 2.4 : Effet apporté par l'utilisation de gypse comme additif sur la résistance à la compression non confinée d'un sol peu plastique traité à la chaux, (Aldaoood et al., 2014a).

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

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

De plus, Muntohar and Hantoro (2000) ont montré que pour une teneur de 10 % de chaux, l'angle de frottement interne et la cohésion se sont devenus respectivement 1.7 et 1.3 fois plus grand que celui du sol non traité. L'augmentation de l'angle de frottement interne est due à la floculation des particules des sols par l'action de chaux à court terme, tandis que celle de la

cohésion est attribuée à la formation des nouveaux produits de cimentation (C-S-H et C-A-H) suite à la réaction pouzzolaniques de chaux qui intervient à plus long terme. Ces produits font augmenter la cohésion des particules du sol stabilisé.

D'ailleurs, Sivapullaiah et al. (2000, 2006) .Ont observé que la nature minéralogique du sol traité fait influencer d'une façon significative sur les paramètres de cisaillement. En effet, l'effet apporté par l'utilisation de 6% de chaux comme additif sur les angles de frottement interne effectifs ( $\phi'$ ) et les cohésions effectives ( $C'$ ) de deux sols argileux, à savoir une montmorillonite très plastique (IP=47.5%) et une kaolinite peu plastique (IP=22%) était fortement différent. Il s'est avéré que la période de cure joue également un rôle très important dans l'évolution des paramètres de cisaillement Tableau 2.4.

**Tableau 2.4 :** Variation des paramètres de cisaillement effectifs ( $C'$  et  $\phi'$ ) de deux sols argileux (montmorillonite et kaolinite) stabilisés avec 6% de chaux à différentes période de cure.

Nature du sol et paramètres de cisaillement		Avant traitement	Après traitement pour différentes périodes de cure		
			7 jours	3 mois	12 mois
Montmorillonite Sivapullaiah et al. (2000)	$C'$ (KPa)	0	73	243	263
	$\phi'$ (°)	27	43	41	41
Kaolinite Sivapullaiah et al. (2006)	$C'$ (KPa)	0	30	120 KPa à 30 j	172
	$\phi'$ (°)	27	34.5	35.3° à 30 j	35.3

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

En présence des sulfates, une variation remarquable des paramètres de cisaillement d'une montmorillonite traité à 6% de chaux en fonction de la concentration en sulfate monovalent

(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) et divalent (CaSO<sub>4</sub>) a été reporté par Sivapullaiah et al. (2000) Tableau 2.5. Cette variation dépend non seulement de la concentration des sulfates utilisés mais aussi de la période de cure et du type des cations (Na<sup>+</sup> ou Ca<sup>2+</sup>) associés à l'anion SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>. Au jeune âge, l'angle de frottement interne effectif diminue avec l'augmentation de la concentration en sulfate monovalent ou divalent, mais avec la présence de 1% de CaSO<sub>4</sub>, l'angle de frottement interne devient plus grand par rapport à celui du sol traité sans CaSO<sub>4</sub>.

Cependant, après 7 jours de cure, la cohésion effective du sol traité initialement diminue en présence d'une faible concentration en sulfate monovalent (1%), puis elle augmente pour des fortes concentrations. Par contre, pour la même période de cure, l'effet apporté sur la cohésion a été inversé pour le cas d'un traitement en présence d'un sulfate divalent. Tandis que la variation des paramètres de cisaillement à très long terme n'est pas claire du fait qu'il y ait une variation fortement perturbée avec la variation de la concentration des deux sulfates utilisés. D'après ces résultats, il s'avère que le sulfate monovalent généralement se comporte contrairement au sulfate divalent quelque soit les concentrations adoptées.

Après une année de cure, Sivapullaiah et al. (2000) ont démontré que la résistance au cisaillement de la montmorillonite diminue significativement de 1100 KPa jusqu'à 600 et 300 KPa en présence de 0.5 et 1% de CaSO<sub>4</sub>, respectivement. Cependant, après la même période de cure, la résistance au cisaillement du même type de sol diminue considérablement jusqu'à 400 et 100 KPa en présence de 0.5 et 1% de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, respectivement.

Tableau 2.5 : Effet des sulfates sur les paramètres de cisaillement effectifs (C' et φ') d'une montmorillonite traité à 6% de chaux à différentes périodes de cure, (Sivapullaiah et al. 2000).

Type du sulfate utilisé	Teneur en sulfate	Paramètres de cisaillement	Période de cure		
			7 jours	3 mois	12 mois
Sol traité sans sulfate	0	C' (KPa)	73	243	263
		φ' (°)	43	41	41
Sol traité avec sulfate monovalent (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	0.5	C' (KPa)	33	104	103
	1		47	168	1
	3		77	120	88
	0.5	φ' (°)	41	35	29
	1		42	44	44
	3		33	31	32
Sol traité avec sulfate divalent (CaSO <sub>4</sub> )	0.5	C' (KPa)	180	104	80
	1		120	102	110
	3		110	96	80
	0.5	φ' (°)	39	39	31
	1		37	36	44

Ces résultats indiquent que l'altération de la résistance au cisaillement est très importante avec le sulfate de sodium que le sulfate de calcium où la résistance s'est altérée très tôt (à 2% de déformation) avec la présence d'une faible concentration en sulfate de sodium que sulfate de calcium. En général, la dégradation des performances mécaniques (résistance) dépend non seulement de la concentration en sulfate utilisé mais aussi du type de cations associés à l'anion  $\text{SO}_4^{-2}$  Figure. 2.5.

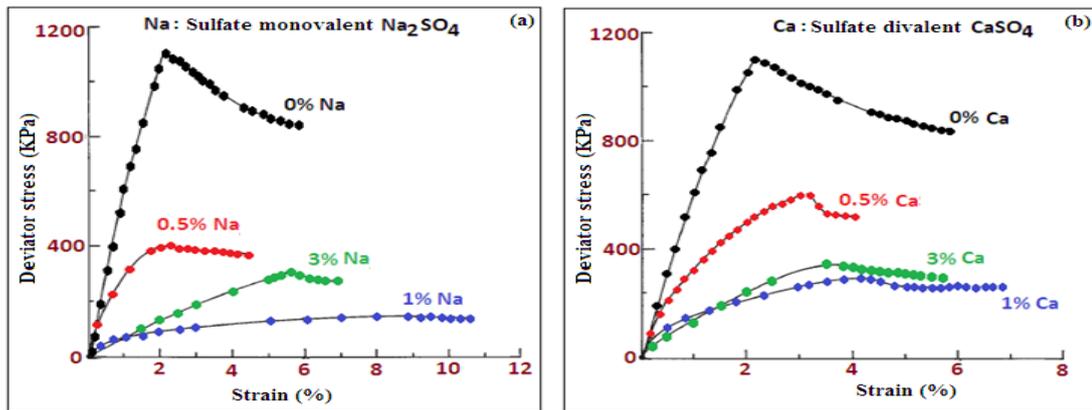


Fig. 2.5 : Effet des sulfates sur la résistance au cisaillement d'une montmorillonite traitée avec 6% de chaux après une année de cure (pression de confinement: PC = 100 KPa), (Sivapullaiah et al. 2000).

## 2.3 Effet du ciment

### 2.3.1 Effets du ciment sur la plasticité

Le ciment est généralement utilisé pour les sols de faible plasticité ayant une teneur en eau est élevée. Tous les auteurs s'accordent à dire que l'addition du ciment cause une réduction dans l'indice de plasticité. L'incorporation du ciment réduit la plasticité des sols. Ces résultats ont été confirmés par de nombreux chercheurs (Degirmenci et al, 2007). L'influence du ciment portland sur les limites d'Atterberg d'un sol constitué de rejets de charbon est montrée dans le tableau 2.1 (Okagbue et Ochulor, 2007).

Tableau : 2.6 : Effet du ciment sur les limites d'Atterberg (Okagbue et Ochulor, 2007).

Ciment(%)	Limite de liquidité(%)	Limite de plasticité(%)	Indice de plasticité(%)
0	32	21	11
2	37	22	15
6	38	25	13
10	39	29	10

Une augmentation pour les deux limites de liquidité et de plasticités a été observée avec l'augmentation du dosage du ciment, cependant, l'indice de plasticité diminue. Ces résultats sont désirables pour la stabilisation. Une réaction a eu lieu entre le ciment et le sol. La modification des particules d'argile par le ciment et la dissolution des silicates et aluminates de particule d'argile due à un pH élevé est produite par la réaction de chaux et d'hydratation du ciment. Les matières dissoutes vont associer avec  $\text{Ca}^{2+}$  pour produire des agents de cimentation c'est de cette façon les particules d'argile adjacentes seront liées (Okagbue et Ochulor, 2007). Osula (1996) conclut que cette réaction mène à la formation de particules grossières, par conséquent, la réduction des fines particules mène à une réduction dans la surface superficielle et fait réduire la plasticité.

### **2.3.2 Effets du ciment sur le compactage**

L'addition du ciment dans un sol argileux de haute plasticité augmente la teneur en eau optimale et réduit la densité sèche maximale (Okagbue et Ochulor, 2007). 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'addition 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.

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

En absence des sulfates, les résultats obtenus par Okagbue and Ochulor (2007) ont indiqué que 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 dicalcique 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. Le même comportement a été observé par Bahar et al. (2004) et Ouhadi et al. (2014) où la résistance à la compression non confinée du sol argileux augmente considérablement avec l'augmentation de la teneur en additifs utilisés. Cependant, l'utilisation du ciment a fait augmenter la résistance à la compression non confinée mieux que l'utilisation de la chaux Figure 2.6.

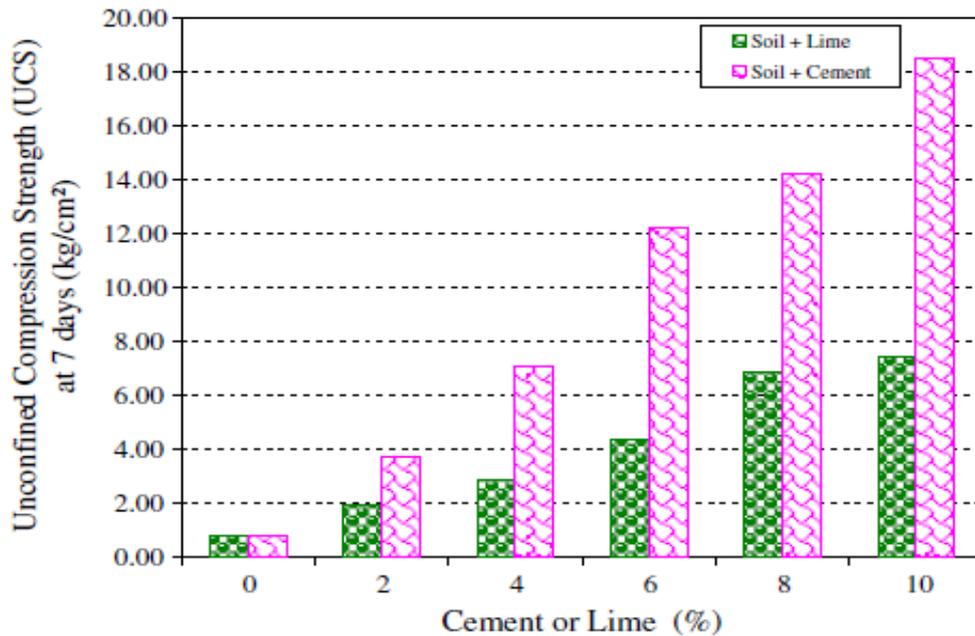


Fig 2.6 : Effet de l'utilisation du ciment (CEM II) et de la chaux comme additifs sur la résistance à la compression non confinée d'un sol argileux peu plastique, (Ouhadi et al. 2014).

Kenai et al. (2006) ont étudié la résistance à la compression non confinée à l'état sec ou immergée dans l'eau pendant 2 à 28 jours. Les essais ont été faits sur une argile sableuse avec l'addition de 0 à 20% du ciment portland (CEM I, 32.5). Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation du dosage en ciment fait augmenter la résistance à la compression non confinée. Ceci est dû à l'hydratation suffisante du ciment dans les pores de la matrice et la rigidité élevée de sa structure par la formation d'un grand volume de composés cimentaires dans le sol traité.

D'ailleurs, Asgari et al. (2015) ont trouvé que la résistance à la compression non confinée des échantillons de sol préparés à différentes teneur en eau augmente avec l'augmentation de la teneur du ciment utilisé et de la période de cure. L'effet de la teneur en eau avec laquelle les échantillons du sol ont été préparés joue un rôle capital du fait que la résistance à la compression non confinée augmente avec la diminution de la teneur en eau adoptée Figure. 2.7.

En présence des sulfates, l'étude réalisée par Laguros (1962) a indiqué que la RCS du sol témoin augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment utilisé et de la période de cure. Cependant, quelque soit le temps de cure et le dosage en ciment utilisé, la RCS de l'argile traitée est optimale lorsque la concentration en  $MgSO_4$ ,  $MgO$ ,  $CaCl_2$  et  $NaOH$  est faible. Alors que, généralement, pour des fortes concentrations en mêmes composés chimiques, la RCS semble fortement perturbée à titre d'exemple la présence de  $NaOH$  fait perturber la RCS

du sol traité à savoir que les résistances fournies sont bien plus petites que celles du sol témoin lorsque la concentration en NaOH est forte (1.5%NaOH).

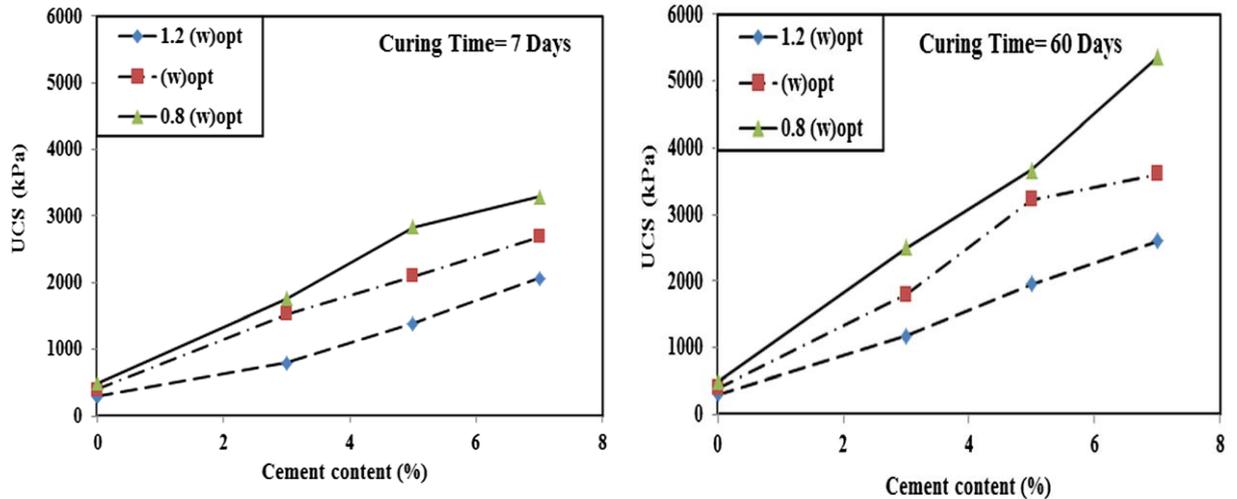


Fig. 2.7 : Effet de l'utilisation du ciment sur la résistance à la compression non confinée d'un sol peu plastique préparé à différentes teneur en eau après 7 et 60 jours de cure, (Asgari et al., 2015).

Par contre pour le cas d'un traitement avec 5% de ciment en présence de différentes concentrations en  $MgSO_4$ , 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  $MgSO_4$ , la RCS semble être perturbée Figure 2.8. Ces résultats ont montré que les deux composés chimiques  $MgSO_4$  et  $CaCl_2$  ont importé un effet bénéfique pour le gain de la résistance de l'argile traitée qui dépend aussi bien de plusieurs facteurs à savoir : le type et la concentration en élément chimique, le dosage en ciment utilisé et de la période de cure.

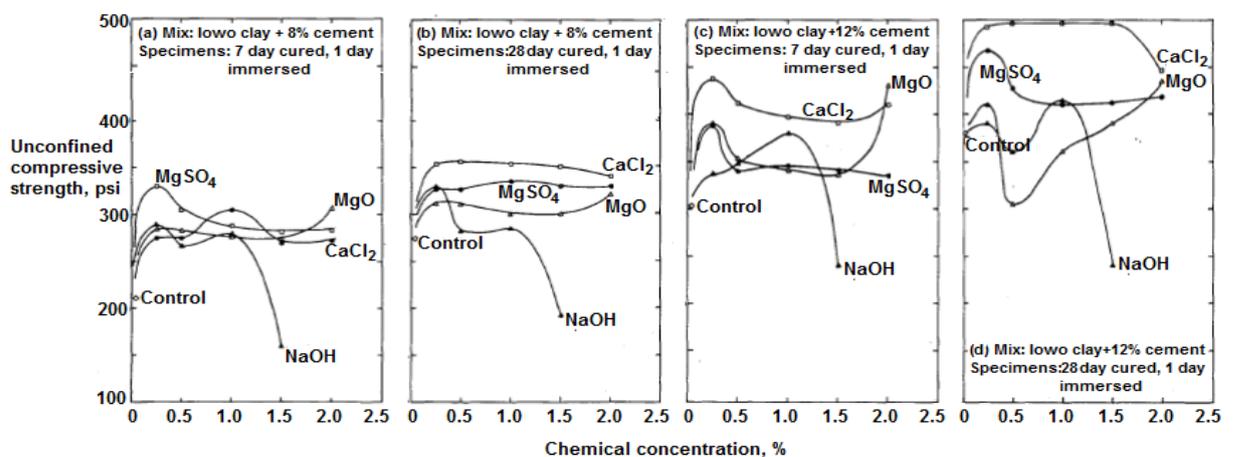
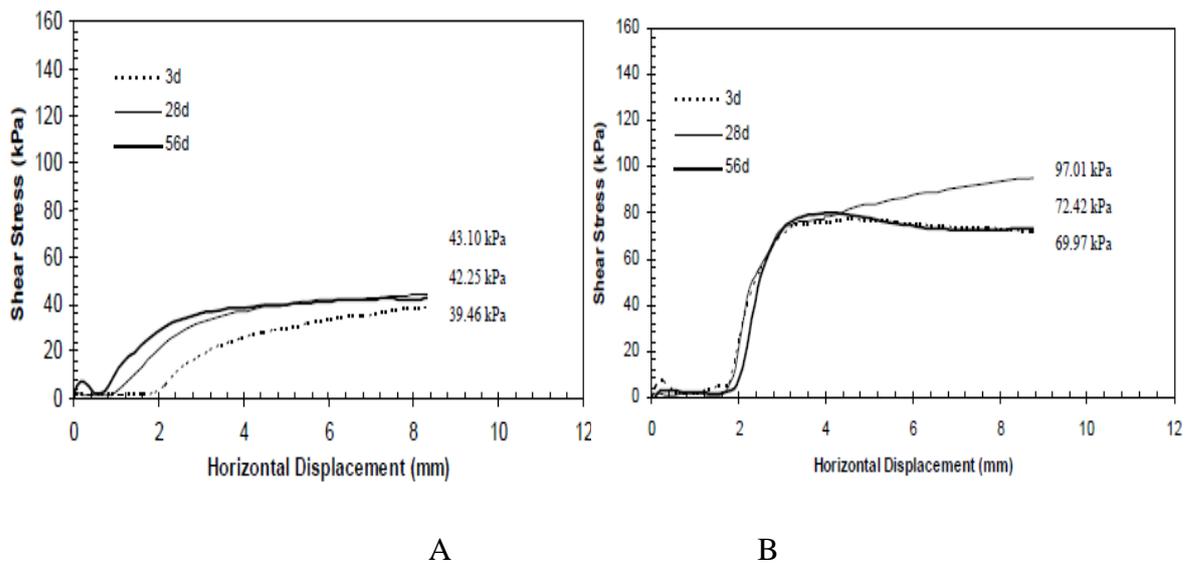


Fig. 2.8 : Effet de certains types de composés chimiques sur la résistance à la compression non confinée de l'argile d'Iowa après 7 et 28 jours de cure, (Laguros, 1962).

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

En absence des sulfates, Ho and Chan (2011) ont étudié l'effet apporté par l'utilisation de 10% de ciment sur la résistance au cisaillement d'une argile organique très plastique pour différentes périodes de cure. La Figure 2.9 montre que la résistance au cisaillement développée par l'échantillon traité après 28 jours de cure est deux fois plus grande que celle du sol non traité. Cela peut être expliqué par la formation des phases cimentaires qui font lier les particules du sol stabilisé entre eux.

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



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

Laguros, (1962) a constaté qu'en présence des sulfates et après 7 jours de cure, la cohésion et l'angle de frottement interne d'un sol limoneux traité avec l'addition de 12% de ciment portland augmente de 10 à 20 KPa et de 15 à 37°, respectivement. Cependant, pour une même période de cure avec la présence de 2% de  $\text{CaSO}_4$ , 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 importe un effet bénéfique pour un sol limoneux traité au ciment Tableau 2.7. L'augmentation de la cohésion peut s'expliquer par la diminution de l'indice des vides du sol traité sous l'effet du compactage en présence des particules fines du CaSO<sub>4</sub> et par conséquent l'augmentation de la compacité et donc sa cohésion.

Tableau 2.7 : Effet de 2% de CaSO<sub>4</sub> sur les paramètres de cisaillement d'un sol limoneux traité avec 12% de ciment portland, (Lagueros, 1962).

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

## 2.4 Effet des cendres volantes

### 2.4.1 Effet des cendres volantes sur la plasticité

Parsons and Kneebone (2005) ont étudié l'amélioration produite par l'utilisation de 12 et 16% de cendres volantes de classe C et leur degré d'influence sur l'indice de plasticité des trois types de sols Figure. 2.10. Il est clair que l'addition des cendres volantes fait provoquer une diminution de l'indice de plasticité de tous les sols traités avec des degrés variables. Le degré de réduction dépend non seulement de la nature du sol mais aussi de la teneur en cendres volantes utilisées.

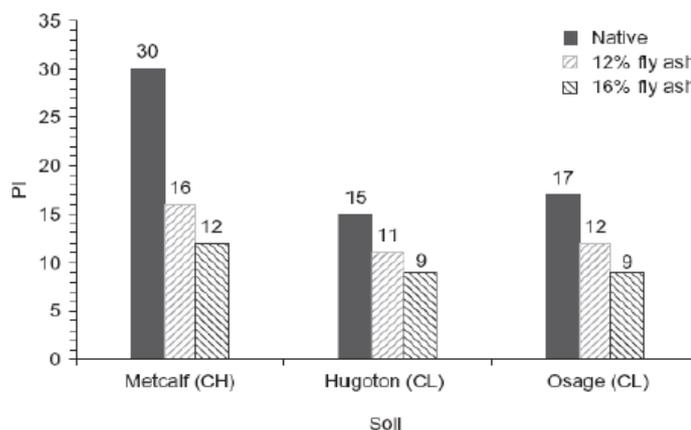


Fig. 2.10 : Effet des cendres volantes sur l'indice de plasticité d'un sol moyennement plastique, (Parsons and Kneebone, 2005).

D'ailleurs, Kalias et al. (2005) ont démontré que l'utilisation de 5, 10 et 20% de cendres volantes fait déplacer le sol traité du domaine plastique vers le domaine non plastique après 1 jour de cure.

### 2.4.2 Effet des cendres volantes sur le compactage

Prabakar et al. (2004) ont constaté que l'addition des cendres volantes influe à la fois sur la porosité et l'indice des vides des sols argileux. Pour tous les échantillons étudiés, la densité sèche diminue avec l'augmentation des cendres volantes. 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. Cependant, McCarthy et al. (2012) ont constaté que le taux de diminution de la densité sèche maximale ou de l'augmentation de la teneur en eau optimale dépend de la finesse des cendres volantes additionnées. A savoir que la teneur en eau optimale de l'argile traitée (elle a été prétraitée avec 3% de chaux) augmente de 22.3% jusqu'à 24,3% pour l'addition de 24% de CV (cendres volantes grossière) alors qu'elle augmente seulement jusqu'à 22.6% pour une même teneur en FA (cendres volantes fine). Le même comportement a été observé pour la densité sèche maximale, soit une diminution de 15.4 à 14.5 KN/m<sup>3</sup> pour 24% de CV et elle reste presque constante pour une même teneur en FA Figure. 2.11.

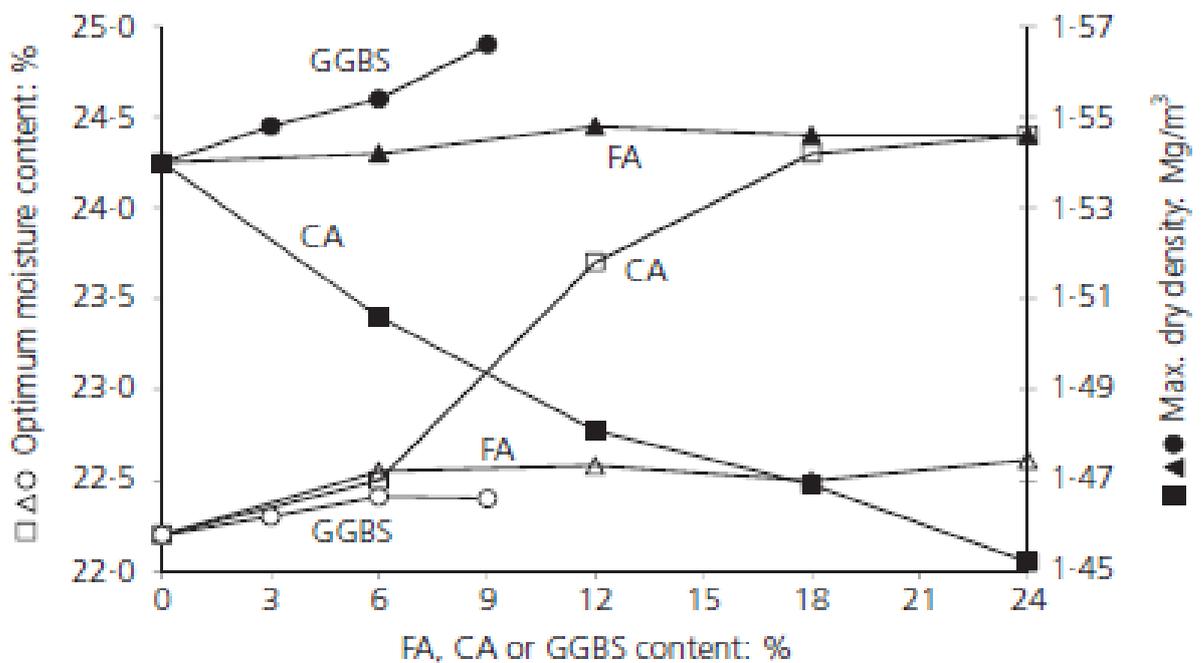


Fig. 2.11 : Variation des caractéristiques de compactage d'une argile traitée avec différents pourcentages de cendres volantes et de GGBS, (McCarthy et al. 2012).

### 2.4.3 Effet des cendres volantes sur la résistance à la compressibilité

Silitonga et al. (2010) ont observé que la résistance à la compression non confinée d'un sédiment marin utilisé dans une chaussée routière augmente avec le dosage en cendres volantes utilisé. De plus, une augmentation de 400% de la résistance à la compression après 100 jours de cure a été enregistrée Figure 2.12.

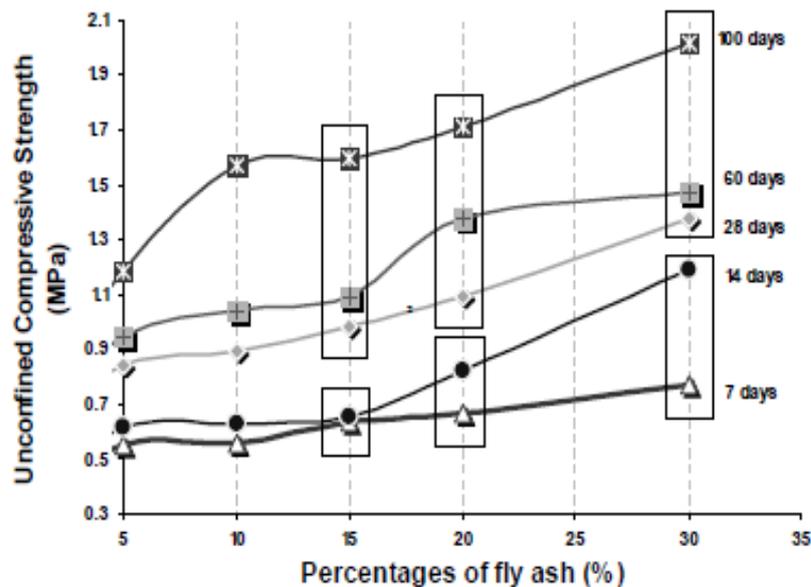


Fig. 2.12 : Effet de différents pourcentages de cendres volantes sur la résistance à la compression non confinée d'un sédiment marin après différentes périodes de cure, (Silitonga et al., 2011).

D'ailleurs, Bin-Shafique et al. (2010) ont trouvé que l'addition de 20% des cendres volantes a augmenté la résistance à la compression non confinée de 210 à 800KPa pour un sol de faible plasticité et de 180 à 560KPa pour un sol fortement expansif. Cela met en évidence l'effet de la susceptibilité d'un sol au gonflement sur les propriétés mécaniques des sols traités avec l'utilisation des cendres volantes. De plus, Jaturapitakkul et al. (1999) ont démontré que la résistance à la compression non confinée diminue avec l'augmentation de la taille des particules (finesse) des cendres volantes.

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

Sezer et al. (2006) ont constaté que l'utilisation de 5, 10, 15 et 20% de cendres volantes comme additif fait améliorer considérablement les caractéristiques de cisaillement du sol instable traité. Ainsi 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 plus, Senol et al. (2006) ont reporté 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 2.8.

**Tableau 2.8 :** Effet des cendres volantes sur les caractéristiques de cisaillement, (Senol et al., 2006).

Sample N°	% Fly ash	Cohesion (Kg/cm <sup>2</sup> )			Angle of internal friction		
		Soil-A	Soil-B	Soil-C	Soil-A	Soil-B	Soil-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'	-

## 2.5 Effet de la pouzzolane naturelle

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

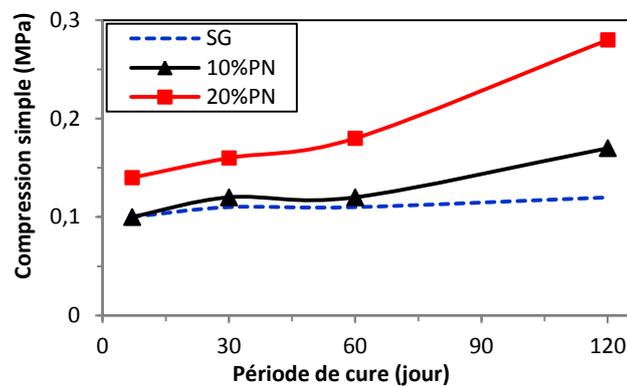
L'addition de 10 puis 20% de PN dans une vase a permis à chaque fois une diminution d'indice de plasticité du sol de 31,14% sans pouzzolane jusqu'à 23,88% à 20% de pouzzolane. Une augmentation faible de limite de plasticité ainsi que la diminution de la limite de liquidité en sont la cause (Zoubir, 2009).

### 2.5.2 Effets de la pouzzolane naturelle sur le compactage

Harichane et al (2011a) ont eu a étudié l'effet de l'incorporation de 10 et 20% de PN sur deux sols argileux, l'un très plastique et l'autre peu plastique. Les paramètres de compactage évoluent de la même manière dans les deux sols : une diminution légère de la teneur en eau optimale et augmentation légère également 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 maximale sèche.

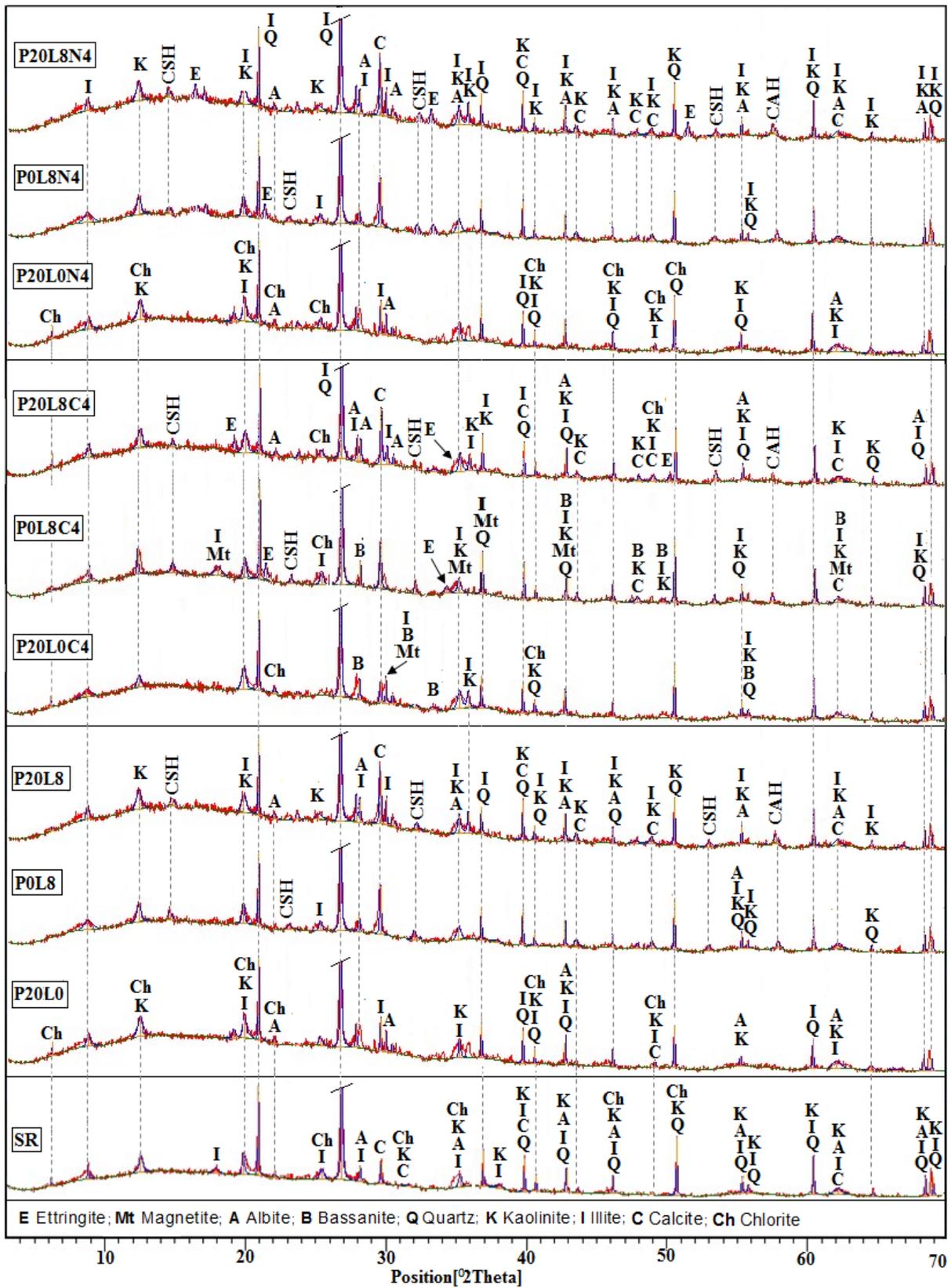
### 2.5.3 Effets de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression

Les résultats de l'effet apporté par l'utilisation de la pouzzolane naturelle en tant que stabilisant sur la résistance à la compression non confinée du sol argileux étudiés sont présentés à la (Figure 2.13). En général, la résistance à la compression des échantillons du sol argileux traités augmente avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle additionnée et de la période de cure. 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.



**Fig. 2.13 :** Effet de différents pourcentages de pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés en absence des sulfates (Gadouri, 2017).

D'ailleurs, des essais de diffraction par des rayons X (DRX) et de microscopie électronique à balayage (MEB) ont été effectués sur des échantillons du sol argileux stabilisés avec 20% de pouzzolane naturelle après 60 jours de cure. Les résultats obtenus indiquent qu'il n'y a pas un changement dans la minéralogie des deux sols argileux stabilisés. C'est-à-dire la formation des composés de C-S-H et C-A-H n'a pas été observée (Figure. 2.14). Cependant, un changement extrêmement remarquable dans la microstructure des deux sols argileux stabilisés a été révélé par les images de MEB. Nous assistons à l'apparition des macropores variant de 10 à 20 $\mu$ m pour le SR. Ce comportement peut être attribué à la forte teneur et à la grande finesse de la pouzzolane naturelle additionnée en causant des retraites important qui se traduisent par des macropores tout en faisant affaiblir la macrostructure du sol stabilisé et par conséquent sa résistance à la compression (figure 2.15)



**Fig. 2.14 :** Courbes diffractométriques issus de diffraction par des rayons X (DRX) montrant les changements dans la minéralogie du SR stabilisé avec 8%L, 20%PN et 20%PN+8%L en présence ou non de 4% du Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et du CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O après 60 jours de cure (Gadouri, 2017).

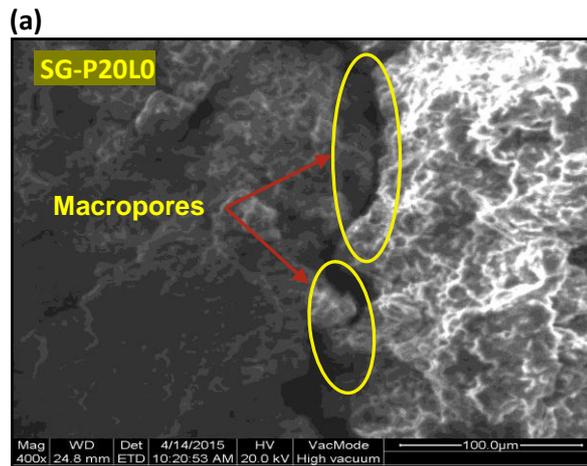


Fig. 2.15 : Images de MEB montrent les changements dans la macrostructure du sol argileux traité avec 20% de pouzzolane naturelle en absence des sulfates après 60 jours de cure

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

D paris Gadouri et all ; Concernant l'utilisation de la pouzzolane naturelle en tant qu'additif (Figure.2.13), il semble que l'effet de la variation temporelle de la résistance au cisaillement pour le sol est marginal. Cela explique clairement que ce type de matériau volcanique a besoin d'un activateur chimique, physique ou mécanique pour pouvoir réagir et développer des réactions pouzzolaniques.

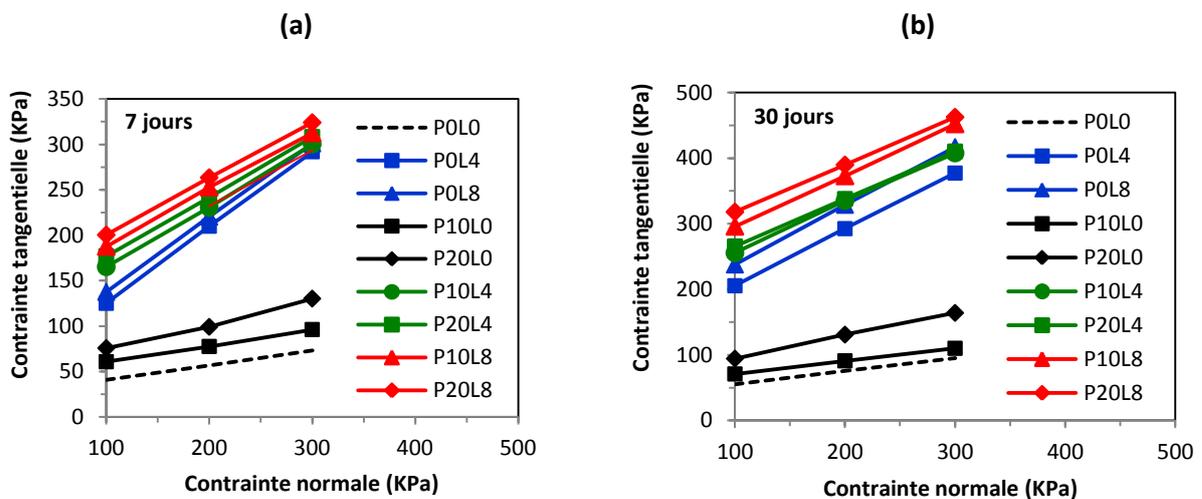


Fig. 2.16 : Effet de différents pourcentages de chaux, de PN et de L-PN sur la résistance au cisaillement du sol rouge stabilisé en absence des sulfates (Gadouri, 2017).

Pour une faible teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , l'utilisation de la pouzzolane naturelle seule fait apporter un effet négligeable sur la variation temporelle de la résistance au cisaillement avec la période de cure mais, elle diminue avec l'augmentation de la teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Et pour une faible teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (2%), la pouzzolane naturelle ne fait provoquer qu'un effet négligeable sur la résistance au cisaillement même avec la période de cure. Il est à constater que la résistance au cisaillement diminue avec l'augmentation de la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  à l'exception du cas du SR où tous les échantillons traités

ont été complètement altérés après les périodes de cures de 30 et 60 jours de cure en présence de 6 et 4% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , respectivement, ( Gadouri et all).

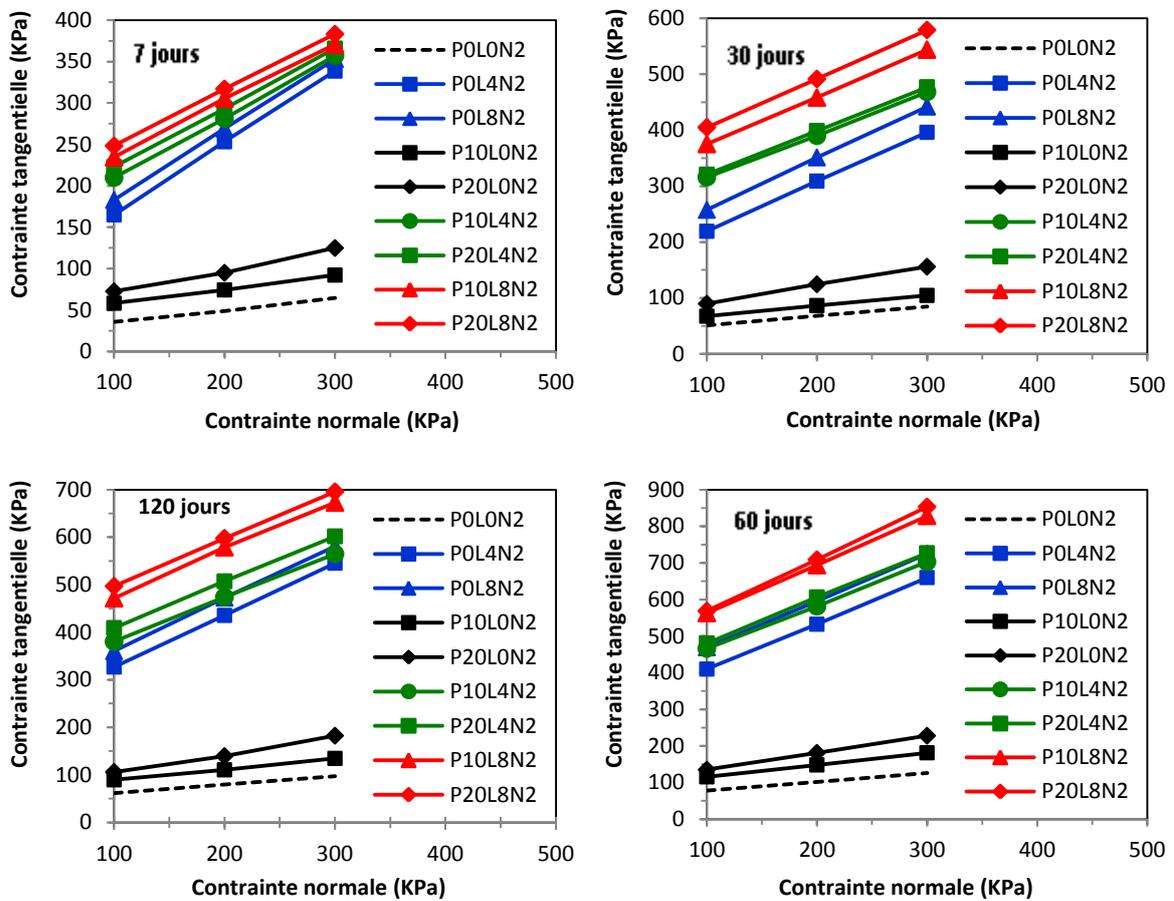


Fig.2.17 : Effet de 4% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure (Gadouri, 2017).

## 2.6 Conclusion

La recherche bibliographique nous a permis à consulter la documentation concernant la thématique du traitement des sols à la chaux, au ciment et aux différents ajouts. D'une manière générale ces études concernent des avancées techniques dans le mode de traitement et de stabilisation des sols. Un potentiel économique et environnemental prometteur est observé par les chercheurs pour l'usage de la chaux, du ciment et des ajouts minéraux pour la stabilisation des sols argileux. Parmi les ajouts cimentaires on peut citer les cendres volantes, la fumée de silice, le calcaire, les cendres de gousse de riz, le laitier, la poussière de ciment. Cette analyse bibliographique nous a permis aussi d'étudier la durée de cure et son effet dominant sur les caractéristiques physiques et mécaniques des sols argileux traités aux différents ajouts minéraux.

# Chapitre 3

---

## Etude Expérimentale

### 3.1 Introduction

L'étude expérimentale a pour objectif principal l'évaluation des effets des ajouts minéraux tels que la chaux sur les propriétés physiques (limites d'Atterberg) et mécaniques (compactage) des sols fins instables de la région de Chlef.

Dans ce chapitre, une description détaillée des propriétés physiques des sols naturels ainsi que les caractéristiques des ajouts minéraux utilisés est présentée. De plus, un aperçu sur les essais réalisés ainsi que la préparation des éprouvettes sont présentés. L'étude expérimentale a été réalisée au sein du laboratoire de mécanique des sols du département de science de la terre (STU) de l'université Djilali Bounaama de Khemis-Miliana.

### 3.2 Matériaux utilisés et préparation

#### 3.2.1 Sols naturels

##### 3.2.1.1 Lieu de prélèvement

Le sol qui a été utilisé dans cette étude est un sol argileux rouge (SR), il a été obtenu à partir de 5m de profondeur, de provenance d'un projet de l'Autoroute Est-Ouest situé approximativement à 25 km à l'Est de la ville de Chlef (figure. 3.1) (Harichane et al. 2009).



**Fig. 3.1** : Prélèvement du sol argileux rouge (SR) à partir d'un projet d'autoroute Est-Ouest (Harchoun, Algérie).

### 3.2.1.2 Préparation

Après son extraction, le sol a été placé dans des sacs en plastique, transporté au laboratoire et passé à l'étuve à 50°C pendant 24h. Après séchage, le sol a été ensuite concassé et broyé pour la préparation et exécution des essais géotechniques d'identification (ou de caractérisation) Figure 3.2 et Figure 3.3. Il est à signaler que le sol en question a été préparé par Gadouri en 2012 au laboratoire d'hydraulique de Chlef.

### 3.2.1.3 Identification et caractérisation

Le Tableau 3.1 représente les différentes caractéristiques physico-mécaniques du sol fin étudié ainsi que sa classification géotechnique (Harichane et al. 2011a). Ces caractéristiques ont été déterminées suivant les normes américaines (ASTM, 2000). Les propriétés chimiques sont reportées dans le Tableau 3.2 (NF EN 196-2, 2013). Tandis que les propriétés minéralogiques sont représentées dans le Tableau 3.3 et la (Figure 3.4).



(a)



(b)

**Fig. 3.2 :** Moyens utilisés pour la préparation des sols, (a) : concasseur, (b) : broyeur.



(a)



(b)



(c)

**Fig. 3.3 :** Préparation des sols pour les essais au laboratoire, (a): broyage et tamisage au tamis 1mm, (b) : sols après tamisage, (c) : conservation hors humidité dans des sacs hermétiques.

**Tableau 3.1** : Caractéristiques physico-mécaniques des sols (Harichane et al. 2011b).

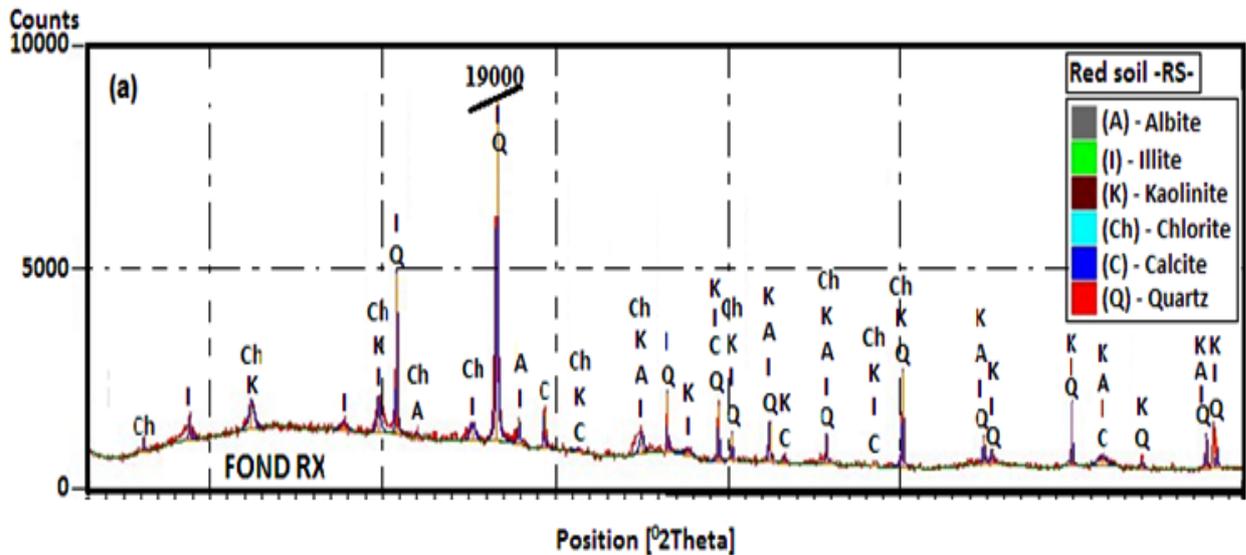
<b>Caractéristiques de base</b>	<b>Sol rouge (SR)</b>
Teneur en eau naturelle (%)	13.8
Densité spécifique	2.84
Eléments passant au tamis 80 $\mu$ m (%)	97.5
Limite de liquidité (%)	46.5
Limite de plasticité (%)	22.7
Indice de plasticité (%)	23.8
Classification (USCS)	CL
Teneur en eau optimale (%)	15.3
Densité sèche maximale (kN/m <sup>3</sup> )	16.9
Résistance à la compression non confinée (MPa)	2.54
Perte au feu (%)	7.13

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

<b>Nom chimique</b>	<b>Formule chimique</b>	<b>SR (%)</b>
Oxyde de calcium	CaO	2.23
Oxyde de magnésium	MgO	2.14
Ferrite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.22
Alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.01
Silice	SiO <sub>2</sub>	57.02
Sulfite	SO <sub>3</sub>	0.19
Chlorure	Cl <sup>-</sup>	0.2
Potentiel d'hydrogène	pH	7.25
Oxyde de sodium	Na <sub>2</sub> O	0.93
Oxyde de potassium	K <sub>2</sub> O	3.17
Dioxyde de titan	TiO <sub>2</sub>	0.83
Phosphore	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14

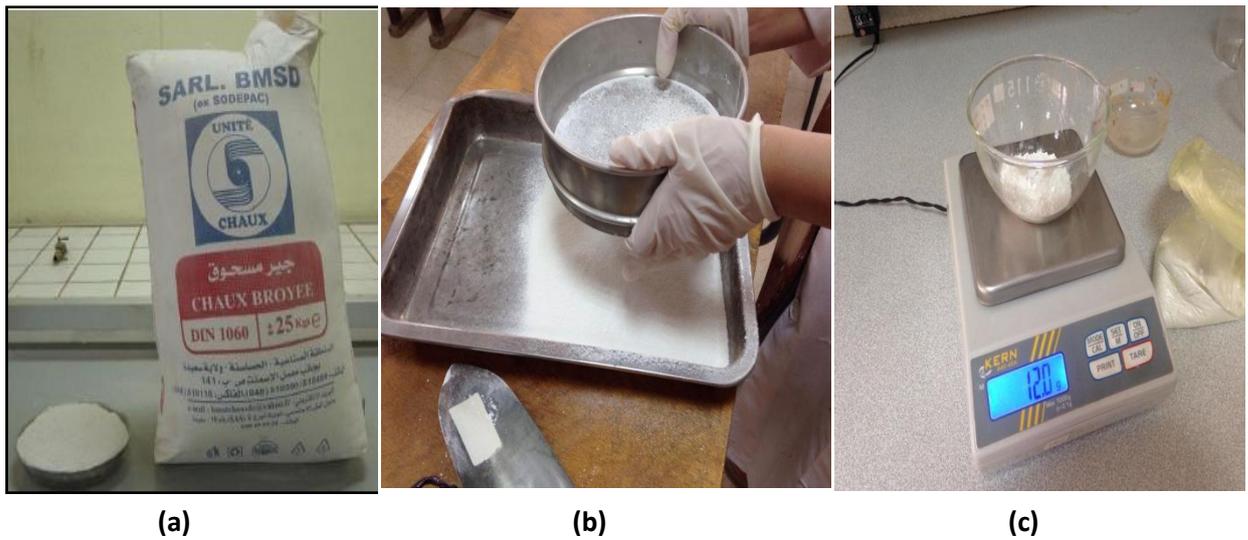
**Tableau 3.3 :** Propriétés minéralogiques des sols étudiés (Gadouri, 2017).

Nom minéralogique	Formule chimique	SR (%)
Quartz	SiO <sub>2</sub>	32
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	4
Albite	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	8
Illite	2K <sub>2</sub> O.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .24SiO <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	24
Kaolinite	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	16
Montmorillonite	Al <sub>2</sub> ((Si <sub>4</sub> Al)O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	-
Chlorite	Mg <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> O <sub>18</sub> Si <sub>3</sub>	9
Minéraux ferrugineux et autres	-	7

**Fig. 3.4 :** Le diagramme diffractométrique présentant la composition minéralogique du sol argileux rouge étudié (Gadouri, 2017).

### 3.2.2 Chaux

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), un tamisage au tamis 0.4mm avant son utilisation a été procédé pour éliminer les grumeaux qui peuvent se former en présence d'une éventuelle humidité (figure 3.5). Les propriétés physico-chimiques de la chaux sont présentées dans le Tableau 3.4 (Harichane et al. 2011a).



**Fig. 3.5 :** Préparation de la chaux, (a): emballage utilisé pour la chaux vive de Saida, (b): tamisage au tamis 0.4mm, (c): conservation dans des sacs hermétiques pour l'utilisée

**Tableau 3.4 :** Propriétés physico-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	-

### 3.2.2.1 Produits chimiques

Deux produits chimiques (éléments perturbateurs du traitement) ont été utilisés dans cette étude (figure 3.6). Le premier est un sulfate de sodium anhydre ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , sulfate monovalent) alors que le deuxième est un sulfate de calcium hydraté ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , sulfate divalent). Les quantités prédéterminées de chacun de ces deux types de sulfates ont été mélangées à sec avec les sols sélectionnés sous forme d'une poudre fine ( $0/80\mu\text{m}$ ). Les propriétés physico-chimiques de ces deux éléments chimiques sont représentées dans le Tableau 3.5.



**Fig. 3.6 :** Les sulfates utilisés dans l'étude expérimentale, (a): sulfate de sodium anhydre ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), (b): sulfate de calcium hydraté ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

**Tableau 3.5 :** Caractéristiques physico-chimiques des sulfates utilisés (Gadouri, 2017).

Propriétés	Sulfate de sodium	Sulfate de calcium
Couleur	Blanche	Blanche
Taille des particules	$0/80\mu\text{m}$	$0/80\mu\text{m}$
Formule chimique	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Masse molaire (g/mol)	142.042	136
Auuy (dried), (%)	99.5	> 99
pH (50g/L, 25°C)	5 à 8	-
Matière insoluble (%)	0.005	< 0.005
Chloride (Cl, %)	0.001	< 0.005
Phosphate ( $\text{PO}_4$ , %)	0.002	-
Calcium (Ca, %)	0.01	-
Fer (Fe, %)	0.0005	< 0.005
Sodium (Na, %)	-	< 0.005
Potassium (K, %)	-	< 0.005

### 3.3 Déroulement des essais

#### 3.3.1 Combinaison des échantillons

Les éprouvettes étudiées pour les essais des limites d'Atterberg sont confectionnées à partir des différentes formulations de combinaisons sol-chaux et sont données dans la Tableau 3.6. (MS est un mélange de 75% de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et 25% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

**Tableau 3.6** : Combinaisons des échantillons des sols stabilisés avec ou sans présence des sulfates.

Designation	Sol	Chaux	Sulfate
C0MS0	100	0	0
C0MS2	98	0	2
C0MS4	96	0	4
C4MS0	96	4	0
C4MS2	94	4	2
C4MS4	92	4	4
C8MS0	92	8	0
C8MS2	90	8	2
C8MS4	88	8	4

MS : Mélange de 75% de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et 25% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , C : chaux

#### 3.3.2 Propriétés étudiées

##### 3.3.2.1 Limites d'Atterberg

La limite de plasticité ( $W_p$ ), la limite de liquidité ( $W_L$ ) et l'indice de plasticité ( $I_p$ ) ont été obtenus conformément à la norme ASTM D4318 (2000). Les variations de l'indice de plasticité des sols argileux non traités avant et après les mélanges ajoutés ont ensuite été étudiées. Les sols séchés à l'air (passant au tamis 400 $\mu\text{m}$ ) ont d'abord été mélangés avec la quantité prédéterminée de sulfate et de chaux ou la combinaison des deux dans un état sec. De l'eau distillée a été ajoutée au mélange obtenu (figure 3.7). Pour laisser l'eau diffuser et passer à travers le mélange de sol, les pâtes des échantillons mélangés avec les additifs sans sulfates ont été laissées au repos dans un récipient hermétique pendant des périodes de cures de 1, 15 jours avant le test. Après ce traitement, la pâte a été remélangée et malaxée pendant au moins 15 min avant d'effectuer le premier essai.

Cependant, les pâtes des échantillons contenant du sulfate de sodium et de calcium ont été obéis à trois essais après des périodes de cures de 1, 15 jours en vue d'évaluer l'effet du temps

de la diffusion du sulfate de sodium (TDN) et de calcium (TDC) sur l'évolution de la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité des deux sols argileux en fonction du temps. D'après Cuisinier et al. (2011), le facteur temps révèle une importance capitale pour atteindre une diffusion maximale et homogène que possible des sulfates dans le sol. D'ailleurs, la forme de l'élément chimique avec laquelle est introduit dans le sol joue également un rôle très important. D'ailleurs, Harris et al. (2004) ont montré que la diffusion de 700 ppm de sulfate ajouté au sol sous une forme dissoute dans l'eau est bien plus forte que sous une forme de poudre fine ou grossière.



**Fig. 3.7 :** Préparation de la pâte du sol avec de l'eau distillée en présence ou en absence du sulfate et la chaux pendant 1, 15 jours

### 3.3.2.1.1 Limite de liquidité

La totalité du matériau est malaxée afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide. Après chaque période de cure (1, 15 jours) en procédant à remplir une coupelle propre et sèche, avec une spatule, d'une masse de pâte d'environ 70g. Cette pâte est étalée en plusieurs couches afin d'éviter d'emprisonner des bulles d'air, présente en fin d'opération un aspect symétrique par rapport à l'axe vertical de la coupelle Figure 3.8a. Ensuite, on partage la pâte en deux parties au moyen de l'outil à rainurer. On actionne la came de façon à soumettre la coupelle à une série de chocs à une cadence de 2 coups pas seconde. On note le nombre de chocs ( $N_C$ ) nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 13 mm Figure 3.8b. L'opération complète est effectuée au moins quatre fois sur la même pâte mais avec une teneur en eau différente à chaque fois. L'essai n'est poursuivi que lorsque  $N_C$  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 ( $W_L$ ) est la teneur en eau du matériau qui correspond conventionnellement à une fermeture sur 13 mm des lèvres de la rainure après 25 chocs. Elle est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales ( $N_C$ ,  $W_L$ ) pour au moins quatre couples de valeurs. La  $W_L$  est obtenue pour une valeur de  $N_C$  égale à 25 coups. Elle est exprimée en pourcentage et arrondie au nombre entier le plus proche.

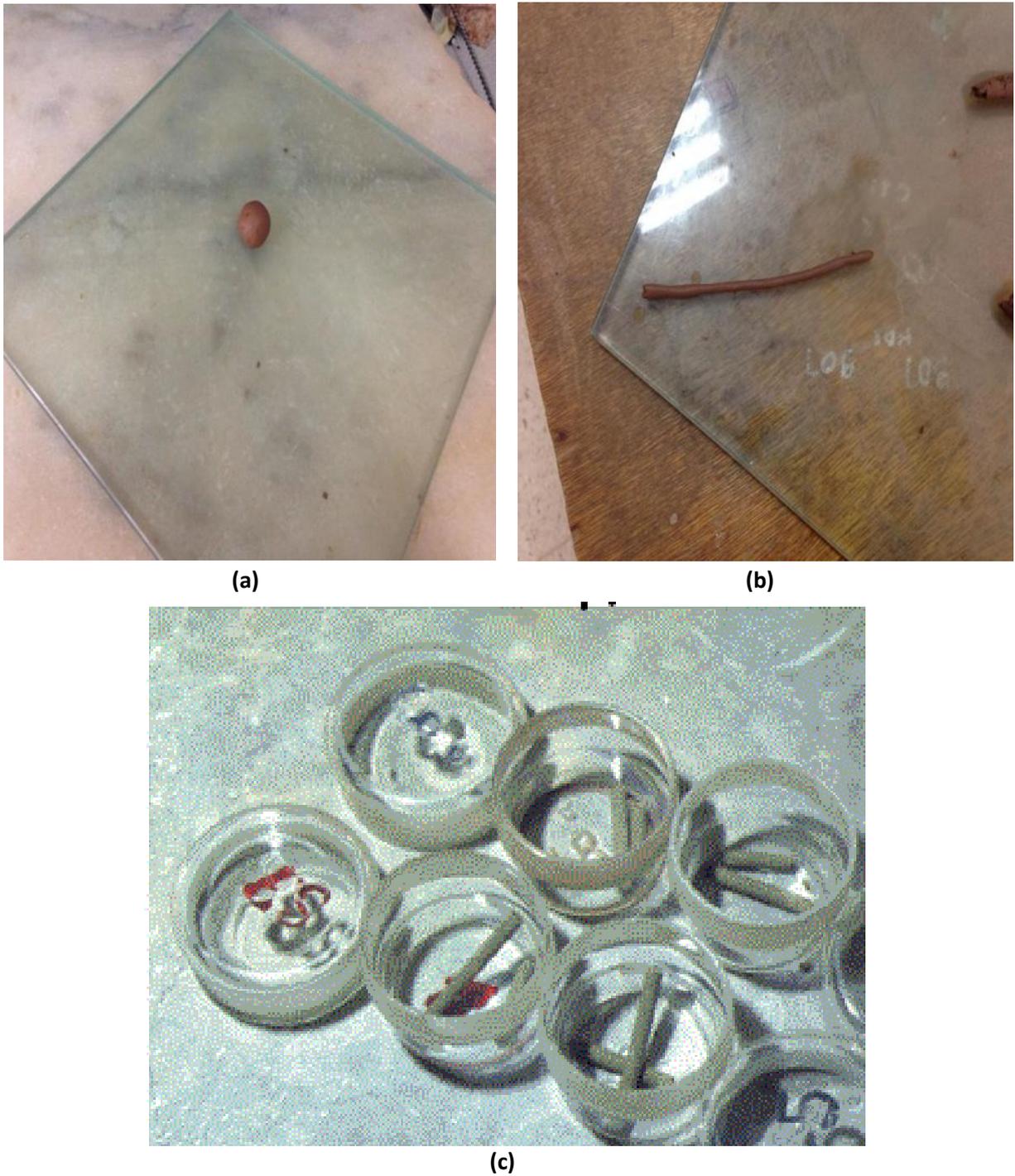


**Fig. 3.8 :** Détermination de la limite de liquidité, (a): étalement de la pâte et remplissage de la coupelle, (b): pratiqué la rainure et créer une serré de chocs jusqu'à la fermeture des lèvres à 10 mm

### 3.3.2.1.2 Limite de plasticité

On forme une boulette de la pâte préparée auparavant et la rouler sur une plaque lisse à la main de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3 mm de diamètre. 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 placer dans une capsule de masse connue, la peser immédiatement et l'introduire dans l'étuve afin de déterminer sa teneur en eau (figure. 3.9a-c).

Par définition, la limite de plasticité ( $W_P$ ) 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.



**Fig. 3.9 :** Détermination de la limite de plasticité, (a): formation d'une boulette de pâte et la rouler à la main pour former un rouleau, (b): amincissement du rouleau jusqu'à ce qu'il se fissure à 3 mm de diamètre et prélèvement d'échantillon, (c): dessiccation à l'étuve à 105°C

### 3.3.2.1.3 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 ( $I_P$ ) est donc égal à la différence entre les valeurs de la limite de liquidité et de la limite de plasticité.

$$I_P = W_L - W_P$$

### 3.3.2.2 Compactage

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

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un sol sont déterminées à partir des essais dits: essai Proctor Normal ou essai Proctor Modifié. Les deux essais sont identiques dans leur principe, sauf que les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée sont différentes.

Le principe de cet essai consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau et le compacter selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de la teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du sol et on établit la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. Les essais de compactage sont réalisés conformément à la norme ASTM D698 (2000).

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. 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 sulfates) sont introduits dans des sachées et en les conservant pendant une heure avant l'exécution de l'essai de compactage (figure 3.10a-b).



**Fig. 3.10 :** (a) : Homogénéisation du sol avec la chaux et sulfate, (b) : humidification du sol et conservation dans des sacs hermétiques

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 Figure 3.11.



**Fig. 3.11 :** Compactage du sol (Proctor normal)

Après 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 est arasé soigneusement au niveau du moule. L'ensemble du moule avec le matériau sera pesé Figure 3.12.

On procède au démoulage de l'éprouvette et on extrait un échantillon représentatif pour la détermination de la teneur en eau. Ces opérations sont 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.



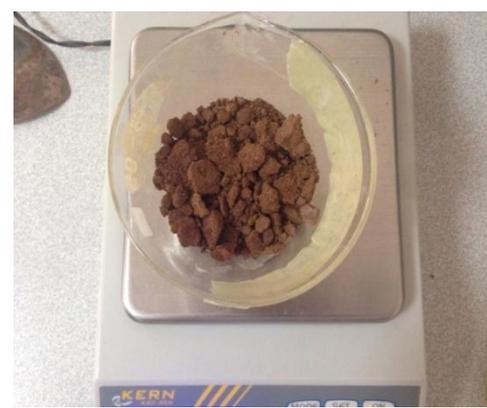
(a)



(b)



(c)



(d)

**Fig. 3.12** : Séquence des étapes post-compactage. (a) : sol compacté en trois couches, (b) : taillage et élimination des vides après avoir retiré la rehausse, (c) : pesage avant séchage et (d) pesage après séchage et détermination de la teneur en eau.

### 3.4 Programme expérimental

Tous les essais ont été réalisés suivant l'organigramme de la Figure 3.13.

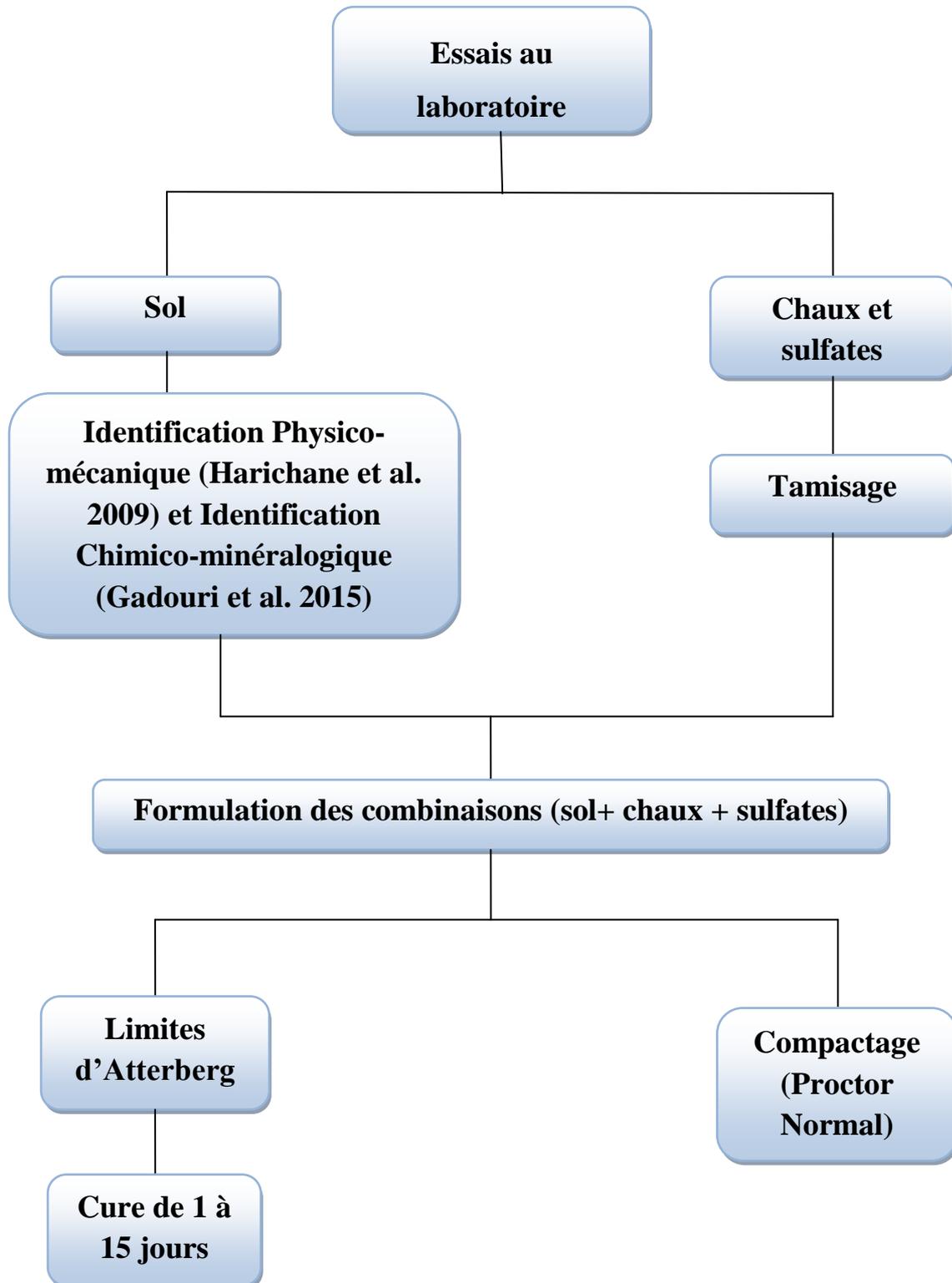


Fig. 3.13 : Organigramme des essais effectués au laboratoire

### 3.5 Conclusion

Les matériaux sélectionnés dans ce travail de thèse ont été identifiés et caractérisés par Harichane et al. (2009) et Gadouri et al. (2015) où ils ont déterminé leurs propriétés physico-mécaniques, chimiques et minéralogiques qui permettent enfin, de commenter, d'analyser et d'interpréter les résultats issus du programme expérimental entrepris.

Dans notre programme expérimental, les échantillons ont été préparés selon la nature et le type d'essai tout en respectant les normes françaises. Les différents effets apportés par l'utilisation de la combinaison du sulfate divalent (sulfate de calcium,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) et monovalent (sulfate de sodium,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) sur le comportement physico-mécanique et du sol argileux stabilisé par l'addition de la chaux ont été étudiés.

Les résultats de différents essais réalisés seront présentés, analysés et discutés dans le Chapitre suivant à savoir : les limites d'Atterberg ( $W_L$ ,  $W_P$  et  $I_P$ ) et les caractéristiques de compactages ( $W_{\text{opt}}$  et  $\gamma_{\text{dmax}}$ ). Une étude comparative entre les résultats du présent travail et ceux obtenus par Gadouri et al. (2016, 2017, 2018) sera en parallèle effectuée.

# Chapitre 4

---

**Présentation et  
interprétation des résultats  
obtenus**

## 4.1 Introduction

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

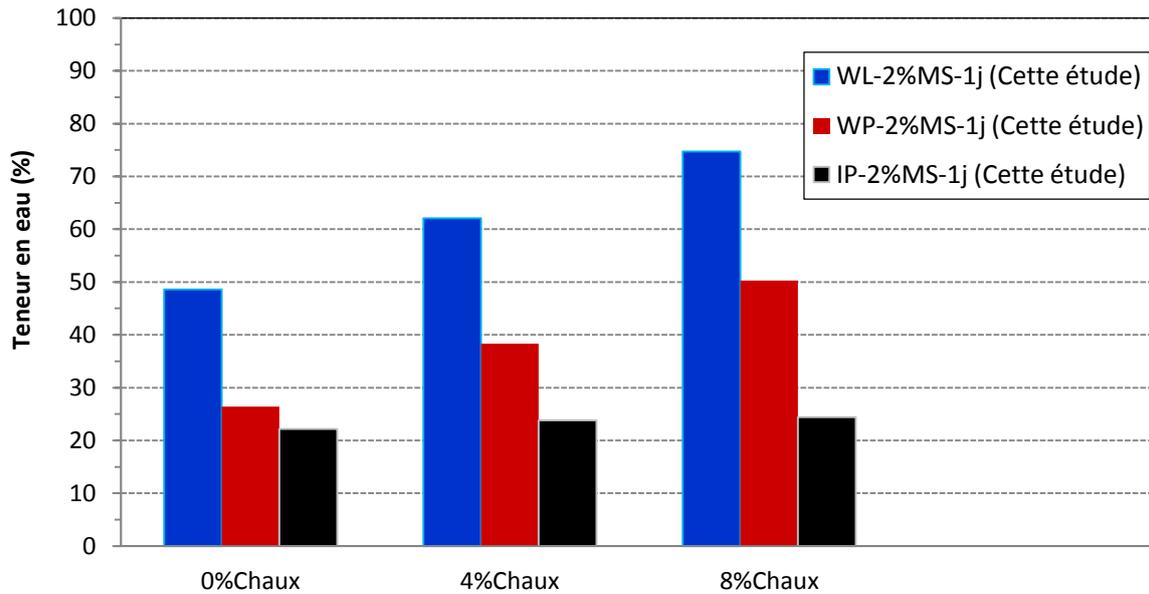
## 4.2 Variation des limites d'Atterberg

### 4.2.1 Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg

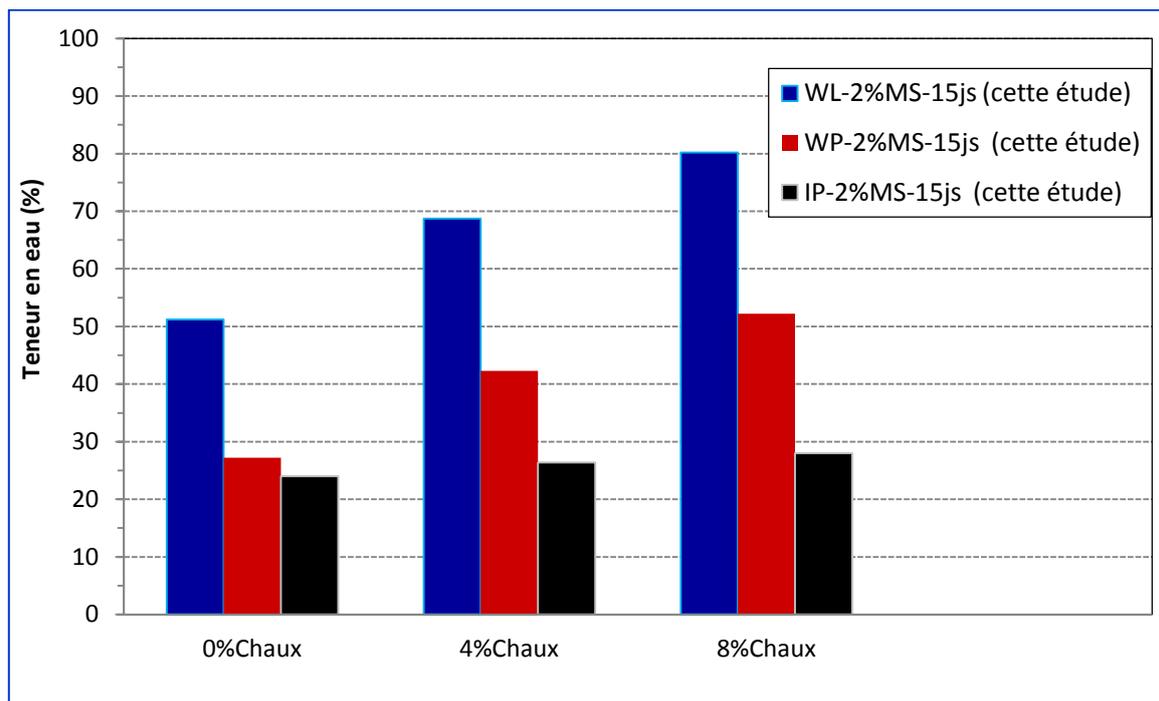
Les résultats expérimentaux concernant la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité du sol rouge argileux amélioré par la chaux pour les différentes périodes de cure sont présentés dans les Figures 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4.

L'addition de la chaux fait augmenter la limite de liquidité, la limite de plasticité d'échantillon du sol argileux et fait diminuer l'indice de plasticité. La diminution de l'indice de plasticité indique une amélioration dans la maniabilité du sol. Comme indiqué sur les figures précédentes, le sol fin a montré une diminution de l'indice de plasticité avec l'augmentation de la période de cure et l'addition de la chaux.

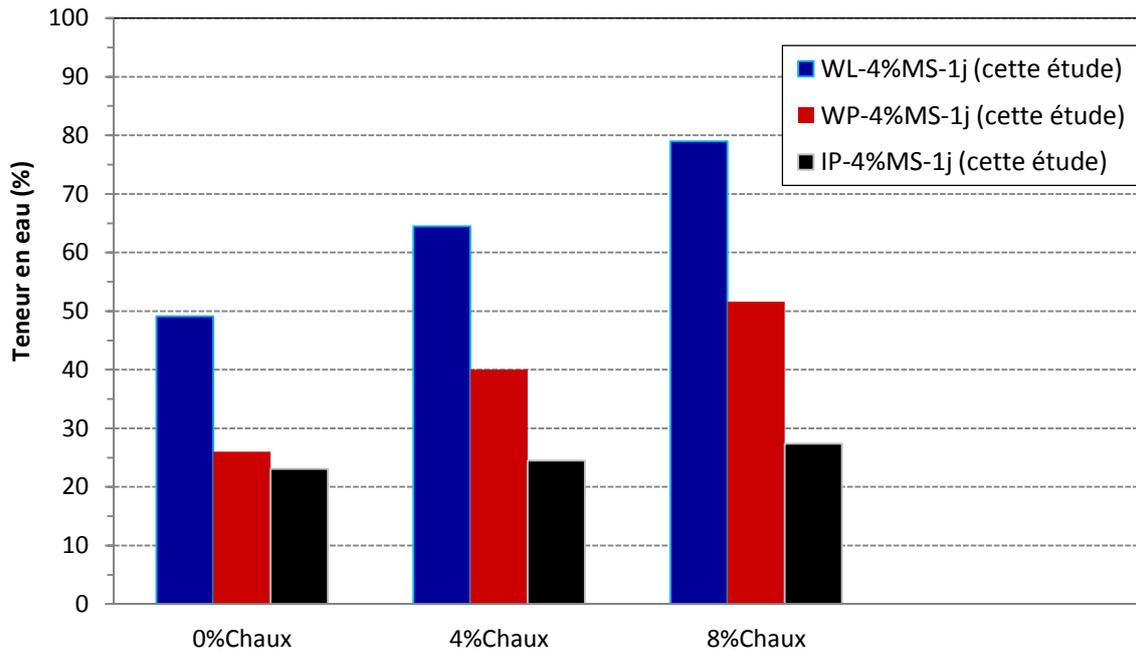
Plusieurs chercheurs ont montré la même tendance dans leurs travaux de recherche (Attoh Okine, 1995; Bagherpour et al. 2003; Sivapullaiah et al. 2000; Ansary et al. 2006; Bozbey et al. 2010). En effet, Attoh-Okine (1995) a rapporté que la diminution de la  $W_L$  est observée pour les sols composés principalement de l'argile montmorillonitique alors que son augmentation est constatée dans le cas des sols kaoliniques. En outre, Goswami and Singh (2005) ont indiqué que la façon de l'arrangement des particules ainsi que la présence de cations bivalents favorisent la floculation des particules argileuses et augmentent la  $W_L$  des sols kaoliniques.



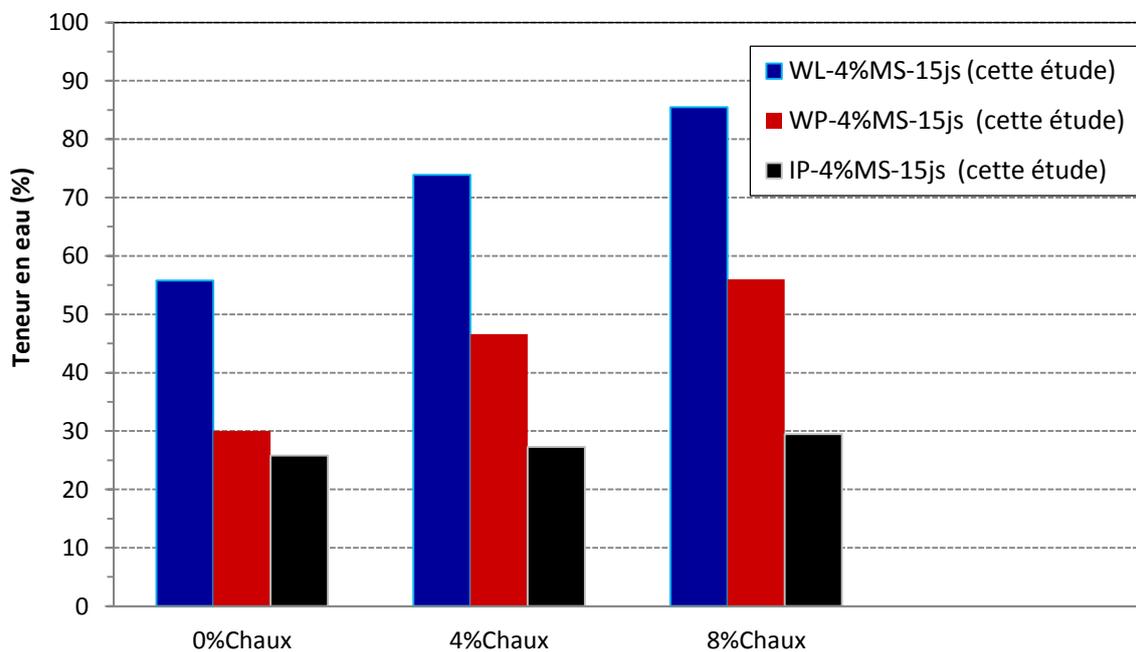
**Fig. 4.1 :** L'influence de différents dosages en chaux sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité en présence de 2% de sulfates combinés après 1 jour de cure.



**Fig. 4.2 :** L'influence de différents dosages en chaux sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité en présence de 2% de sulfates combinés après 15 jours de cure.



**Fig. 4.3 :** L'influence de différents dosages en chaux sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité en présence de 4% de sulfates combinés après 1 jour de cure.



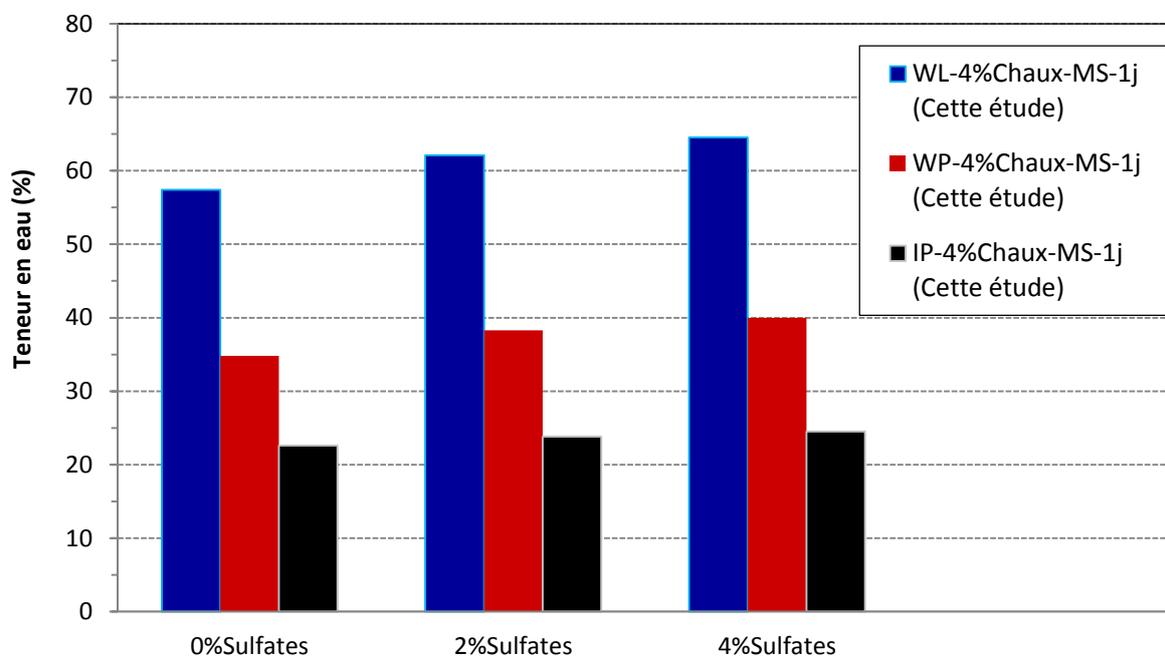
**Fig. 4.4 :** L'influence de différents dosages en chaux sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité en présence de 4% de sulfates combinés après 15 jours de cure.

### 4.2.2 Effet des sulfates sur les limites d'Atterberg

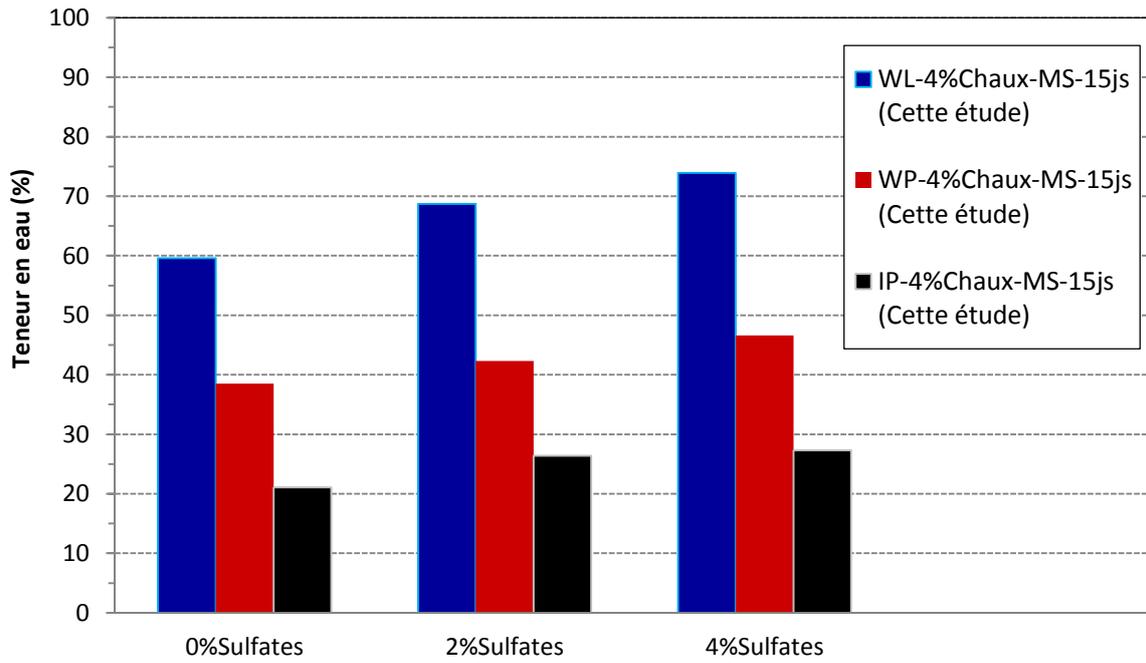
Les (Figures 4.5, 4.6, 4.7, 1.8) présentent les résultats de la modification de l'indice de plasticité du sol argileux stabilisé à la chaux en présence de différentes teneurs de sulfates combinés.

Les résultats obtenus montrant que l'addition de la chaux fait augmenter la limite de liquidité des échantillons du sol argileux stabilisé. Ceci est en parfaite concordance avec d'autres résultats de travaux de recherche antérieurs effectués par différents chercheurs [Ola, 1977; Rahaman, 1986; Ousla, 1991 ; Afés et Didier., 1999; Celal et Gokceglu., 2004;]. Cette augmentation de la limite de liquidité est attribuée à la réaction de la chaux avec les particules du sol argileux ce qui se traduit par la formation d'agents de cimentation liant ainsi les particules du sol entre elles, c'est la réaction de modification. En général on a remarque que la limite de liquidité augmente avec la durée de cure, cela est dû à l'activité de la chaux à long terme.

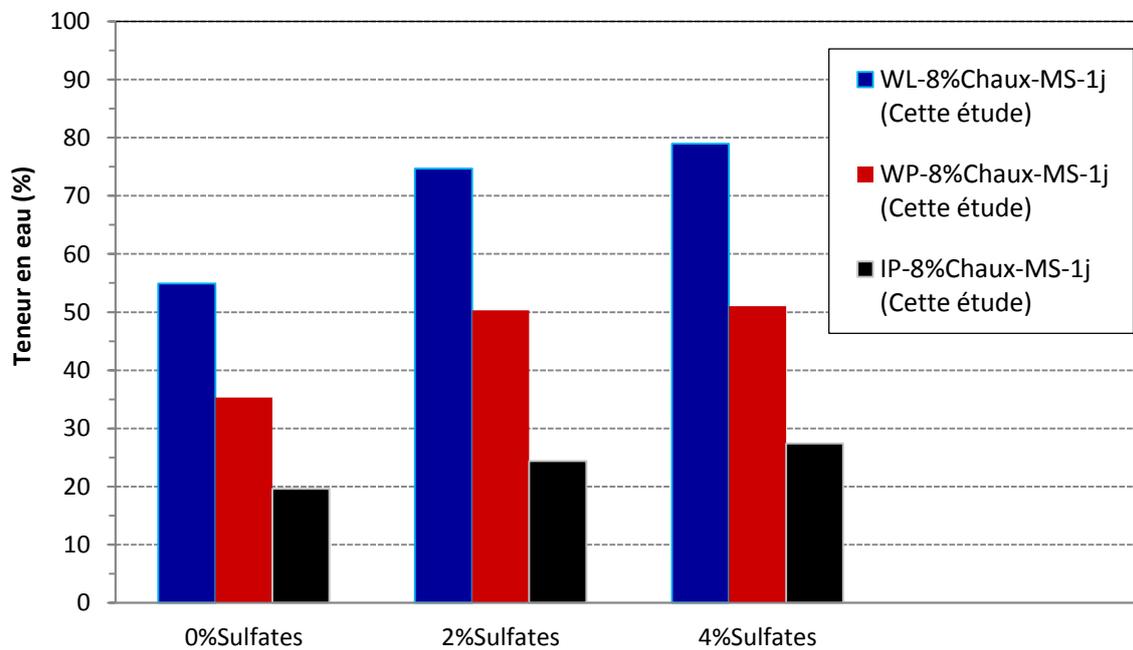
La limite de plasticité a augmenté avec l'augmentation de la période de cure et la teneur de la chaux. L'augmentation de la limite de plasticité est due à La floculations des particules du sol.



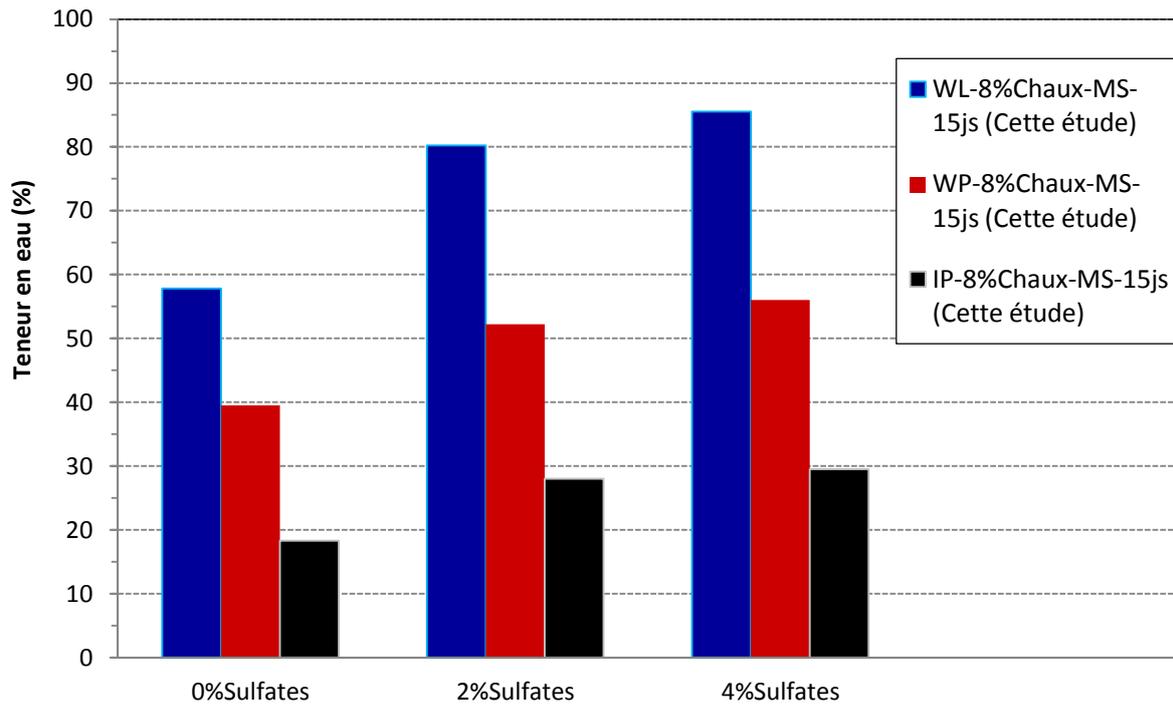
**Fig. 4.9 :** L'influence de différentes concentrations en sulfates combinés sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité avec 4% de chaux après 1 jour de cure.



**Fig. 4.10 :** L'influence de différentes concentrations en sulfates combinés sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité avec 4% de chaux après 15 jours de cure.



**Fig. 4.11 :** L'influence de différentes concentrations en sulfates combinés sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité avec 8% de chaux après 1 jour de cure..



**Fig. 4.12 :** L'influence de différentes concentrations en sulfates combinés sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité avec 8% de chaux après 15 jours de cure.

La diminution de l'indice de plasticité indique une amélioration dans la maniabilité du sol, le sol fin a montré une diminution de l'indice de plasticité après l'augmentation de la période de cure et l'addition de la chaux.

Plusieurs chercheurs ont montré la même tendance dans leurs travaux de recherche (Attoh Okine, 1995; Bagherpour et al. 2003; Sivapullaiah et al. 2003; Celal et Gokceglu., 2004; Ansary et al. 2006; Bozbey et al. 2010).

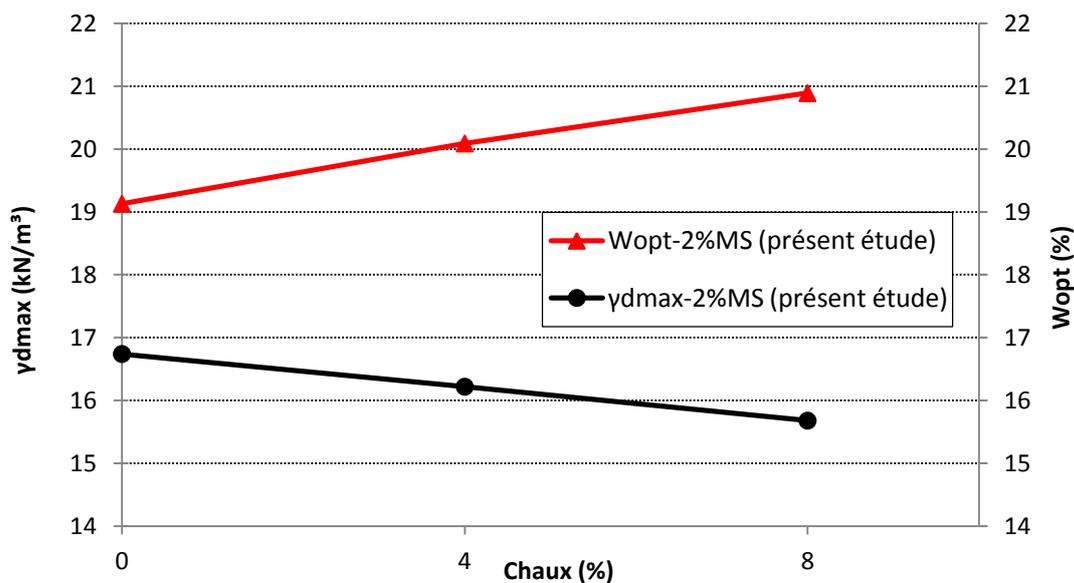
### 4.3 Variation des caractéristiques de compactage

#### 4.3.1 Effet de la chaux sur les propriétés de compactage

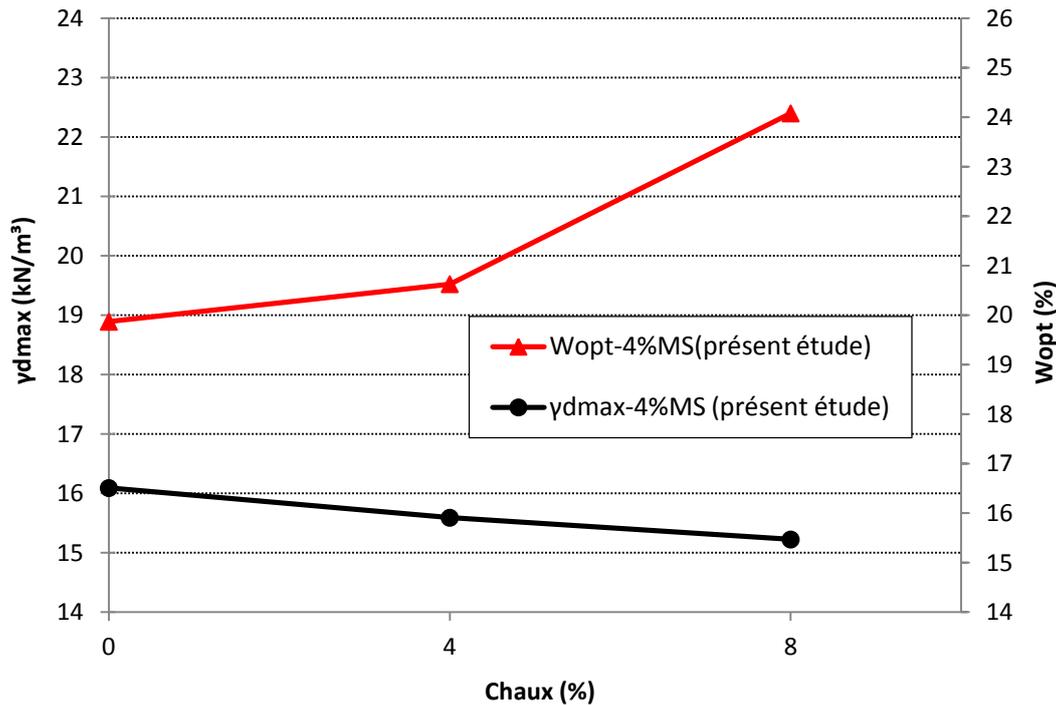
Les résultats de l'influence de différents dosages en chaux (4 et 8%) sur les propriétés de compactage du sol argileux traité en présence de 2 et 4% de sulfates combinés sont présentés dans les Figures 4.9 et 4.10. Il est très clair que lorsque en ajoutant la chaux, la densité sèche maximale diminue et la teneur en eau optimale augmente. Un comportement similaire a été observé par différents chercheurs (Ola, 1977; Rahman, 1986; George et al., 1992; Bell, 1996; Gay et al., 2000; Sivapullaiah et al., 2003; Hossain et al., 2007; Kavak et al., 2007; Manasseh

et al., 2008; Bozbey et al., 2010; Solanki et al., 2009; Harichane et al., 2011 Gadouri et al., 2019). Ce comportement est peut être expliqué par l'une des raisons suivantes :

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



**Fig. 4.9 :** L'influence de différents dosages en chaux sur les propriétés de compactage du sol argileux traité en présence de 2% de sulfates combinés

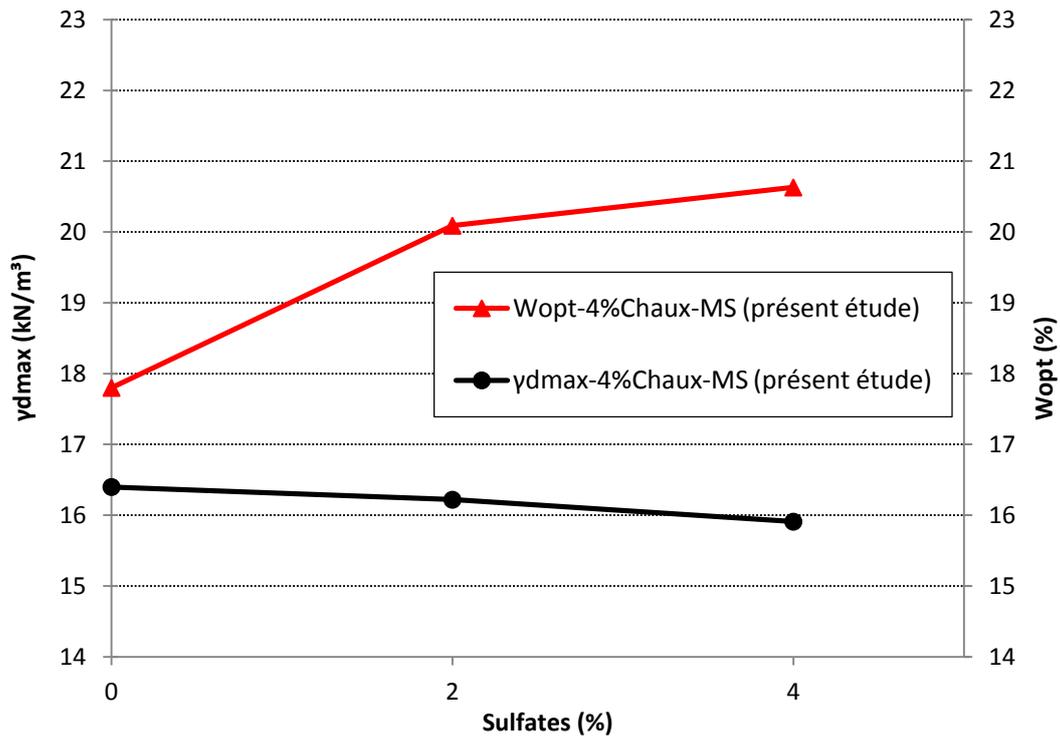


**Fig. 4.10** : L'influence de différents dosages en chaux sur les propriétés de compactage du sol argileux traité en présence de 4% de sulfates combinés.

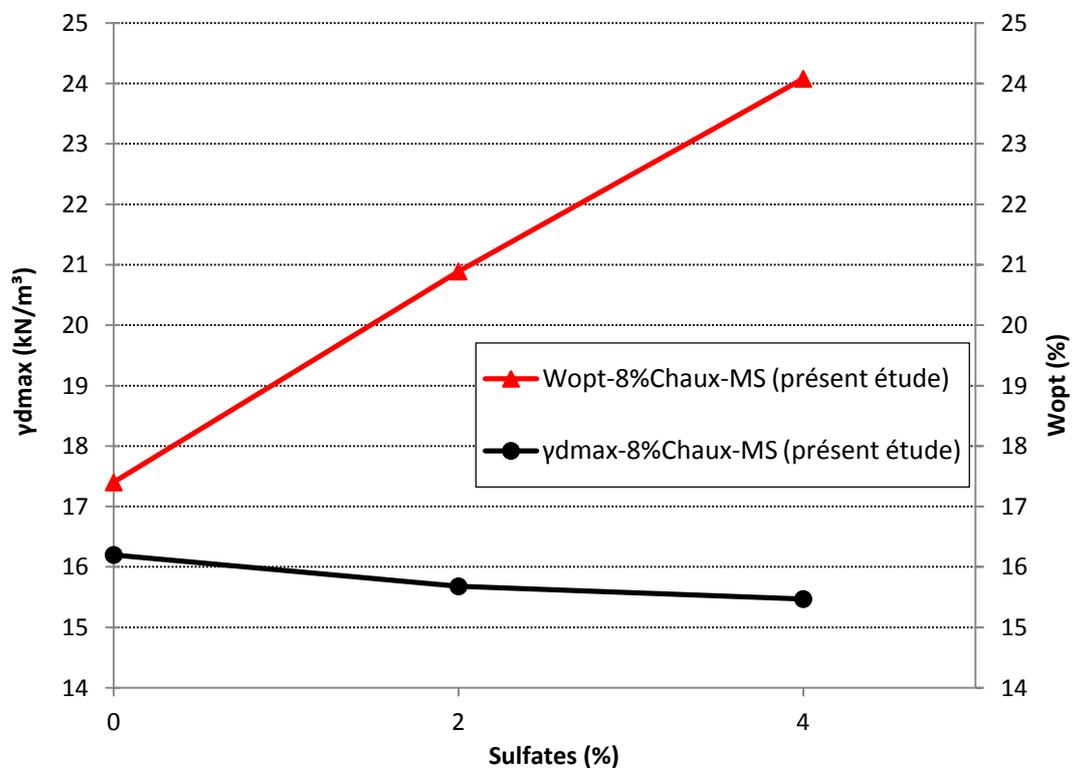
### 4.3.2 Effet des sulfates sur les propriétés de compactage

Les résultats expérimentaux concernant les caractéristiques de compactage de Proctor normal sont présentés dans les Figures 4.11 et 4.12, qui montre l'effet de la chaux, sur les caractéristiques de compactage (densité sèche maximale et teneur en eau optimale) du sol argileux traité avec du sulfates combiné et la chaux.

En présence des sulfates, les résultats montrent que le sulfate fait diminuer considérablement la densité sèche maximale et fait augmenter la teneur en eau optimale. Le même comportement a été observé pour le cas du sulfate de sodium dont il a développé des valeurs moins importantes que le sulfate de calcium. Les résultats dégagés 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 (quelque soit la concentration et le type de cations sulfates) et en augmentant la teneur en eau optimale.



**Fig. 4.11 :** L'influence de différentes concentrations en sulfates combinés sur les propriétés de compactage du sol argileux traité avec 4% de chaux.



**Fig. 4.12 :** L'influence de différentes concentrations en sulfates combinés sur les propriétés de compactage du sol argileux traité avec 8% de chaux.

## 4.4 Conclusion

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

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

# Chapitre 5

---

***Etude Comparative entre les  
Résultats Obtenus et Publiés***

## 5.1 Introduction

Il est très primordiale d'effectuer une étude comparative (ou paramétrique) entre les résultats obtenus dans la présente étude et ceux publiés dans la littérature afin de mettre en valeur le travail réalisé. Cette étude comparative consiste à comparer les résultats de l'effet de la combinaison du sulfate de sodium et de calcium avec les résultats de l'effet seul des mêmes sulfates.

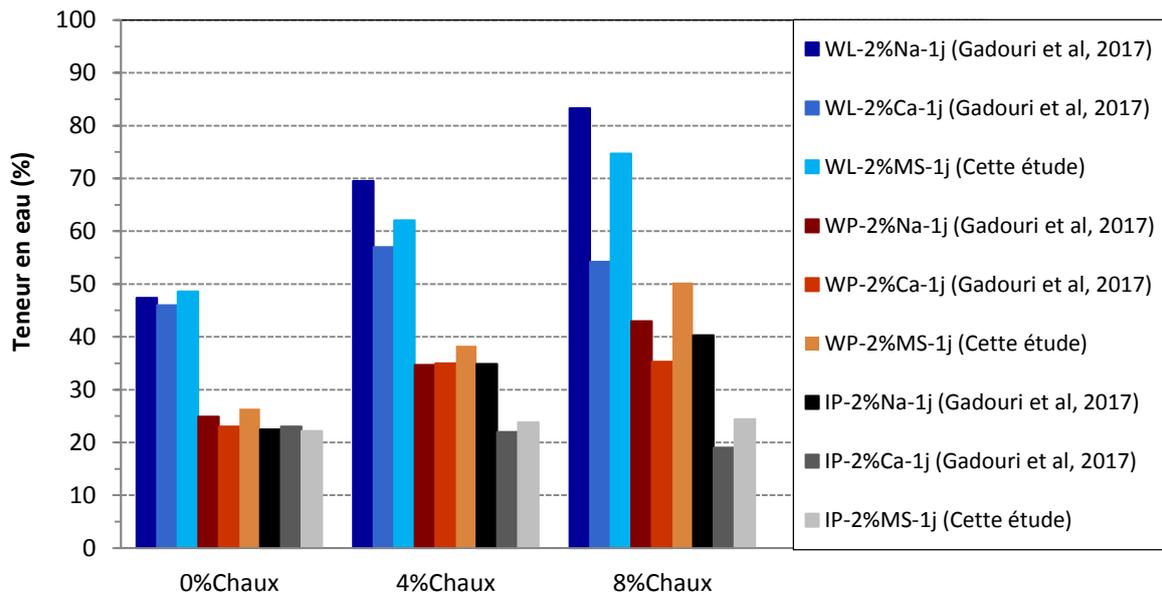
## 5.2 Variation des limites d'Atterberg

### 5.2.1 Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg

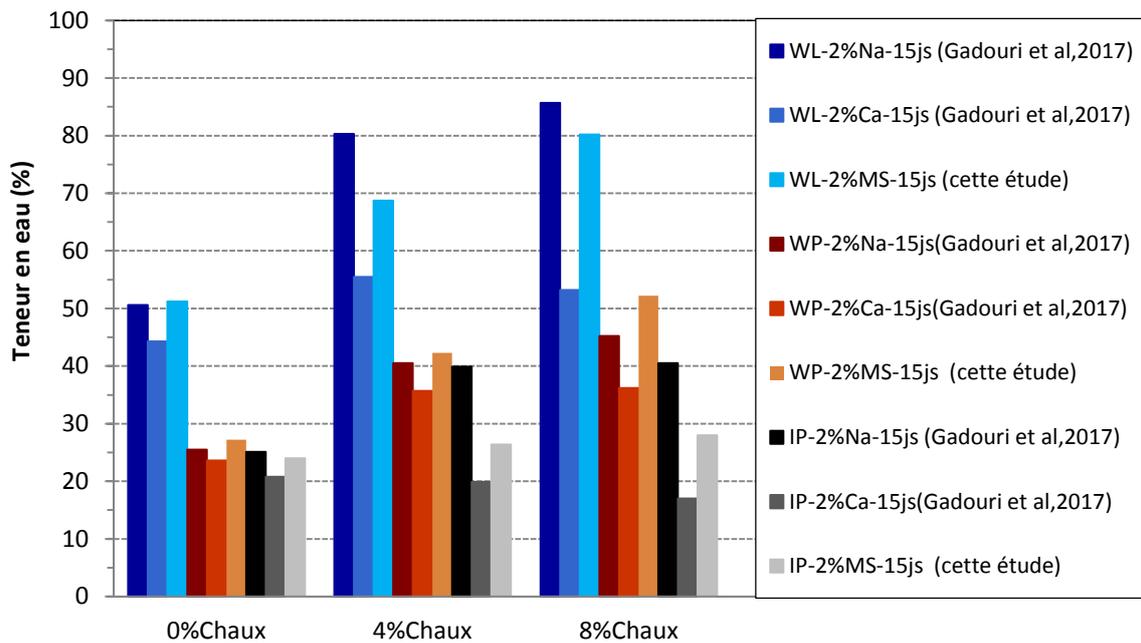
Les résultats expérimentaux concernant la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité du sol rouge argileux amélioré par la chaux pour les différentes périodes de cure sont présentés dans les (Figures 5.1, 5.2, 5.3 et 5.4).

L'addition de la chaux fait augmenter la limite de liquidité, la limite de plasticité d'échantillon du sol argileux et fait diminuer l'indice de plasticité. La diminution de l'indice de plasticité indique une amélioration dans la maniabilité du sol. Comme indiqué sur les figures précédentes, le sol fin a montré une diminution de l'indice de plasticité avec l'augmentation de la période de cure et l'addition de la chaux.

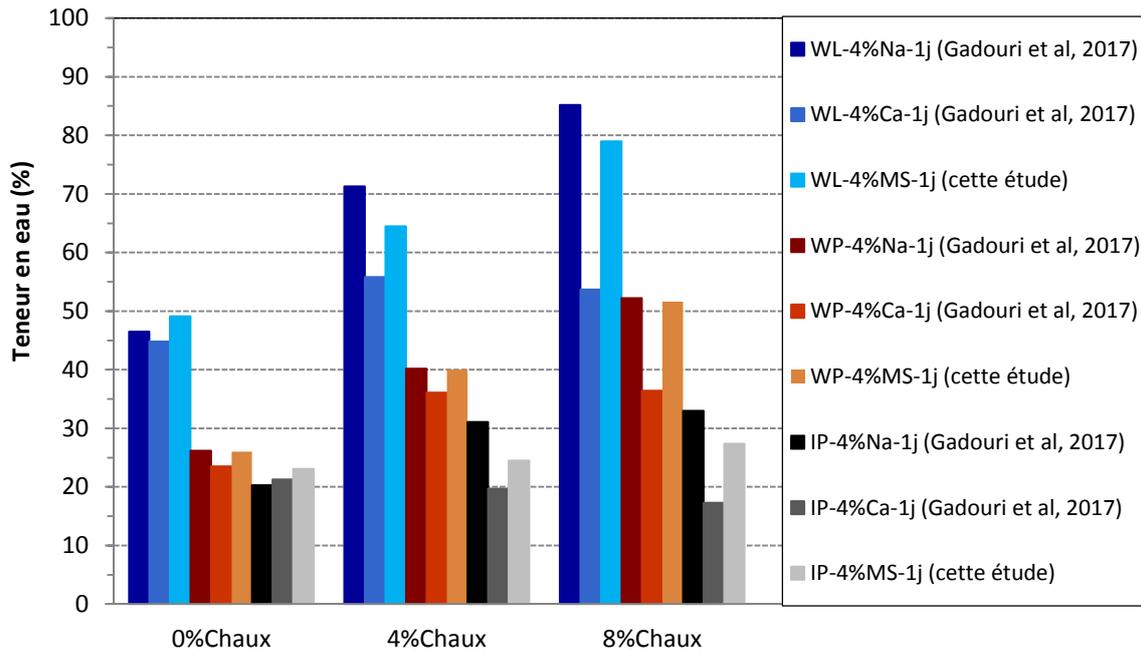
Plusieurs chercheurs ont montré la même tendance dans leurs travaux de recherche (Attoh Okine, 1995; Bagherpour et al. 2003; Sivapullaiah et al. 2000; Ansary et al. 2006; Bozbey et al. 2010). En effet, Attoh-Okine (1995) a rapporté que la diminution de la  $W_L$  est observée pour les sols composés principalement de l'argile montmorillonitique alors que son augmentation est constatée dans le cas des sols kaoliniques. En outre, Goswami and Singh (2005) ont indiqué que la façon de l'arrangement des particules ainsi que la présence de cations bivalents favorisent la floculation des particules argileuses et augmentent la  $W_L$  des sols kaoliniques.



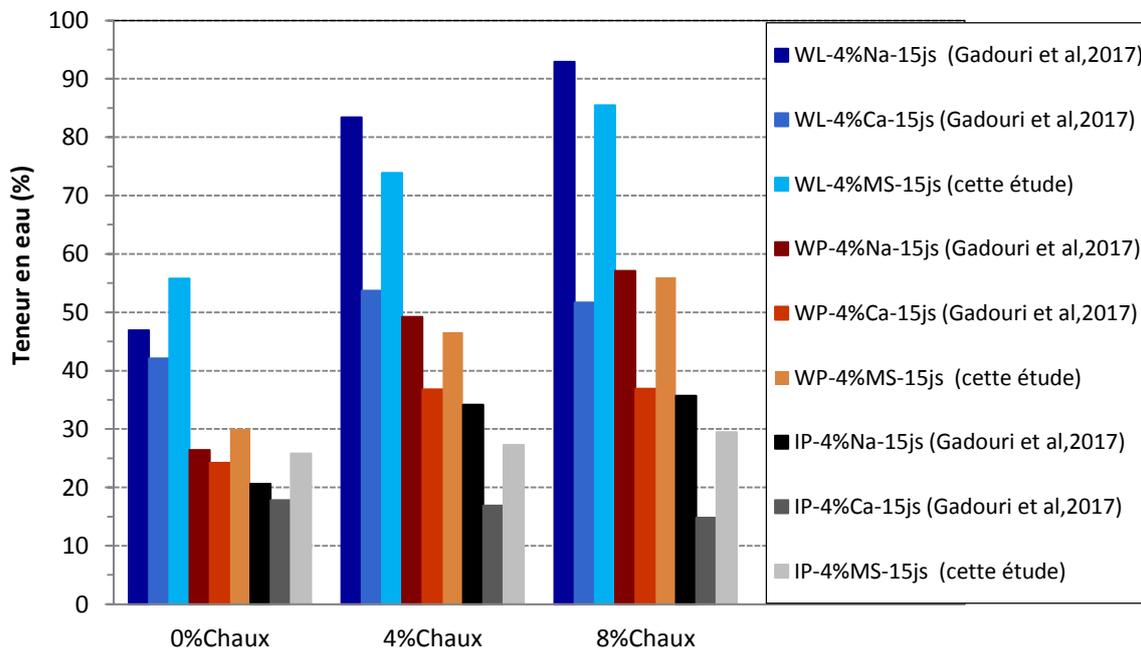
**Fig. 5.1 :** L'influence de différents dosages en chaux sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité en présence de 2% de sulfates seuls et combinés après 1 jour de cure.



**Fig. 5.2 :** L'influence de différents dosages en chaux sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité en présence de 2% de sulfates seuls et combinés après 15 jours de cure.



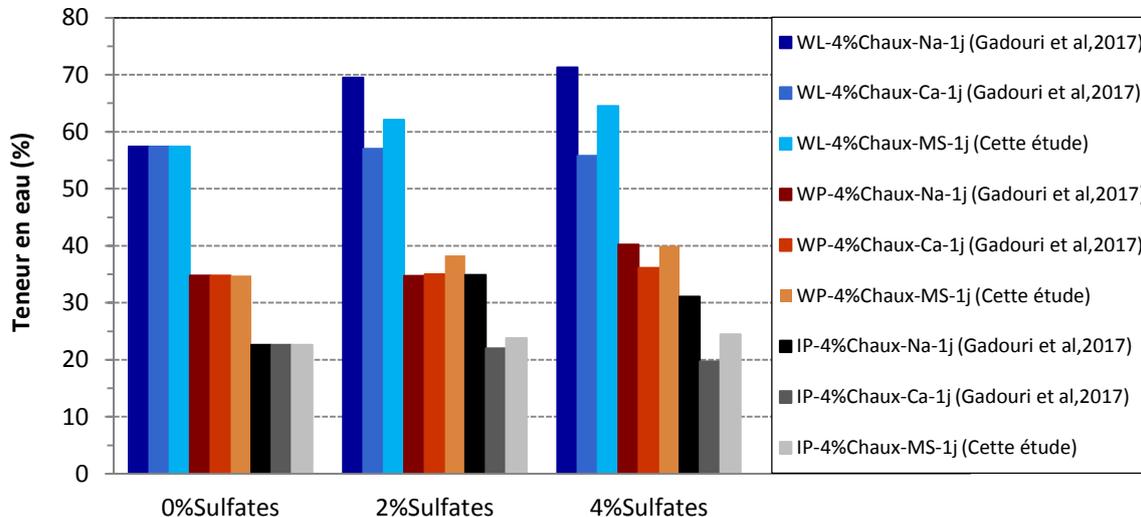
**Fig. 5.3 :** L'influence de différents dosages en chaux sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité en présence de 4% de sulfates seuls et combinés après 1 jour de cure.



**Fig. 5.4 :** L'influence de différents dosages en chaux sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité en présence de 4% de sulfates seuls et combinés après 15 jours de cure.

### 5.2.2 Effet des sulfates sur les limites d'Atterberg

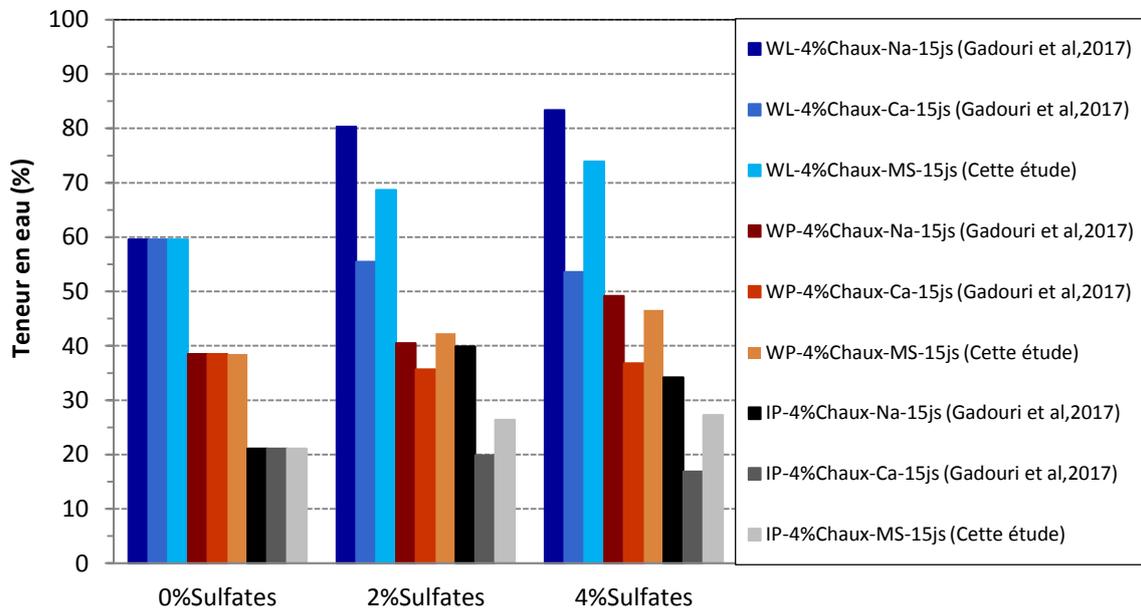
Les (Figures 5.5, 5.6, 5.7, 5.8) présentent les résultats de la modification de l'indice de plasticité du sol argileux stabilisé à la chaux en présence de différentes teneurs de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (dégagés par Gadouri et al. 2017) et de leur combinaison (MS) (évoqués dans cette étude). Gadouri et al. (2017) ont démontré que l'indice de plasticité du sol rouge traité à la chaux diminuait avec l'augmentation de la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  alors qu'il augmentait avec la période de cure. En revanche, après 15 jours de cure, l'addition de la chaux en présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  faisait diminuer l'indice de plasticité du sol argileux traité et notamment avec l'augmentation de la teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et de la teneur en chaux. Celik et Nalbantoglu (2013) ont indiqué que l'indice de plasticité d'un sol argileux stabilisé à 5% de chaux augmentait respectivement de 34 et 38% avec la présence de 5000 et 10000 ppm de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  alors qu'il était passé de 32 à 15% pour 2000 ppm de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .



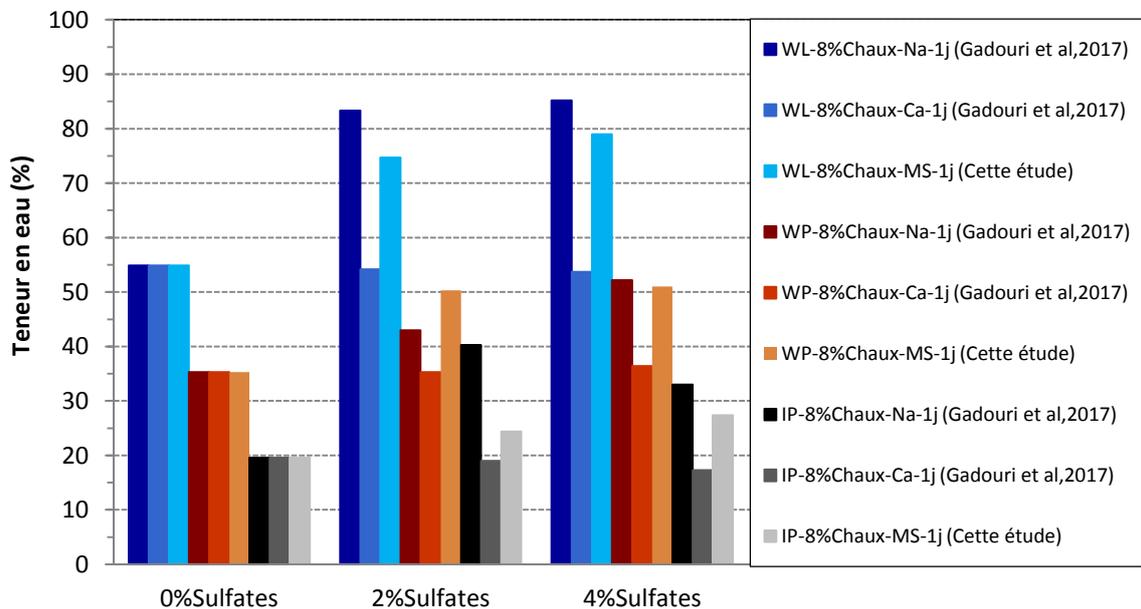
**Fig. 5.5 :** L'influence de différentes concentrations en sulfates (seuls et combinés) sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité avec 4% de chaux après 1 jour de cure.

Kinuthia et al. (1999) ont indiqué que le processus d'échange cationique pouvait affecter l'interaction entre deux particules d'argile. Les valeurs élevées de l'indice de plasticité du sol argileux traité à la chaux en présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sont probablement dues à la grande surface

spécifique des particules d'argile, qui possède une grande capacité de stockage de l'eau régie probablement par l'échange de cations monovalents tels que les ions sodium provenant essentiellement du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

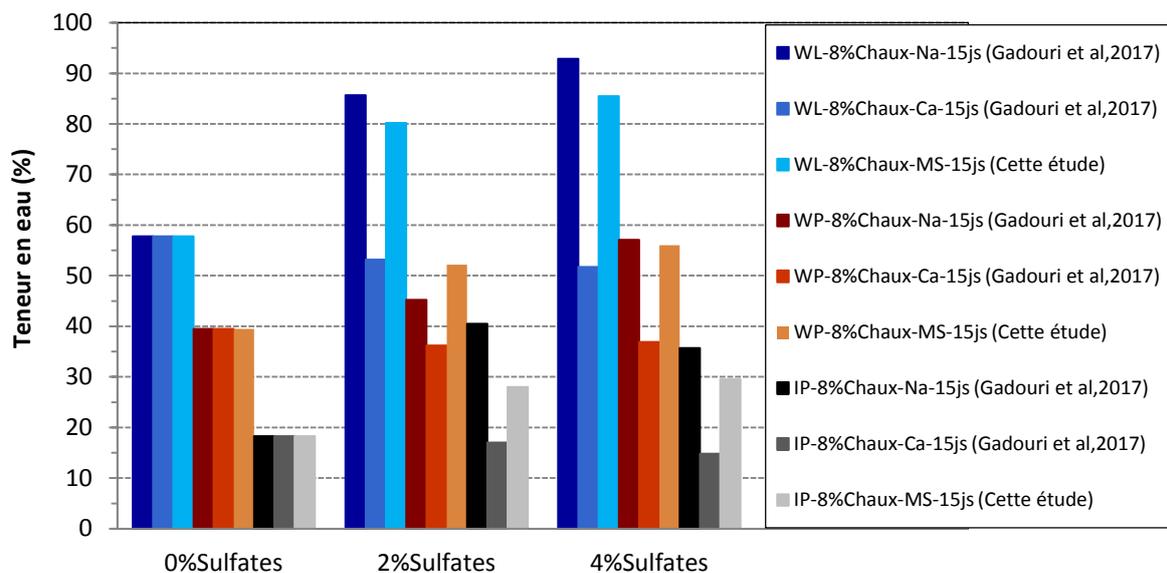


**Fig. 5.6 :** L'influence de différentes concentrations en sulfates (seuls et combinés) sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité avec 4% de chaux après 15 jours de cure.



**Fig. 5.7 :** L'influence de différentes concentrations en sulfates (seuls et combinés) sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité avec 8% de chaux après 1 jour de cure.

En général, la variation des valeurs de l'indice de plasticité est le résultat du processus d'échange de cations en faisant affecter la viscosité du mélange argile-eau. En conclusion, les cations divalents ( $\text{Ca}^{2+}$ , provenant du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) faisaient diminuer l'indice de plasticité du sol argileux traité tandis que les cations monovalents ( $\text{Na}^+$ , provenant du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) faisaient les augmenter. Cependant, dans le cas où les deux sulfates sont combinés (25% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + 75% de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), les valeurs de l'indice de plasticité restent toujours emprisonnées entre celles développées par les deux sulfates ajoutés séparément mais beaucoup plus proches aux valeurs du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Cela montre clairement que la présence du sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) joue un rôle très important en faisant garder l'indice de plasticité toujours inférieur à celui développé par le sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ce qui fait améliorer l'ouvrabilité du sol et par conséquent son compactage.



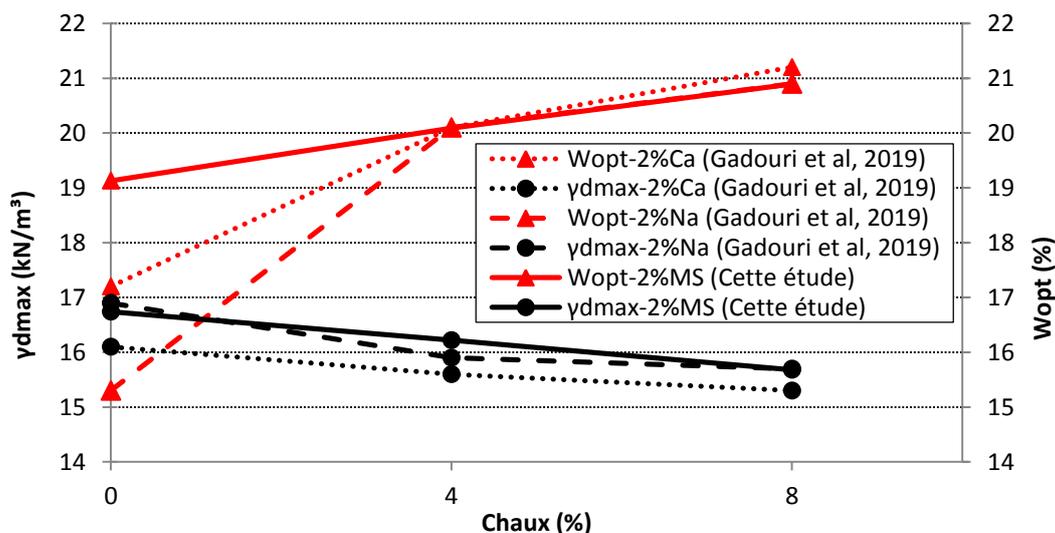
**Fig. 5.8 :** L'influence de différentes concentrations en sulfates (seuls et combinés) sur les limites d'Atterberg du sol argileux traité avec 8% de chaux après 15 jours de cure.

### 5.3 Variation des caractéristiques de compactage

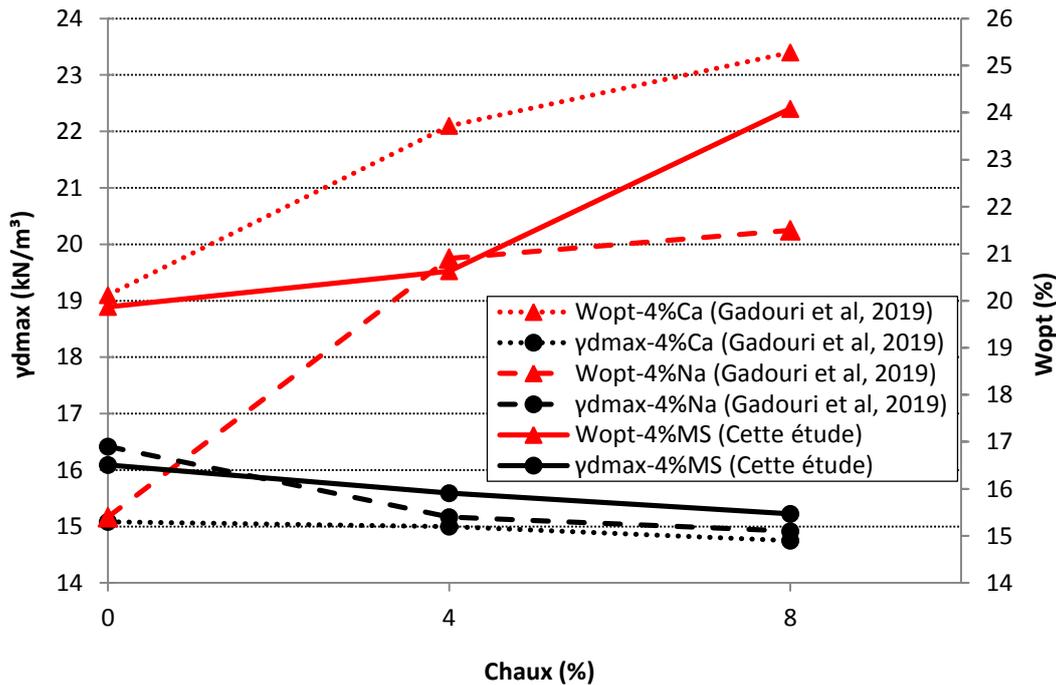
#### 5.3.1 Effet de la chaux sur les propriétés de compactage

Les résultats de l'influence de différents dosages en chaux (4 et 8%) sur les propriétés de compactage du sol argileux traité en présence de 2 et 4% de sulfates seuls et combinés sont présentés dans les Figures 5.9 et 5.10. Il est très clair que lorsque en ajoutant la chaux, la densité sèche maximale diminue et la teneur en eau optimale augmente. Un comportement similaire a été observé par différents chercheurs (Ola, 1977; Rahman, 1986; George et al., 1992; Bell, 1996; Gay et al., 2000; Sivapullaiah et al., 2003; Hossain et al., 2007; Kavak et al., 2007; Manasseh et al., 2008; Bozbey et al., 2010; Solanki et al., 2009; Harichane et al., 2011; Gadouri et al., 2019). Ce comportement est peut être expliqué par l'une des raisons suivantes :

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



**Fig. 5.9 :** L'influence de différents dosages en chaux sur les propriétés de compactage du sol argileux traité en présence de 2% de sulfates seuls et combinés.

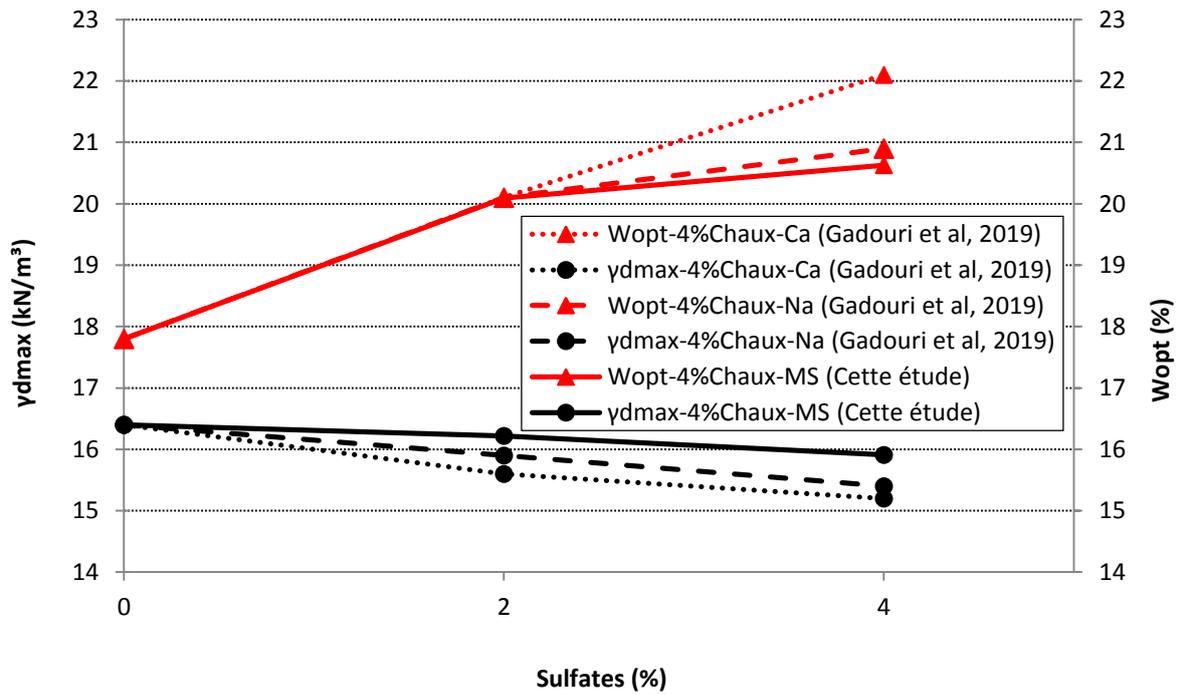


**Fig. 5.10** : L'influence de différents dosages en chaux sur les propriétés de compactage du sol argileux traité en présence de 4% de sulfates seuls et combinés.

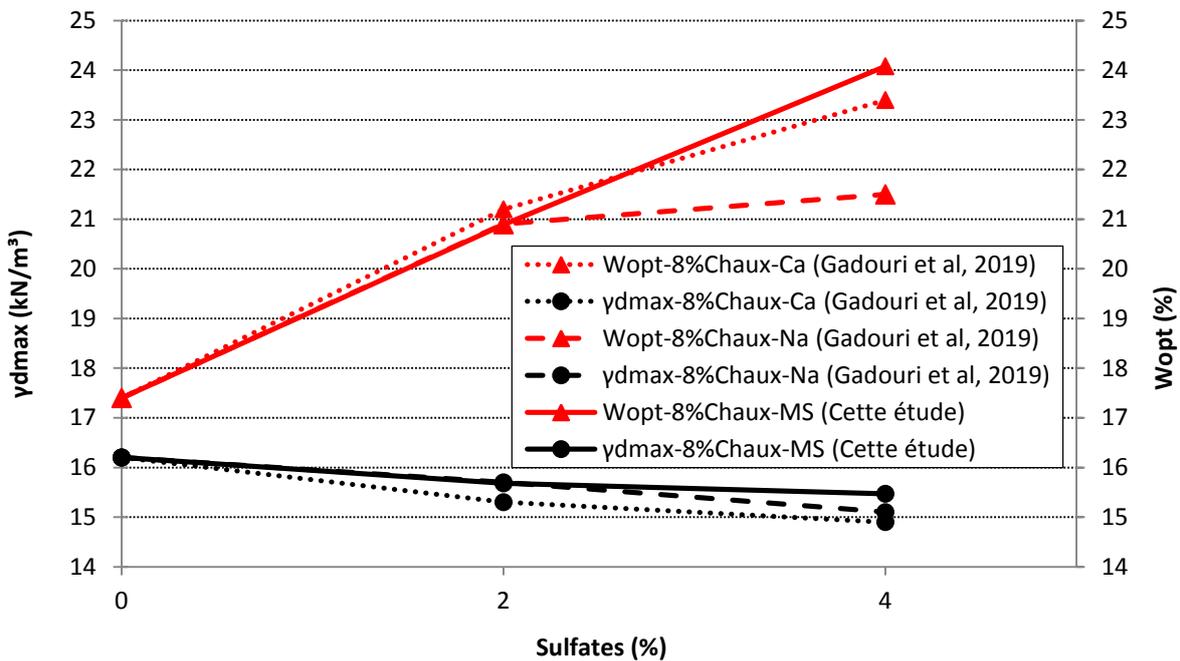
### 5.3.2 Effet des sulfates sur les propriétés de compactage

Les résultats expérimentaux concernant les caractéristiques de compactage de Proctor normal sont présentés dans les Figures 5.11 et 5.12, qui montre l'effet de la chaux, sur les caractéristiques de compactage (densité sèche maximale et teneur en eau optimale) du sol argileux traité avec du sulfates (seule et combiné) et la chaux par rapport aux résultats évoqués par Gadouri et al. (2019).

En présence des sulfates, les résultats obtenus par Gadouri et al. (2019) ont montré que le sulfate de calcium fait diminuer considérablement la densité sèche maximale et fait augmenter la teneur en eau optimale. Le même comportement a été observé pour le cas du sulfate de sodium dont il a développé des valeurs moins importantes que le sulfate de calcium. Les résultats dégagés 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 (quelque 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.



**Fig. 5.11 :** L'influence de différentes concentrations en sulfates (seuls et combinés) sur les propriétés de compactage du sol argileux traité avec 4% de chaux.



**Fig. 5.12 :** L'influence de différentes concentrations en sulfates (seuls et combinés) sur les propriétés de compactage du sol argileux traité avec 8% de chaux.

Cependant, dans le cas où les deux sulfates sont combinés (25% de  $Na_2SO_4$  + 75% de  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), les valeurs des propriétés de compactages semblent d'être constantes en présence de 2% de MS. Au-delà de cette concentration, les deux propriétés de compactage

sont bien plus grandes que celles développées par les deux sulfates additionnés tout seuls à l'exception du cas du sol rouge traité avec 4% de chaux et 4%MS où la teneur en eau optimale est bien plus petite que celle développée par les sulfates additionnés tout seuls. Cela peut être lié à une erreur de calcul ou d'exécution de l'essai ce qui nécessite de réaliser un autre essai de confirmation.

## 5.4 Conclusion

De nombreux essais ont été entrepris au laboratoire en vue d'étudier les différents effets apportés par la combinaison des deux sulfates (75% de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et 25% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) sur les propriétés de compactages ( $W_{\text{opt}}$  et  $\gamma_{\text{dmax}}$ ) et les limites d'Atterberg ( $W_L$ ,  $W_P$  et  $I_P$ ) du sol argileux rouge (SR) traité par l'utilisation de la chaux. En se basant sur les résultats des tests effectués, les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- La limite de liquidité du sol argileux non traité diminue considérablement avec l'augmentation de la teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et de la période de cure alors qu'il y a eu un effet marginal en présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Cependant, la combinaison des deux sulfates a développé des valeurs emprisonnées entre celles obtenues suite à l'addition des deux sulfates séparément. Même comportement a été observé pour le cas de la limite de plasticité sauf qu'elle augmente avec l'augmentation des concentrations en sulfates additionnés.
- Il est à noter que le sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) joue un rôle très important en faisant garder l'indice de plasticité toujours inférieur à celui développé par le sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ce qui fait améliorer l'ouvrabilité du sol et par conséquent son compactage.
- Les augmentations et les diminutions de l'indice de plasticité dépendent de plusieurs facteurs à savoir : la teneur de l'additif utilisé, la teneur et le type du sulfate en présence, la période de cure (la durée d'exposition aux sulfates) qui peut jouer un rôle très important dans les réactions chimiques avec les sulfates.
- Dans tous les cas des traitements effectués, il s'avère que les ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$  venant de l'addition de la chaux ou du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) produisent des effets bénéfiques alors que les ions sodium ( $\text{Na}^+$ , venant de l'addition du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) apportent des effets indésirables sur les limites d'Atterberg des deux sols argileux stabilisés.

---

---

# **Conclusions générales, Recommandations et Perspectives**

## 1. Conclusions générales

La plupart des sols requièrent souvent une certaine stabilisation afin d'augmenter leur stabilité mécanique et d'améliorer leur performance. En plus, l'évolution actuelle du contexte socioéconomique dans le domaine des ouvrages en terre est marquée par la nécessité de réutiliser au maximum les matériaux situés dans l'emprise des projets, même ceux dont les caractéristiques de mise en œuvre, notamment mécaniques, sont très faibles.

Bien que plusieurs chercheurs aient démontrés qu'il est possible de traiter efficacement les mauvais sols avec de la chaux, du ciment et/ou combinés aux différents ajouts minéraux.

En premier lieu, une méthodologie a été suivie pour la collecte, la sélection et la caractérisation des mauvais sols fins et ceci pour une éventuelle amélioration par addition d'ajouts cimentaires (chaux).

En second lieu, de nombreux essais ont été entrepris au laboratoire en vue d'étudier les différents effets apportés par la combinaison des deux sulfates (75% de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et 25% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) sur les propriétés de compactages ( $W_{\text{opt}}$  et  $\gamma_{\text{dmax}}$ ) et les limites d'Atterberg ( $W_L$ ,  $W_P$  et  $I_P$ ) du sol argileux rouge (SR) traité par l'utilisation de la chaux. En se basant sur les résultats des tests effectués, les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- A partir des résultats obtenus durant cette étude on peut conclure que quand la chaux est ajoutée au sol un changement appréciable dans le comportement de plasticité a été observé (Une réduction considérable de l'indice de plasticité).
- Par ailleurs, la chaux fait diminuer la densité sèche maximale et fait augmenter la teneur en eau optimale.
- L'addition de la chaux fait diminuer la densité sèche maximale mais elle fait augmenter la teneur en eau optimale.
- L'effet de la chaux qui entraîne l'agrégation des particules par le procédé complexe d'échange cationique aboutissant à une modification de la granulométrie du sol et provoquant par conséquent les particules du sol à occuper de plus grands espaces ;
- La faible densité spécifique de la chaux par rapport à celle des sols naturels testés conduit à diminuer la densité sèche maximale des sols stabilisés ;
- L'effet des réactions pouzzolaniques qui se produisent entre les particules d'argile (principalement l'alumine et la silice) et le calcium (apporté par la chaux) dans les sols

sont responsables de l'augmentation de la teneur en eau optimale vu que ce processus augmente l'affinité du sol à l'eau ;

- Les sulfates divalents influencent considérablement sur les caractéristiques de compactage que les sulfates monovalents.
- La limite de liquidité du sol argileux non traité diminue considérablement avec l'augmentation de la teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et de la période de cure alors qu'il y a eu un effet marginal en présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Cependant, la combinaison des deux sulfates a développé des valeurs emprisonnées entre celles obtenues suite à l'addition des deux sulfates séparément. Même comportement a été observé pour le cas de la limite de plasticité sauf qu'elle augmente avec l'augmentation des concentrations en sulfates additionnés.
- Il est à noter que le sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) joue un rôle très important en faisant garder l'indice de plasticité toujours inférieur à celui développé par le sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ce qui fait améliorer l'ouvrabilité du sol et par conséquent son compactage.
- Les augmentations et les diminutions de l'indice de plasticité dépendent de plusieurs facteurs à savoir : la teneur de l'additif utilisé, la teneur et le type du sulfate en présence, la période de cure (la durée d'exposition aux sulfates) qui peut jouer un rôle très important dans les réactions chimiques avec les sulfates.
- Dans tous les cas des traitements effectués, il s'avère que les ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$  venant de l'addition de la chaux ou du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) produisent des effets bénéfiques alors que les ions sodium ( $\text{Na}^+$ , venant de l'addition du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) apportent des effets indésirables sur les limites d'Atterberg des deux sols argileux stabilisés.

## **2. Recommandations**

- Il est très recommandé d'utiliser le gypse comme additif pour le traitement des sols fins contenant des sulfates de sodium ;
- Il est recommandé d'effectuer des analyses chimiques sur les sols afin de prévoir les échecs du traitement liés aux sulfates.

### **3. Perspectives**

Dans une perspective de recherche, plusieurs domaines méritent au moins d'être approfondis tels que :

- Etude de la durabilité du traitement dans des conditions environnementales variées et sévères en présence des sulfates en état combinés ou d'autres composés chimiques.
- Etude et évaluation de l'efficacité du traitement en présence de différents composés organiques en termes de gain de résistance.
- Analyser l'effet de la période de cure sur les sols améliorés par d'autres ajouts en présence des sulfates.
- Pour les futures études, il sera très important d'approfondir la recherche sur les effets qui peuvent être apportés par d'autres composés chimiques autre que les sulfates sur les sols traités à savoir : les chlorures, les phosphates, les nitrates...etc.
- Vu l'intensité des réseaux routiers construits actuellement en Algérie ainsi que les grandes quantités de remblai présentant des propriétés mécaniques insuffisantes, ou voire médiocres, il sera donc très nécessaire de développer des liants hydrauliques à base de Gypse-Chaux.
- L'étude de l'effet combiné d'autres composés chimiques entre eux est primordiale du fait que ces derniers se présentent réellement en état combiné dans leur environnement naturel.

---

---

# **Références Bibliographiques**

## Références bibliographiques

- Aldaood, A., Bouasker, M. and Al-Mukhtar, M. (2014a). Geotechnical properties of lime-treated gypseous soils, *Applied Clay Science*, Vol. 88-89, pp. 39–48, doi: 10.1016/j.clay.2013.12.015.
- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A. and Alcover, J.F. (2010). Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C. *Applied Clay Science*, Vol. 50, No. 2, pp. 191–198, doi:10.1016/j.clay.2010.07.023.
- 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.
- Attoh Okine, N.O. (1995). Lime treatment of laterite soils and gravels-revisite. *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No. 5, pp. 283–287, doi: 0950-0618(95)00030-5.
- 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.
- 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.
- Caillère, S., Hénin, S. and Rautureau, M. (2016). *Minéralogie des argiles: Structure et propriétés physico-chimiques*. Masson, Tomes 1 & 2, pp. 184–189.
- Classification des sols selon leurs propriétés mécaniques, C-1983.
- Harichane, K., Ghrici, M. and Kenai, S. (2011). Effect of curing period on shear strength of cohesive soils stabilized with combination of lime and natural pozzolana, *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 90–96.
- Ho, M.H. and Chan, C.M. (2011). Some Mechanical Properties of Cement Stabilized Malaysian Soft Clay. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 76–83, scholar.waset. org/1999.3/10197.
- Gadouri H, Harichane K, Ghrici M (2015) Effects of sodium sulphate on clayey soils improved by cementitious additives. Paper presented at 13th Arab Structural Engineering Conference, University of Blida 1, Dec 13–15th, 2015, 13, 513p, Algeria. [https://www.researchgate.net/publication/312296820\\_Effets\\_du\\_Sulfate\\_de\\_Sodium\\_sur\\_des\\_Sols\\_Argileux\\_Ameliores\\_par\\_des\\_Ajouts\\_Cimentaires](https://www.researchgate.net/publication/312296820_Effets_du_Sulfate_de_Sodium_sur_des_Sols_Argileux_Ameliores_par_des_Ajouts_Cimentaires).
- Gadouri H, Harichane K, Ghrici M (2016a) 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.
- Gadouri H, Harichane K, Ghrici M (2016b) Assessment of sulphates effect on the classification of soil–lime–natural pozzolana mixtures based on the Unified Soil Classification System (USCS). *Int J Geotech Eng* 12(3):293–301. doi:10.1080/19386362.2016.1275429.
- Gadouri H, Harichane K, Ghrici M (2017a) Effect of calcium sulphate on the geotechnical properties of stabilized clayey soils. *Period Polytech Civil Eng* 61(2):256–271. doi: 10.3311/PPci.9359.
- Gadouri H, Harichane K, Ghrici M (2017b) A comparison study between CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> effects on geotechnical properties of clayey soils stabilised with mineral additives to recommend

- adequate mixtures as materials for road pavements. *Int J Geotech Eng* 13(1):61–82. doi: 10.1080/19386362.2017.1320850.
- Gadouri H, Harichane K, Ghrici M (2017c) Assessment of sulphates effect on pH and pozzolanic reactions of soil–lime–natural pozzolana mixtures. *Int J Pavement Eng* 1–14. doi: 10.1080/10298436.2017.1337119
- Gadouri H (2017) Influence of sulphates on the stabilization of clayey soils using mineral additives. Ph.D thesis, Medea University, Algeria. [https://www.researchgate.net/publication/330912668\\_Influence\\_of\\_sulphates\\_on\\_the\\_stabilization\\_of\\_clayey\\_soils\\_using\\_mineral\\_additives](https://www.researchgate.net/publication/330912668_Influence_of_sulphates_on_the_stabilization_of_clayey_soils_using_mineral_additives).
- Gadouri H, Harichane K, Ghrici M (2019) Effect of sulphates and curing period on stress–strain curves and failure modes of soil–lime–natural pozzolana mixtures. *Mar Georesour Geotec* 1–19. doi: 10.1080/1064119X.2018.1537321.
- George, S.Z., Ponniah, D.A. and Little, J.A. (1992). Effect of temperature on lime-soil stabilization. *Construction and Building Materials*, Vol. 6, No. 4, pp. 247–252, doi: 10.1016/0950-0618(92)90050-9.
- 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.
- Locat, J., Berube, M.A. and Choquette, M. (1990). Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, No. 3, pp. 294–304, doi: 10.1139/t90-040.
- Laguros, J.G. (1962). Effect of chemicals on soil-cement stabilization. *Retrospective Theses and Dissertations*, Paper 2061, p. 167, <http://lib.dr.iastate.edu/rtd/2061/>.
- LCPC –SETRA. (2000). Laboratoire central des ponts et chaussées, France.
- McCarthy, M. J., L. J. Csetenyi, A. Sachdeva, and R. K. Dhir. (2012). Identifying the Role of Fly Ash Properties for Minimizing Sulfate Heave in Lime-Stabilized Soils. *Fuel* 92: 27–36.
- Ola, S.A. (1977). The potentials of lime stabilization of lateritic soils. *Engineering Geology*, Vol. 11, No. 4, pp. 305–317, doi: 10.1016/0013-7952(77)90036-9.
- Osula, D.O.A. (1991). Lime modification of problem laterite. *Engineering Geology*, Vol. 30, No. 2, pp. 141–154, doi: 10.1016/0013-7952(91)90040-R.
- 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.
- Ouhadi et al. (2014). 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.
- Parsons, R.L. and Kneebone, E. (2005). Field performance of fly ash stabilized subgrade. *Ground Improvement*, Vol. 9, No. 1, pp. 33–38.
- 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.

Silitonga, E., Levacher, D. and Mezazigh, S. (2010). Utilization of fly ash for stabilization of marine dredged sediments. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 253–265. <http://www.tandfonline.com/loi/tece20>.

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

Varghese P.C. (2005). *Foundation engineering*. New Delhi: PHI learning private limited, India.

Zoubir, W., K. Harichane, and M. Ghrici, (2013). Effect of lime and natural pozzolana on dredged sludge engineering properties. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 18 (c): 589–600.

---

---

# **Annexes**

## 1. Résultats des limites d'Atterberg (Gadouri et al. 2017)

### 1.1 Résultats des limites d'Atterberg du sol traité à la chaux en absence des sulfates après 1 jour de cure (Gadouri et al. 2017)

Sulfates	La teneur en chaux			
		0%	4%	8%
0%	WL	46.5	57.4	54.9
0%	WP	22.7	34.8	35.3
0%	IP	23.8	22.6	19.6

### 1.2 Résultats des limites d'Atterberg du sol traité à la chaux en absence des sulfates après 15 jours de cure (Gadouri et al. 2017)

sulfates	La teneur en chaux			
		0%	4%	8%
0%	WL	45.5	59.6	57.8
0%	WP	21.5	38.5	39.5
0%	IP	24	21.1	18.3

### 1.3 Résultats des limites d'Atterberg en présence du sulfate de sodium après 1 jour de cure (Gadouri et al. 2017)

Na	La teneur en chaux			
		0%	4%	8%
2%	WL	47.4	69.5	83.3
2%	WP	24.9	34.7	43.0
2%	IP	22.5	34.9	40.3
4%	WL	46.5	71.3	85.2
4%	WP	26.2	40.2	52.2
4%	IP	20.3	31.1	33.0

1.4 Résultats des limites d'Atterberg en présence du sulfate de calcium après 1 jour de cure (Gadouri et al. 2017)

Ca	La teneur en chaux			
		0%	4%	8%
2%	WL	46.0	57	54.2
2%	WP	23	35	35.3
2%	IP	23	22	19
4%	WL	44.8	55.8	53.7
4%	WP	23.5	36.1	36.4
4%	IP	21.3	19.7	17.3

1.5 Résultats des limites d'Atterberg en présence du sulfate de sodium après 15 jours de cure (Gadouri et al. 2017)

Na	La teneur en chaux			
		0%	4%	8%
2%	WL	50.6	80.3	85.7
2%	WP	25.5	40.5	45.2
2%	IP	25.1	39.9	40.5
4%	WL	46.9	83.4	92.9
4%	WP	26.4	49.2	57.1
4%	IP	20.6	34.2	35.7

1.6 Résultats des limites d'Atterberg en présence du sulfate de sodium après 15 jours de cure (Gadouri et al. 2017)

Ca	La teneur en chaux			
		0%	4%	8%
2%	WL	44.3	55.5	53.2
2%	WP	23.6	35.7	36.2
2%	IP	20.8	19.9	17.0
4%	WL	42.1	53.6	51.7
4%	WP	24.2	36.8	36.9
4%	IP	17.8	16.9	14.8

## 2. Résultats des limites d'Atterberg (Présente étude)

### 2.1 Résultats des limites d'Atterberg en présence des deux sulfates après 1 jour de cure (Présente étude)

MS	La teneur en chaux			
		0%	4%	8%
2%	WL	48.6	62.1	74.7
2%	WP	26.4	38.3	50.3
2%	IP	22.2	23.8	24.4
4%	WL	49.1	64.5	79.0
4%	WP	26.0	40.0	51.6
4%	IP	23.1	24.5	27.4

### 2.2 Résultats des limites d'Atterberg en présence des deux sulfates après 15 jours de cure (Présente étude)

MS	La teneur en chaux			
		0%	4%	8%
2%	WL	51.2	68.7	80.2
2%	WP	27.2	42.3	52.2
2%	IP	24.0	26.4	28.0
4%	WL	46.2	73.9	85.5
4%	WP	30.6	32.7	36.4
4%	IP	18.5	41.2	49.1

## 3. Résultats des propriétés de compactages (Gadouri et al. 2019)

### 3.1 Résultats des propriétés de compactage en présence du sulfate de sodium (Gadouri et al. 2019)

Ca	La teneur en chaux			
		0%	4%	8%
0%	OMC	15.3	17.8	17.4
0%	MPP	16.9	16.4	16.2
2%	OMC	17.2	20.1	21.2
2%	MPP	16.1	15.6	15.3
4%	OMC	19.1	22.1	23.4
4%	MPP	15.3	15.2	14.9

### 3.2 Résultats des propriétés de compactage en présence du sulfate de calcium (Gadouri et al. 2019)

Na	La teneur en chaux			
		0%	4%	8%
0%	OMC	15.3	17.8	17.4
0%	MPP	16.9	16.4	16.2
2%	OMC	15.3	20.1	20.9
2%	MPP	16.9	15.9	15.7
4%	OMC	15.4	20.9	21.5
4%	MPP	16.9	15.4	15.1

### 3.3 Résultats des propriétés de compactage en présence des deux sulfates (Présente étude)

MS	La teneur en chaux			
		0%	4%	8%
2%	OMC	19.13	20.09	20.89
2%	MPP	16.74	16.22	15.68
4%	OMC	19.87	20.63	24.08
4%	MPP	16.51	15.91	15.47

Effet de la durée de cure et la teneur en chaux sur les propriétés de compactage