

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة يحي فارس – المدية –

Université Yahia Farès – Médéa –

Faculté de la Technologie

Département de Génie Civil



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTORAT LMD**

En : Génie Civil

Spécialité : Ingénierie de Constructions et Risques Géotechniques

Par : GADOURI Hamid

Thème

**Influence de la présence des sulfates sur le traitement des
sols argileux par des ajouts minéraux**

Soutenue publiquement le : 24 / 05 / 2017

Devant le jury composé de:

DEBIEB Farid	Professeur	Université de Médéa	Président
BAHAR Ramdhan	Professeur	Université de Bab Ezzouar	Examineur
KHEMISSA Mohamed	Professeur	Université de M'Sila	Examineur
ZITOUNI Zein El-Abidine	Maitre de Conférences (A)	Université de Blida	Examineur
HARICHANE Khelifa	Maitre de Conférences (A)	Université de Chlef	Directeur de thèse
GHRICI Mohamed	Professeur	Université de Chlef	Co-Directeur de thèse

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 qui n'ont cessé de me combler par leur tendresse et leur amour, que Dieu leur bénisse et leur accorde une longue vie.

À tous les membres de ma famille sans aucune exception.

À mes très chers enseignants Mira Fillali, Karima Chouchane, Madjid Mehaigune... pour leur soutien moral, et pour tous les sentiments d'affection et d'amour qui représentent pour moi le pilier de tous mes efforts.

À mes très chers amis Mohamed Khellas, Ali Moussaoui, Ibrahim Miziani, Youcef Meghraoui, Aziz Saidi et Sidik Adam Batran pour leur soutien moral.

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



Remerciements

Je tiens à adresser mes 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 thèse.

En premier lieu, j'exploite cette occasion qui m'est offerte pour adresser mes plus vifs remerciements et exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, **Dr. Khelifa HARICHANE**, Maître de conférences (A) à l'Université de Chlef, et également à mon Codirecteur de thèse, **Dr. Mohamed GHRICI**, Professeur à l'Université de Chlef, pour m'avoir proposé un sujet ambitieux et motivant, leur appui constant, leurs encouragements et leurs conseils d'or depuis mon stage, pour leur patience, leur générosité et disponibilité au cours de ma formation doctorale, pour m'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 thèse.

Il m'est agréable de remercier sincèrement **Dr. Farid DBIEB**, Professeur à l'Université de Médéa d'avoir accepté de présider le jury. J'adresse également mes vifs remerciements et les expressions de toute ma gratitude aux **Dr. Ramdhan BAHAR**, Professeur à l'Université de Bab-Zouar, **Dr. Mohamed KHEMISSA**, Professeur à l'Université de M'sila et également **Dr. Zein El-Abidine ZITOUNI**, Maître de conférences (A) à l'Université de Blida, pour avoir accepté d'examiner avec toute l'attention voulue le présent travail.

Je tiens à remercier vivement **Dr. Saïd KENAI** et **Dr. Khaled GRINE**, Professeurs à l'Université de Blida, également, **Dr. Othman BOUKENDAKDJI**, Professeur à l'Université de Médéa, pour leur collaboration au cours de la rédaction de mes projets de publication.

Mes plus vifs remerciements sont adressés à **Mr. Mohamed MOUSSAOUI**, Directeur du Laboratoire de l'Habitat et de la Construction Centre (LHCC, Rouiba, Algérie), d'avoir m'offrir de bonnes conditions de travail avec un soutien financier. Je tiens à remercier également les techniciens et les personnels techniques du LHCC pour leur aide au cours de l'exécution du programme expérimental, sans eux cette étude n'aurait pas été possible.

J'exprime ma plus grande reconnaissance à **Dr. Hamid BENOUDA**, Chef du département de l'hydraulique, d'avoir m'autorisé l'accès au laboratoire de l'hydraulique et avoir mis à ma disposition le matériel indispensable pour la préparation des matériaux. Mes vifs remerciements sont également adressés aux techniciens du même laboratoire pour leur aide et parfaite confiance, sans eux les matériaux n'auraient jamais pu être préparés.

الملخص

أجريت دراسة تجريبية على مستوى المخبر، بهدف تقييم الآثار الناجمة عن وجود كل من كبريتات الكالسيوم ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) والصدويوم (Na_2SO_4) على حدود أتريارغ وكذا مقاومتي الضغط البسيط والقص لكل من الترتين الطينيتين اللتين تمت معالجتهما باستعمال الجير المعالج (L; 0–20%)، البوزولان الطبيعي (PN; 0–20%) أو بدمجهما معا (L–PN). كما أُجري اختبار الضغط البسيط والقص على عينات الترتين بعد 7، 30، 60 و 120 يوما من العلاج.

ففي غياب الكبريتات أظهرت النتائج أنه يمكن معالجة كلتا الترتين الطينيتين بنجاح، وذلك بإضافة الجير المعالج وحده أو بدمجه مع البوزولان الطبيعي. ومن جهة أخرى قد لوحظ انخفاض جد محسوس في مؤشر اللدونة وزيادات كبيرة في مقاومتي الضغط البسيط والقص. في حين أن إضافة البوزولان الطبيعي وحده لكلتا الترتين الطينيتين قد أظهر تأثير طفيف على كافة الخصائص التي شملتها هذه الدراسة.

أما في حالة وجود الكبريتات بنوعها وبكميات مختلفة خلال فترات علاج قصيرة المدى، فقد لوحظت زيادات جد معتبرة في مقاومتي الضغط البسيط والقص لكلتا الترتين الطينيتين اللتين تمت معالجتهما باستعمال الجير المعالج وحده أو بدمجه مع البوزولان الطبيعي. من جهة أخرى، خلال فترات علاج طويلة المدى، ومهما يكن نوع العنصر المعدني المستخدم كمعالج ومهما تكن كمية $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ المضافة لعينات الترتين الطينيتين، فإن قيم كافة الخصائص التي شملتها هذه الدراسة قد تحسنت شيئا فشيئا إذا ما قارناها بنفس العينات التي لا تحتوي على المركب الكيميائي $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. من جهة أخرى، في حالة وجود مستويات عالية من المركب الكيميائي Na_2SO_4 ، فقد لوحظ أن جميع عينات التربة الحمراء التي تمت معالجتها باستعمال الجير المعالج أو البوزولان الطبيعي على حدى فقدت تماسكها كلية باستثناء تلك التي تمت معالجتها بدمج الجير و البوزولان الطبيعي معا. ويرجع هذا أساسا إلى تشكل معدن الإترنجيت الذي تم ملاحظته على مستوى المنحنيات البيانية الإشعاعية (XRD) لكلتا الترتين. وعلاوة على ذلك، أظهرت الصور (SEM) تشكل المركبات الاسمنتية (C–S–H و C–A–H) المسؤولة عن الزيادة في قيمة المقاومة الميكانيكية لكلتا الترتين الطينيتين. وبشكل عام فإنه من خلال النتائج المتحصل عليها على مستوى المخبر فإنه يظهر جليا أن نجاح التثبيت الكيميائي للأترية الطينية يتعلق بعدة عوامل نذكر منها كمية ونوعية الكبريتات المستعملة، نوع وكمية العنصر المعالج المضاف، مدة التخمر وأخيرا التركيبة المعدنية للتربة.

الكلمات المفتاحية: التربة الطينية، الجير المعالج، البوزولان الطبيعي، الكبريتات، المعالجة، المقاومة، اللدونة.

RESUME

Une investigation expérimentale a été effectuée afin d'évaluer les effets apportés par la présence des sulfates de calcium et de sodium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Na_2SO_4) sur les limites d'Atterberg, la résistance à la compression non confinée (RCS) et la résistance au cisaillement des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux (L, 0–8%), de la pouzzolane naturelle (PN, 0–20%) et de leur combinaison (L–PN). Les essais de la compression simple et du cisaillement direct ont été effectués sur des éprouvettes des deux sols argileux stabilisés après 7, 30, 60 et 120 jours de cure.

En absence des sulfates, les résultats obtenus ont montré que les deux sols argileux peuvent être stabilisés avec succès par l'addition de la chaux toute seule ou en combinaison avec la PN. En effet, des réductions significatives dans l'indice de plasticité et des augmentations considérables dans la RCS et au cisaillement ont été observées. Cependant, l'addition de la PN toute seule aux deux sols traités n'apporte qu'un effet marginal sur toutes les propriétés étudiées.

En présence des sulfates, à très court terme, quelque soit la teneur et le type du sulfate utilisé, des augmentations significatives ont été observées pour les valeurs de la RCS et de la résistance au cisaillement des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux seule ou en combinaison avec la PN. A long terme, quelque soit le type du traitement et la teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ utilisée, toutes les propriétés des deux sols argileux étudiés ont été améliorées de plus en plus. En revanche, pour des fortes teneurs en Na_2SO_4 , toutes les éprouvettes du sol rouge argileux stabilisé à la chaux ou avec la PN toute seule ont été entièrement altérées sauf celles qui ont été stabilisées avec leur combinaison. Cette altération est attribuée à la formation de l'ettringite minérale expansive qui a été observée dans les courbes diffractométriques issues des essais de la diffraction des rayons X (DRX). D'autre part, les images issues des essais de la microscopie électronique à balayage (MEB) ont montré la formation des composés cimentaires (C–S–H et C–A–H) responsables de l'augmentation des résistances mécaniques. Le succès ou l'échec d'un traitement dépend de plusieurs facteurs à savoir : le type et la teneur en additif utilisé, la composition minéralogique du sol traité, la période de cure et la teneur et le type des cations associés au sulfate utilisé.

Mots-clés: Sol argileux, Chaux, Pouzzolane naturelle, Sulfate, Stabilisation, Résistance, Plasticité.

ABSTRACT

An experimental investigation was conducted in laboratory in order to assess the effects produced by the presence of sodium and calcium sulphates ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Na_2SO_4) on Atterberg limits, unconfined compressive strength (UCS) and shear strength of two clayey soils stabilized with the addition of lime (L, 0–8%), natural pozzolana (NP, 0–20%) and their combination (L–NP). Shear and unconfined compression strength tests were carried out on soil samples after 7, 30, 60 and 120 days of curing period.

In the absence of sulphates, the obtained results showed that both clayey soils can be successfully stabilized with the addition of lime alone or in combination with NP. In fact, significant reductions in the plasticity index and substantial increases in UCS and shear strength values were recorded. However, the addition of NP alone to both clayey soils caused a marginal effect on all studied properties.

In the presence of sulphates, at early stage, for any content and any type of sulfate used, there are significant increases in UCS and shear strength values of both clayey soils stabilized with the addition of lime alone or in combination with NP. At later stage, for any type of treatment and for any content of $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, the values of all the properties of both clayey soils studied were improved more and more to compare with samples without $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. However, for high levels of Na_2SO_4 , all the red soil samples stabilized with lime or with NP alone were completely altered except those that have been stabilized with their combination. This alteration is attributed to the formation of ettringite which was observed in XRD diffractometric curves. Furthermore, SEM images showed the formation of cementitious compounds (C–S–H and C–H–A) responsible on the increase of mechanical strength values. The success or failure of treatment depends on several factors such as both the type and content of additive, mineralogical composition of stabilised soils, curing period and both the content and type of cation associated to the sulfate used.

Keywords: Clayey soil, Lime, Natural pozzolana, Sulphate, Stabilization, Strength, Plasticity.

Table des Matières

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

Introduction Générale

1 Cadre général de l'étude.....	2
2 Objectifs de recherche.....	6
3 Plan de travail.....	6

Chapitre 1

Techniques d'Amélioration des Sols Instables

1.1 Introduction.....	9
1.2 Les mauvais sols.....	9
1.2.1 Les argiles.....	9
1.2.1.1 Minéralogie des argiles.....	10
1.2.1.2 Structure moléculaire microscopique des argiles.....	11
1.2.1.3 Principales familles des minéraux argileux.....	12
1.2.2 Les limons.....	14
1.2.3 Les marnes.....	14
1.3 Techniques d'amélioration des sols.....	15
1.3.1 Amélioration par remplacement du sol.....	16

1.3.2 Méthodes mécaniques.....	17
1.3.2.1 Compactage de surface.....	17
1.3.2.2 Compactage dynamique.....	18
1.3.2.3 Vibrocompactage.....	19
1.3.2.4 Induction hydraulique.....	20
1.3.3 Méthodes hydrodynamiques.....	21
1.3.3.1 Préchargement ou Précompression.....	21
1.3.3.2 Accélération de la consolidation par les drains verticaux.....	22
1.3.4 Méthodes thermiques.....	23
1.3.5 Méthodes Chimiques.....	24
1.3.5.1 Utilisation de la chaux.....	25
1.3.5.2 Mécanisme de stabilisation à la chaux.....	26
1.3.5.3 Utilisation du ciment.....	27
1.3.6 Amélioration des sols par renforcement des terres.....	28
1.3.6.1 Terre renforcé.....	28
1.3.6.2 Technique de renforcement in situ.....	29
1.3.6.3 Matériaux synthétique.....	29
1.3.7 Amélioration des sols par inclusion.....	29
1.3.7.1 Colonnes à module contrôlé.....	29
1.3.7.2 Colonnes ballastées.....	30
1.3.7.3 Inclusion rigide.....	32
1.3.8 Amélioration des sols par injection.....	33
1.3.8.1 Injections classiques (Jet grouting).....	33
1.3.8.2 Injections de claquage (Injections de compensation).....	34
1.3.9 Méthodes hydrauliques.....	34
1.3.9.1 Technique de drainage.....	34
1.3.9.2 Le rabattement de la nappe par pompage.....	35
1.3.10 Autres techniques d'amélioration des sols.....	36
1.3.10.1 Electro-osmose.....	36
1.3.10.2 Electrochimie.....	36
1.4 Conclusions.....	36

Chapitre 2

Synthèse Bibliographique des Travaux Effectués sur L'Amélioration Chimique des Sols

2.1 Introduction.....	39
2.2 Effet des ajouts cimentaires sur la plasticité.....	39
2.2.1 Effet de la chaux.....	39
2.2.2 Effet du ciment.....	42
2.2.3 Effet des cendres volantes.....	43
2.2.4 Effet de la pouzzolane artificielle (Sarooj).....	44
2.2.5 Effet de la cendre de l'écorce de riz RHA.....	44
2.2.6 Effet de la combinaison chaux/ciment.....	45
2.2.7 Effet de la combinaison chaux/fumée de silice.....	45
2.2.8 Effet de la combinaison chaux/cendres volantes.....	45
2.2.9 Effet de la combinaison chaux/laitier.....	46
2.3 Effet des ajouts cimentaires sur les caractéristiques du compactage	47
2.3.1 Effet de la chaux.....	47
2.3.2 Effet du ciment.....	48
2.3.3 Effet des cendres volantes.....	49
2.3.4 Effet de la combinaison ciment/cendres volantes.....	50
2.3.5 Effet du de la combinaison ciment/phospho-gypse.....	50
2.3.6 Effet de la combinaison chaux/pouzzolane naturelle.....	50
2.3.7 Effet de la combinaison chaux/cendres volantes.....	51
2.4 Effet des ajouts cimentaires sur la résistance à la compression non confinée.....	51
2.4.1 Effet de la chaux.....	51
2.4.2 Effet du ciment.....	53
2.4.3 Effet des cendres volantes.....	55
2.4.4 Effet de la combinaison chaux/pouzzolane naturelle.....	56

2.4.5 Effet de la combinaison ciment/cendres volantes.....	57
2.4.6 Effet de la combinaison chaux/ciment et chaux/laitier.....	57
2.4.7 Effet de la combinaison chaux/cendres volantes.....	59
2.5 Effet des ajouts cimentaires sur la résistance au cisaillement.....	60
2.5.1 Effet de la chaux.....	60
2.5.2 Effet du ciment.....	62
2.5.3 Effet des cendres volantes.....	63
2.5.4 Effet de la combinaison chaux/cendres de calcaire.....	64
2.5.5 Effet de la combinaison chaux/cendres volantes.....	64
2.5.6 Effet de la combinaison chaux/cendres de vase calcinée.....	65
2.6 Effet des ajouts cimentaires sur la compressibilité.....	65
2.6.1 Effet de la chaux.....	65
2.6.2 Effet du ciment.....	67
2.6.3 Effet des cendres volantes.....	68
2.6.4 Effet du laitier de haut fourneau.....	68
2.6.5 Effet de la combinaison chaux/cendres volantes.....	69
2.7 Effet des ajouts cimentaires sur le gonflement.....	70
2.7.1 Effet de la chaux.....	70
2.7.2 Effet du ciment.....	72
2.7.3 Effet des cendres volantes.....	73
2.7.4 Effet de la combinaison ciment/laitier.....	74
2.7.5 Effet de la combinaison chaux/laitier.....	75
2.8 Conclusion.....	76

Chapitre 3

Etude Expérimentale

3.1 Introduction.....	78
3.2 Matériaux utilisés et préparation.....	78

3.2.1 Sols naturels.....	78
3.2.1.1 Lieu de prélèvement.....	78
3.2.1.2 Préparation.....	79
3.2.1.3 Identification et caractérisation.....	79
3.2.2 Pouzzolane naturelle.....	81
3.2.2.1 Lieu de prélèvement.....	81
3.2.2.2 Préparation.....	82
3.2.3 Chaux.....	82
3.2.4 Produits chimiques.....	83
3.3 Déroulement des essais.....	84
3.3.1 Combinaison des échantillons.....	84
3.3.2 Propriétés étudiées.....	86
3.3.2.1 Limites d'Atterberg.....	86
3.3.2.1.1 Limite de liquidité.....	87
3.3.2.1.2 Limite de plasticité.....	88
3.3.2.1.3 Indice de plasticité.....	88
3.3.2.2 Compactage.....	88
3.3.2.3 Résistance à la compression non confinée.....	89
3.3.2.3.1 Préparation des combinaisons et confections des éprouvettes.....	90
3.3.2.3.2 Ecrasement des éprouvettes.....	92
3.3.2.4 Résistance au cisaillement.....	92
3.3.2.4.1 Préparation des combinaisons et confections des éprouvettes.....	93
3.3.2.4.2 Cisaillement des éprouvettes.....	93
3.3.2.5 Essais sur la minéralogie (DRX) et la microstructure (MEB).....	94
3.3.2.5.1 Diffraction aux rayons X et de Microscopie électronique à balayage...	94
3.3.2.5.2 Préparation des échantillons et exécutions des essais.....	94
3.4 Conclusion.....	96

Chapitre 4

Effet des Sulfates sur les Limites d'Atterberg

4.1 Introduction.....	99
4.2 Limites d'Atterberg des sols traités sans sulfates.....	99
4.2.1 Effet de la chaux (L).....	99
4.2.1.1 Effet de la chaux sur la limite de liquidité.....	99
4.2.1.2 Effet de la chaux sur la limite de plasticité.....	100
4.2.1.3 Effet de la chaux sur l'indice de plasticité.....	101
4.2.2 Effet de la pouzzolane naturelle (PN).....	102
4.2.2.1 Effet de la PN sur la limite de liquidité.....	102
4.2.2.2 Effet de la PN sur la limite de plasticité.....	102
4.2.2.3 Effet de la PN sur l'indice de plasticité.....	103
4.2.3 Effet de la combinaison chaux-pouzzolane naturelle (L-PN).....	104
4.2.3.1 Effet combiné de L-PN sur la limite de liquidité.....	104
4.2.3.2 Effet combiné de L-PN sur la limite de plasticité.....	105
4.2.3.3 Effet combiné de L-PN sur l'indice de plasticité.....	106
4.3 Limites d'Atterberg des sols traités avec sulfates.....	107
4.3.1 Traitement à la chaux en présence du CaSO_4	107
4.3.1.1 Effet du CaSO_4 sur la limite de liquidité.....	107
4.3.1.2 Effet du CaSO_4 sur la limite de plasticité.....	109
4.3.1.3 Effet du CaSO_4 sur l'indice de plasticité.....	109
4.3.2 Traitement à la chaux en présence du Na_2SO_4	111
4.3.2.1 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de liquidité.....	111
4.3.2.2 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de plasticité.....	113
4.3.2.3 Effet du Na_2SO_4 sur l'indice de plasticité.....	113
4.3.3 Traitement à la PN en présence du CaSO_4	115
4.3.3.1 Effet du CaSO_4 sur la limite de liquidité.....	115
4.3.3.2 Effet du CaSO_4 sur la limite de plasticité.....	117

4.3.3.3 Effet du CaSO ₄ sur l'indice de plasticité.....	117
4.3.4 Traitement à la PN en présence du Na ₂ SO ₄	119
4.3.4.1 Effet du Na ₂ SO ₄ sur la limite de liquidité.....	119
4.3.4.2 Effet du Na ₂ SO ₄ sur la limite de plasticité.....	119
4.3.4.3 Effet du Na ₂ SO ₄ sur l'indice de plasticité.....	121
4.3.5 Traitement combiné de L-PN en présence du CaSO ₄	123
4.3.5.1 Effet du CaSO ₄ sur la limite de liquidité.....	123
4.3.5.2 Effet du CaSO ₄ sur la limite de plasticité.....	123
4.3.5.3 Effet du CaSO ₄ sur l'indice de plasticité.....	125
4.3.6 Traitement combiné de L-PN en présence du Na ₂ SO ₄	127
4.3.6.1 Effet du Na ₂ SO ₄ sur la limite de liquidité.....	127
4.3.6.2 Effet du Na ₂ SO ₄ sur la limite de plasticité.....	127
4.3.6.3 Effet du Na ₂ SO ₄ sur l'indice de plasticité.....	129
4.4 Conclusion.....	131

Chapitre 5

Effet des Sulfates sur la Résistance à la Compression non Confinée

5.1 Introduction.....	134
5.2 Résistance à la compression des sols traités sans sulfates.....	134
5.2.1 Effet de la chaux.....	134
5.2.2 Effet de la PN.....	138
5.2.3 Effet combiné de chaux-PN.....	140
5.3 Résistance à la compression des sols traités avec sulfates.....	142
5.3.1 Effet du CaSO ₄ sur la compression simple.....	142
5.3.1.1 Cas du traitement à la chaux.....	143
5.3.1.2 Cas du traitement avec la PN.....	145
5.3.1.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN.....	148
5.3.2 Effet du Na ₂ SO ₄ sur la compression simple.....	150
5.3.2.1 Cas du traitement à la chaux.....	150

5.3.2.2 Cas du traitement avec la PN.....	152
5.3.2.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN.....	155
5.4 Mécanismes de stabilisation et d'altération de la résistance.....	157
5.4.1 Mécanisme de stabilisation du mélange Sol-Chaux-PN.....	157
5.4.2 Mécanisme d'altération de la résistance du mélange Sol-Chaux-PN-Na ₂ SO ₄ ...	158
5.5 Conclusion.....	160

Chapitre 6

Effet des Sulfates sur la Résistance au Cisaillement Direct

6.1 Introduction.....	163
6.2 Résistance au cisaillement des sols traités sans sulfates.....	163
6.2.1 Effet des additifs sur la résistance au cisaillement.....	163
6.2.1.1 Effet de la chaux.....	163
6.2.1.2 Effet de la PN.....	164
6.2.1.3 Effet combiné de la chaux-PN.....	165
6.2.2 Effet des additifs sur la cohésion.....	165
6.2.2.1 Effet de la chaux.....	166
6.2.2.2 Effet de la PN.....	166
6.2.2.3 Effet combiné de la chaux-PN.....	167
6.2.3 Effet des additifs sur l'angle de frottement interne.....	167
6.2.3.1 Effet de la chaux.....	167
6.2.3.2 Effet de la PN.....	167
6.2.3.3 Effet combiné de la chaux-PN.....	168
6.3 Résistance au cisaillement des sols traités avec sulfates.....	168
6.3.1 Effet du CaSO ₄ sur la résistance au cisaillement.....	168
6.3.1.1 Cas du traitement à la chaux.....	169
6.3.1.2 Cas du traitement avec la PN.....	169

6.3.1.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN.....	173
6.3.2 Effet du Na ₂ SO ₄ sur la résistance au cisaillement.....	173
6.3.2.1 Cas du traitement à la chaux.....	173
6.3.2.2 Cas du traitement avec la PN.....	174
6.3.2.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN.....	178
6.3.3 Effet du CaSO ₄ sur la cohésion.....	178
6.3.3.1 Cas du traitement à la chaux.....	178
6.3.3.2 Cas du traitement avec la PN.....	178
6.3.3.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN.....	179
6.3.4 Effet du Na ₂ SO ₄ sur la cohésion.....	180
6.3.4.1 Cas du traitement à la chaux.....	180
6.3.4.2 Cas du traitement avec la PN.....	181
6.3.4.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN.....	182
6.3.5 Effet du CaSO ₄ sur l'angle de frottement interne.....	182
6.3.5.1 Cas du traitement à la chaux.....	183
6.3.5.2 Cas du traitement avec la PN.....	184
6.3.5.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN.....	184
6.3.6 Effet du Na ₂ SO ₄ sur l'angle de frottement interne.....	184
6.3.6.1 Cas du traitement à la chaux.....	185
6.3.6.2 Cas du traitement avec la PN.....	186
6.3.6.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN.....	186
6.4 Conclusion.....	186

Conclusions Générales, Recommandations et Perspectives

1 Conclusions générales.....	190
2 Recommandations.....	193
3 Perspectives.....	194
Références Bibliographiques.....	196

Liste des figures

Fig. 1.1 — Structure du tétraèdre, (a): Tétraèdre de silice (Grim, 1959), (b): vue isométrique d'un feuillet de silice en tétraèdre (Grim, 1959), (c): schéma du feuillet de silice (Lambe, 1953).....	11
Fig. 1.2 — Structure de l'octaèdre, (a): octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (Grim, 1959), (b): vue isométrique d'un feuillet en octaèdre (Grim, 1959), (c): schéma du feuillet en octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (Lambe, 1953).....	12
Fig. 1.3 — (a): Schéma de la structure de la kaolinite (Lambe, 1953), (b): vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite (Grim, 1959).....	13
Fig. 1.4 — (a): Schéma de la structure de la montmorillonite (Lambe, 1953), (b): vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite (Grim, 1959).....	13
Fig. 1.5 — (a): Schéma de la structure de l'illite (Lambe, 1953), (b): vue isométrique de la structure atomique de l'illite (Grim, 1959).....	14
Fig. 1.6 — Stabilisation par compactage de surface (Cas d'une digue de barrage en terre de Kef-Eddir construit à Tipaza, Algérie).....	17
Fig. 1.7 — Densification d'un terrain par compactage dynamique (cas réel de l'aéroport de Nice 1978, France).....	19
Fig. 1.8 — Densification par vibrocompactage (Cas d'un sable lâche ayant 5m d'épaisseur d'un hall industriel construit en Belgique) (De Cock and Bottiau, 2004)....	20
Fig. 1.9 — Amélioration d'un terrain par induction hydraulique (Substitution du sol par du gravier dans un chantier à Saint Martin d'Hères en 2006, France).....	21
Fig. 1.10 — Amélioration d'un sol mou par la technique de préchargement (Varghese, 2005).....	22
Fig. 1.11 — Amélioration des mous par la technique de l'Accélération de la consolidation par les drains verticaux, (a): drains de sable verticaux, (b): drains verticaux préfabriqués (Das, 1983).....	22
Fig. 1.12 — Stabilisation provisoire des parois d'un fond par la technique de congélation.....	24
Fig. 1.13 — Action de la chaux à court terme (modification par floculation), (Cabane, 2004).....	26
Fig. 1.14 — Effet de la chaux sur le pH d'une argile (bentonite très plastique riche en kaolinite et en montmorillonite), (Al-Mukhtar et al., 2010).....	27
Fig. 1.15 — Technique de renforcement in situ par tirants d'ancrage.....	29
Fig. 1.16 — Principe de renforcement des sols par colonnes ballastées.....	31

Fig. 1.17 — Principe de renforcement des sols compressibles par inclusion rigide.....	32
Fig. 1.18 — Principe de réalisation d'une colonne de jet grouting.....	33
Fig. 1.19 — Technique de drainage par un drain filtre.....	35
Fig. 1.20 — Principe de la technique électro-osmose.....	36
Fig. 1.21 — Principe de la technique électrochimie.....	37
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).....	41
Fig. 2.2 — Effet du ciment sur les limites d'Atterberg d'un sol peu plastique, (Asgari et al., 2009).....	43
Fig. 2.3 — Effet des cendres volantes sur l'indice de plasticité d'un sol moyennement plastique, (Parsons and Kneebone, 2005).....	43
Fig. 2.4 — Effet de l'utilisation de la cendre de l'écorce de riz (RHA) comme additif sur les limites d'Atterberg de trois types de sols, (Basha et al., 2002).....	44
Fig. 2.5 — Effet de différentes teneurs du sulfate de sodium sur l'indice de plasticité d'un sol argileux fin traité à 5% de chaux seule et en combinaison avec 6% de laitier, (Celik and Nalbantoglu, 2013).....	46
Fig. 2.6 — Effet des sulfates monovalents et divalents sur les paramètres de compactage d'une kaolinite traité à 6% de chaux, (a): la densité sèche maximale, (b): la teneur en eau optimale, (Kinuthia et al., 1999).....	48
Fig. 2.7 — Variation des caractéristiques de compactages en fonction de la teneur du ciment additionnée, (a): densité sèche maximale, (b): teneur en eau optimale, (Okagbue and Ocholor, 2007).....	48
Fig. 2.8 — Variation des caractéristiques de compactage d'une argile traitée avec différents pourcentages de cendres volantes et de GGBS, (McCarthy et al., 2012).....	49
Fig. 2.9 — Effet apporté par l'utilisation de gypse comme additif sur la résistance la compression non confinée d'un sol peu plastique traité à la chaux, (Aldaood et al., 2014a).....	53
Fig. 2.10 — 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).....	54
Fig. 2.11 — 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).....	55

Fig. 2.12 — 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).....	55
Fig. 2.13 — 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).....	56
Fig. 2.14 — Effet de la combinaison chaux-pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression simple, (a): sol argileux gris et (b): sols argileux rouge, (Harichane et al., 2011a).....	56
Fig. 2.15 — Effet de différentes combinaisons des ajouts minéraux sur la résistance à la compression simple d'un sol, (Kolias et al., 2005).....	57
Fig. 2.16 — Effet de différentes combinaisons des ajouts minéraux sur la résistance à la compression simple d'un sol, (Fontaine, 1984).....	58
Fig. 2.17 — Effet du sulfate et du type du liant sur la résistance à la compression simple d'un sol limoneux traité par combinaison chaux-ciment, (Le Borgne, 2010).....	58
Fig. 2.18 — 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).....	62
Fig. 2.19 — 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).....	63
Fig. 2.20 — Effet des cendres de calcaire sur les paramètres de cisaillement, (Okagbue and Yakubu, 2000).....	64
Fig. 2.21 — Effet de la combinaison de chaux-cendres de vase calcinée sur la résistance au cisaillement d'un sol, (Lin et al., 2007).....	65
Fig. 2.22 — Effet de différentes teneur en chaux sur l'indice de compression et la pression de préconsolidation d'un sol argileux peu plastique, (Ouhadi et al., 2014)....	66
Fig. 2.23 — Effet du sulfate de calcium et du chlorure de calcium sur les paramètres de compressibilité d'une argile marine traitée à la chaux, (a): indice de compression, (b): pression de préconsolidation, (Rajasekaran and Narasimha Rao, 2002).....	66
Fig. 2.24 — Effet de différentes teneurs en ciment (CEM II) sur l'indice de compression et la pression de préconsolidation d'un sol argileux peu plastique, (Ouhadi et al., 2014).....	67
Fig. 2.25 — Effet de différentes teneurs en cendres volantes sur la compressibilité d'une kaolinite, (Knapik et al., 2014).....	68
Fig. 2.26 — Effet de différents pourcentages du laitier sur la compressibilité d'une argile peu plastique après 28 jours de cure, (Indraratna, 1996).....	69

Fig. 2.27 — Effet de la combinaison de la chaux et des cendres volantes sur la compressibilité d'une kaolinite, (Knapik et al., 2014).....	69
Fig. 2.28 — (a): Effet du sulfate de sodium sur le gonflement d'un sol argileux très plastique traité à 5% de chaux, (b): formation d'ettringite dans l'éprouvette de sol stabilisée à la chaux en présence de 10000 ppm de sulfate de sodium, (Celik and Nalbantoglu, 2013).....	71
Fig. 2.29 — Effet de différents dosages en ciment sur le potentiel de gonflement de quatre sols argileux très plastiques contenant différentes teneurs en sulfate soluble après 90 jours de cure, (Puppala et al., 2004).....	73
Fig. 2.30 — Gonflement des échantillons traités avec 3% de chaux (1 jour de cure) et différents pourcentages de FA (fine) et de CA (grossière) pour 3 jours de cure, suivis de 7 jours d'immersion dans l'eau à 40°C (argiles testées: Weald (W), Gault (G), Kimmeridge (K), Lias (L) et Oxford (O)), (McCarthy et al., 2012).....	74
Fig. 2.31 — Effet de la combinaison du laitier-ciment portland sur le gonflement d'un sol argileux pour deux périodes de cure, (a): 7 jours, (b): 28 jours, (Cokca et al., 2010).....	74
Fig. 2.32 — Effet du gypse sur le gonflement linéaire d'une kaolinite traitée par la substitution progressive de la chaux par le laitier (GGBS), (Wild et al., 1998).....	75
Fig. 3.1 — Prélèvement du sol argileux gris (SG) à partir d'un projet de remblai (Haouche El-Ghaba).....	78
Fig. 3.2 — Prélèvement du sol argileux rouge (SR) à partir d'un projet d'autoroute Est-Ouest (Harchoun, Algérie).....	79
Fig. 3.3 — Moyens utilisés pour la préparation des sols, (a): concasseur, (b): broyeur.....	79
Fig. 3.4 — 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.....	80
Fig. 3.5 — Les diagrammes diffractométriques présentant la composition minéralogique des sols étudiés, (a): sol argileux rouge, (b): sol argileux gris.....	81
Fig. 3.6 — Le gisement volcanique de Bou-Hamidi (Béni-Saf, Algérie).....	81
Fig. 3.7 — Préparation de la pouzzolane naturelle pour l'essai micro-Deval, (a): fragments de pouzzolane naturelle, (b): pouzzolane naturelle concassée, (c): passage de la pouzzolane naturelle à l'étuve à 50°C pendant 24h.....	82

Fig. 3.8 — Broyage de la pouzzolane naturelle au micro-Deval jusqu'à une finesse de 420 m ² /kg, (a): introduction de 1.5kg de PN concassée avec 3 boules et 1.5kg de billes dans chaque cylindre, (b): l'emplacement des cylindres et lançage de l'essai pendant 18h, (c): la PN après broyage.....	82
Fig. 3.9 — Préparation de la chaux, (a): emballage utilisé pour la chaux vive de Saida, (b): tamisage au tamis 0.4mm, (c): pesage de la chaux et conservation dans des sacs hermétiques.....	83
Fig. 3.10 — Les sulfates utilisés dans l'étude expérimentale, (a): sulfate de sodium anhydre(Na ₂ SO ₄), (b): sulfate de calcium hydraté (CaSO ₄ .2H ₂ O).....	84
Fig. 3.11 — Différentes étapes de la préparation des échantillons, (a): malaxage et homogénéisation à sec après pesage, (b): conservation dans des sacs hermétique, (c): stockage dans un endroit sec.....	85
Fig. 3.12 — Préparation de la pâte du sol avec de l'eau distillée en présence ou en absence du sulfate pendant 1, 15 et 30 jours, (a): sol argileux rouge, (b): sol argileux gris.....	86
Fig. 3.13 — 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 13 mm, (c): prélèvement d'échantillon et dessiccation à l'étuve.....	87
Fig. 3.14 — Détermination de la limite de plasticité, (a): formation d'une boulette de pâte et la rouler à la main pour former un rouleau, (b): amincissement du rouleau jusqu'à ce qu'il se fissure à 3 mm de diamètre et prélèvement d'échantillon, (c): dessiccation à l'étuve à 105°C pendant 24h.....	88
Fig. 3.15 — Préparation des combinaisons pour la confection et le compactage, (a): humidification, (b): malaxage, (c): conservation pendant une heure.....	90
Fig. 3.16 — Confection des éprouvettes, (a): Presse statique manuelle destinée à la confection des éprouvettes, (b): moule cylindrique formé en deux parties symétriques.....	91
Fig. 3.17 — Confection des éprouvettes par compactage statique, (a): compactage, (b): démoulage, (c): éprouvette compactée et conservée dans un sachet en plastique.....	91
Fig. 3.18 — Procédure d'écrasement, (a): éprouvette à écraser, (b): installation de l'éprouvette dans la cellule, (c): installation de la cellule dans la presse statique, (d): éprouvette après écrasement.....	92
Fig. 3.19 — Préparation des éprouvettes par compactage statique, (a): humidification, (b): confection, (c): démoulage, (d): préservation des éprouvettes dans des sacs hermétique.....	93

Fig. 3.20 — Procédure de cisaillement, (a): éprouvettes à cisailier, (b): installation de l'éprouvette dans la boîte de Casagrande, (c): installation de la boîte de Casagrande dans l'appareil de cisaillement, (d): éprouvette après cisaillement.....	94
Fig. 3.21 — Analyse minéralogie par diffraction des rayons X, (DRX), (a): diffractomètre de type Philips PW3020, (b): éprouvette du sol rouge (ex: P20L8N4 après 60 jours de cure) avant et après écrasement, (c): récupération des petits fragments après écrasement, (d): séchage pendant 24 heures à 40°C, (e): broyeur, (f): tamiseuse, (g): poudre fine de l'échantillon P20L8N4, (h):conservation hors humidité.....	95
Fig. 3.22 — (a): Microscopie électronique à balayage (MEB) de type FEI XL30 ESEM, (b): échantillons des deux sols à analyser.....	96
Fig. 4.1 — Effet de différents pourcentages de chaux sur les limites d'Atterberg des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): sol gris, (b): sol rouge.....	100
Fig. 4.2 — Effet de différents pourcentages de pouzzolane naturelle sur les limites d'Atterberg des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): sol gris, (b): sol rouge.....	103
Fig. 4.3 — Effet de différents pourcentages chaux-pouzzolane naturelle sur les limites d'Atterberg des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): sol gris, (b): sol rouge.....	105
Fig. 4.4 — Effet de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé à la chaux pour différentes périodes de cure.....	108
Fig. 4.5 — Effet de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé à la chaux pour différentes périodes de cure.....	110
Fig. 4.6 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé à la chaux pour différentes périodes de cure.....	112
Fig. 4.7 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé à la chaux pour différentes périodes de cure.....	114
Fig. 4.8 — Effet de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé par l'utilisation de la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.....	116
Fig. 4.9 — Effet de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé par l'utilisation de la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.....	118

Fig. 4.10 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé par l'utilisation de la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.....	120
Fig. 4.11 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé par l'utilisation de la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.....	122
Fig. 4.12 — Effet de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé par l'utilisation la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.....	124
Fig. 4.13 — Effet de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé par l'utilisation la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.....	126
Fig. 4.14 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé par l'utilisation la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.....	128
Fig. 4.15 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé par l'utilisation la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.....	130
Fig. 5.1 — Effet de différents pourcentages de chaux sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): SG, (b): SR.....	135
Fig. 5.2 — Courbes diffractométriques issus de diffraction par des rayons X (DRX) montrant les changements dans la minéralogie du SG stabilisé avec 8%L, 20%PN et 20%PN+8%L en présence ou non de 4% du Na_2SO_4 et du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ après 60 jours de cure.....	136
Fig. 5.3 — 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_2SO_4 et du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ après 60 jours de cure.....	137
Fig. 5.4 — Images de MEB montrent les changements dans la macrostructure des deux sols argileux non traités et traités avec 8% de chaux en absence des sulfates après 60 jours de cure, (a): SG, (b): SR, (c): SG traité avec 8%L, (d): SR traité avec 8%L.....	138
Fig. 5.5 — Effet de différents pourcentages de pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): SG, (b): SR.....	139

Fig. 5.6 — Images de MEB montrent les changements dans la macrostructure des deux sols argileux traités avec 20% de pouzzolane naturelle en absence des sulfates après 60 jours de cure, (a): SG, (b): SR.....	140
Fig. 5.7 — Effet de différents pourcentages de chaux-pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression non confinée des deux sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure.....	140
Fig. 5.8 — Images de MEB montrent les changements dans la macrostructure des deux sols argileux traités avec la combinaison de 20%PN+8%L en absence des sulfates après 60 jours de cure, (a): SG, (b): SR.....	142
Fig. 5.9 — Images de MEB montrent les changements dans la macrostructure des deux sols argileux perturbé seulement avec 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ après 60 jours de cure, (a): SG, (b): SR.....	143
Fig. 5.10 — Effet de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés à la chaux pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.....	144
Fig. 5.11 — Effet de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés avec la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.....	146
Fig. 5.12 — Images de MEB montrent les changements dans la macrostructure des deux sols argileux traités avec l'addition de 20% de pouzzolane naturelle en présence de 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ après 60 jours de cure, (a): SG, (b): SR.....	147
Fig. 5.13 — Effet de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur la résistance à la compression non confinée des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.....	149
Fig. 5.14 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés à la chaux pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.....	151
Fig. 5.15 — Eprouvettes du SR altérées après traitement avec l'addition de la chaux en présence de 6% du Na_2SO_4 pendant 120 jours de cure, (a): POL4N6, (b): POL8N6....	152
Fig. 5.16 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés avec la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.....	153
Fig. 5.17 — Eprouvettes du SR complètement altérées après traitement avec l'addition de la pouzzolane naturelle en présence de 4 et 6% du Na_2SO_4 pendant 30, 60 et 120 jours de cure.....	154
Fig. 5.18 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur la résistance à la compression non confinée des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.....	156

Fig. 6.1 — Effet de différents pourcentages de chaux, de PN et de L-PN sur la résistance au cisaillement du SG stabilisé en absence des sulfates pour différentes périodes de cure.....	164
Fig. 6.2 — Effet de différents pourcentages de chaux, de PN et de L-PN sur la résistance au cisaillement du SR stabilisé en absence des sulfates pour différentes périodes de cure.....	165
Fig. 6.3 — Effet de différents pourcentages de chaux, de PN et de L-PN sur la cohésion des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): SG, (b): SR.....	166
Fig. 6.4 — Effet de différents pourcentages de chaux, de PN et de L-PN sur l'angle de frottement interne des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): SG, (b): SR.....	168
Fig. 6.5 — Effet de 2% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.....	170
Fig. 6.6 — Effet de 4% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.....	171
Fig. 6.7 — Effet de 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.....	172
Fig. 6.8 — Effet de 4% du Na_2SO_4 sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.....	175
Fig. 6.9 — Effet de 4% du Na_2SO_4 sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.....	176
Fig. 6.10 — Effet de 6% du Na_2SO_4 sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.....	177
Fig. 6.11 — Effet de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur la cohésion des sols argileux stabilisé par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.....	179
Fig. 6.12 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur la cohésion des sols argileux stabilisé par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.....	181

Fig. 6.13 — Effet de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur l'angle de frottement interne des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR..... 183

Fig. 6.14 — Effet de différentes teneurs en N_2aSO_4 sur l'angle de frottement interne des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR..... 185

Liste des tableaux

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).....	40
Tableau 2.2 — Effet de la pouzzolane artificielle sur les limites d'Atterberg, (Al-Rawas et al., 2005).....	42
Tableau 2.3 — Effet de la combinaison chaux/cendres volantes sur la plasticité de deux sols (A et B) de plasticité faible à moyenne, (Ansary et al., 2006).....	43
Tableau 2.4 — Effet de la combinaison de la chaux et de cendres volantes sur les limites d'Atterberg d'une argile gonflante en présence de 1% de gypse, (Sivapullaiah and Jha, 2014).....	44
Tableau 2.5 — Effet de la combinaison de la chaux et de cendres volantes sur les caractéristiques de compactages d'une argile gonflante en présence de 1% de gypse, (Sivapullaiah and Jha, 2014).....	49
Tableau 2.6 — 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).....	50
Tableau 2.7 — Effet de la combinaison de la chaux et de cendres volantes sur la résistance à la compression d'une argile gonflante en présence de 1% de gypse, (Sivapullaiah and Jha, 2014).....	57
Tableau 2.8 — Variation des paramètres de cisaillement effectifs (C' et ϕ') de deux sols argileux (montmorillonite et kaolinite) stabilisés avec 6% de chaux à différentes période de cure.	58
Tableau 2.9 — 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).....	59
Tableau 2.10 — Effet de 2% de CaSO_4 sur les paramètres de cisaillement d'un sol limoneux traité avec 12% de ciment portland, (Laguros, 1962).....	61
Tableau 2.11 — Effet des cendres volantes sur les caractéristiques de cisaillement, (Senol et al., 2006).....	62
Tableau 2.12: Effet du dosage en chaux et de la période de cure sur la pression de gonflement d'une argile de la famille des smectites, (Al-Mukhtar et al., 2012).....	68
Tableau 3.1 — Caractéristiques physico-mécaniques des sols.....	77
Tableau 3.2 — Propriétés chimiques des sols étudiés.....	77

Tableau 3.3 — Propriétés minéralogiques des sols étudiés.....	77
Tableau 3.4 — Propriétés physico-chimiques des ajouts utilisés.....	80
Tableau 3.5 — Caractéristiques physico-chimiques des sulfates utilisés.....	81
Tableau 3.6 — Combinaisons des échantillons des sols stabilisés avec ou sans présence des sulfates.....	82
Tableau 3.7 — Références de compactage des sols étudiés.....	86

Liste des Notations

W	(%)	Teneur en eau
γ_d	(KN/m ³)	Poids volumique sec
OMC, (W_{OPN})	(%)	Optimum Moisture Content (teneur en eau optimale)
OPN	-	Optimum de Proctor Normal
MDD, ($\gamma_{d_{max}}$)	(KN/m ³)	Maximum dry density (Densité sèche maximale)
LL, (W_L)	(%)	Liquid Limit (Limite de liquidité)
PL, (W_P)	(%)	Plastic Limit (Limite de plasticité)
PI, (I_P)	(%)	Plasticity Index (Indice de plasticité)
UCS, (RCS)	(MPa)	Unconfined Compressive Strength (Résistance à la compression non confinée)
C	(KN/m ²)	Cohesion (Cohésion)
ϕ	(°)	Internal Friction Angle (Angle de frottement interne)
CEC	meq/100g	Capacité d'échange Cationique
USCS	-	Unified Soil Classification System (System de Classification Unifiée des Sols)
CL	-	Clay with Low plasticity
CH	-	Clay with High plasticity
ASTM	-	American Society for Testing and Materials
C-A-H	-	Calcium Aluminates Hydrates (Aluminates de Calcium Hydratés)
C-S-H	-	Calcium Silicates Hydrates (Silicates de Calcium Hydratés)
C-A-S-H	-	calcium aluminates silicates hydrates (Alumino-silicates de Calcium Hydratés)
CKD	-	Cement Kiln Dust (Poussière du four de fabrication du ciment)
RHA	-	Rice Husk Ash (Cendres de l'écorce de riz)
FA, (CV)	-	Fly Ash (Cendres volantes)
VA, (CV)	-	Volcanic Ash (Cendres Volcaniques)
NP, (PN)	-	Pozzolana, Natural Pozzolana (Pouzzolane naturelle)
L	-	Lime (Chaux)
L-PN	-	Combinaison de Chaux-Pouzzolane Naturelle

CaSO₄·2H₂O	-	Calcium Sulphate Dihydrate (Sulfate de calcium dihydrate)
Na₂SO₄	-	Sodium Sulphate Anhydrate (Sulfate de sodium anhydre)
GS, (SG)	-	Grey clayey Soil (Sol argileux gris)
RS, (SR)	-	Red clayey Soil (Sol argileux rouge)
XRD, (DRX)	-	X-Ray Diffraction (Diffraction par des rayons X)
SEM, (MEB)	-	Scanning Electronic Microscope (Microscopie électronique à balayage)
LHCC	-	Laboratoire de l'Habitat et de la Construction Centre

Introduction Générale

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

1. Cadre général de l'étude

En Algérie, la construction sur des terrains présentant des caractéristiques insuffisantes, ou voire médiocres, constituent un problème major pour les ingénieurs sur chantier et les géotechniciens chercheurs autre que le manque des matériaux de bonne qualité, qui doit répondre aussi bien à une exigence économique acceptable. A travers la géologie des terrains de notre pays, des sols peu convenables présentant une plasticité élevée et une faible capacité de portance sont fréquemment rencontrés. Il a été donc très nécessaire d'améliorer ces sols pour les rendre acceptables pour la construction. Plusieurs techniques d'amélioration des sols ont été mises en place pour résoudre les phénomènes d'instabilités observés sur site ou rencontrés sur chantiers. Ces techniques d'amélioration peuvent être mécaniques, hydrauliques, physiques ou chimiques.

La stabilisation chimique des sols argileux par l'usage des ajouts minéraux est potentiellement promoteur. Ces ajouts combinés avec le ciment et/ou la chaux ont été longtemps employés comme stabilisants. 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. Par ailleurs, la méthode d'amélioration chimique des sols avec l'addition de la chaux, du ciment ou d'autres ajouts cimentaires seuls ou combinés entre eux a été pratiquée par plusieurs chercheurs (Townsend and Kylm., 1966; Ola, 1977; Broms and Boman., 1979; Terashi et al., 1980; El-Rawi and Awad., 1981; Rahman, 1986; Kennedy et al., 1987; Bell, 1988; Locat et al., 1990; Basma and Tuncer., 1991; George et al., 1992; Bell, 1996; Mathew and Narasimha., 1997; Kinuthia et al., 1999; Afes and Didier., 2000; Ji-ru and Xing., 2002; Tono et al., 2004; Stavridakis, 2005; Al-Rawas et Goosen., 2006; Hossain et al., 2006, 2007; Manasseh and Olufemi, 2008; Harichane et al., 2012; Asgari et al., 2015; Yi et al., 2015). Cette technique n'est pas nouvelle et elle reste jusqu'à présent la plus utilisée et la moins onéreuse. Cette technique de traitement a été utilisée pour minimiser, ou voire éliminer, surtout les gonflements des sols qui sont très souvent la cause des dommages de structures implantées (Eades et Grim, 1960; Eades et al., 1962; Thompson, 1966; Broms et Boman, 1975; Okumura et Terashi, 1975; Al-Rawas, 1999). La stabilisation chimique des sols à l'aide des ajouts minéraux a donc trouvé une meilleure place dans le domaine de la géotechnique appliquée à travers la valorisation des sols jugés comme étant médiocres sans aller faire appel à des matériaux d'emprunt de bonne qualité. Ceci importe une réduction significative des frais des transports et également les délais de réalisation des projets.

La présence des sulfates dans les matériaux de stabilisation (sol, ajouts minéraux), dans l'eau utilisée dans le malaxage et/ou dans la nappe phréatique présente des effets complexes vis-à-vis des processus modifiés d'une part de l'échange cationique et d'autre part des réactions pouzzolaniques. Les changements varieront évidemment parmi d'autres facteurs avec la concentration des sulfates, le type des cations sulfates et également de la quantité disponible de l'alumine et de la calcite. Malgré ces avantages, le traitement chimique des sols pose, jusqu'à présent, un vrai problème concernant la durabilité des sols traités pour les projets réalisés. En effet, plusieurs chercheurs ont mis en évidence le grand risque qui peut se présenter lors ou après la stabilisation avec l'addition des ajouts minéraux en présence de certains composés chimiques qui sont potentiellement perturbateurs par exemple les sulfates (Mitchell, 1986; Sivapullaiah et al., 2000, 2006; Cuisinier et al., 2011). La présence de ces sulfates peut nuire, notamment à long terme, sur la durabilité des sols améliorés. Puisque dans la nature, les sulfates peuvent se présenter soit sous une forme d'ions solubles dans les eaux de la nappe phréatique et dans l'eau de gâchage (SO_4^{-2}) ou soit sous une forme solide dans des terrains sédimentaires (le gypse, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; l'epsomite, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; l'arcanite, K_2SO_4 ; la thénardite, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) (Grim, 1968; Wild et al., 1999). De plus, la pyrite (FeS_2), en présence de certaines conditions et après une série de réactions chimiques, peut donner naissance à un sulfate de calcium hydraté (Reid et al., 2001; Floyd et al., 2003).

Les différents effets apportés par les différents types de sulfates (sulfates présent dans le sol ou additionnés) sur les différentes propriétés géotechniques de différents types de sols améliorés par différents ajouts minéraux ont été l'objet d'étude de plusieurs chercheurs (Kujala et al., 1986; Hunter, 1988; Stipho, 1989; Raja, 1990; Mitchell et Dermatas, 1992; Rajasekaran, 1994; Sridhran et al., 1995; Wild et al., 1998; Kinuthia et al., 1999; Sivapullaiah et al., 2000; Puppala et al., 2004; Sivapullaiah et al., 2006; Yilmaz et al., 2009; Segui et al., 2011; Aubert et al., 2012; Celik and Nalbantoglu., 2013; Aldaood et al., 2014a, 2014b).

En outre, la compréhension de la cinétique de la stabilisation chimique des sols est indispensable pour pouvoir comprendre les mécanismes de la perturbation du processus de la stabilisation en présence des sulfates. En absence des sulfates, l'utilisation de la chaux toute seule ou combinée avec d'autres ajouts cimentaires fait apporter des effets bénéfiques aux sols traités. En effet, la capacité d'échange cationique (CEC) du sol est à l'origine de leurs particules présentant des surfaces chargées négativement (Grim, 1968). Cette charge négative donne naissance à des forces de répulsion entre les particules du sol. A court terme, si la chaux (CaO) est ajoutée au sol à traiter, en présence d'eau, elle s'hydrate en formant un hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2). L'ionisation de la chaux fait libérer des ions de calcium

(Ca²⁺) et d'hydroxyle (OH⁻) qui sont attirés à la surface des particules d'argiles en faisant réduire les forces de répulsion et en augmentant l'adhérence entre elles et par conséquent la formation des floccs, d'où on parle du phénomène de floculation qui peut se produire après quelques heures de l'addition de la chaux (Locat et al., 1990).

D'ailleurs, les changements causés par la chaux, à court terme, sont responsables de la réduction de la plasticité des sols traités qui se traduit par la diminution de la sensibilité à l'eau (Ola, 1977; Manasseh and Olufemi., 2008; Asgari et al., 2015), de la diminution de leur densité sèche maximale et de l'augmentation de leur teneur en eau optimale (Ola, 1977; Rahman, 1986; George et al., 1992; Kinuthia et al., 1999; Gay and Schad, 2000; Hossain et al., 2007; Manasseh and Olufemi, 2008; Harichane et al., 2012). Cependant, à long terme, l'augmentation de la concentration en ions de calcium et d'hydroxyle apportés par l'addition de la chaux fait augmenter de sa part le pH (l'électrolyte) du sol (George et al., 1992; Smith et al., 1994). En revanche, un pH fort fait provoquer la dissolution de l'alumine (Al₂O₃) et de la silice (SiO₂) des sols qui rentrent par la suite en réaction pouzzolanique avec la chaux additionnée tout en formant des nouveaux produits cimentaires. Il s'agit de la formation des silicates de calcium hydratés (C-S-H), des aluminates de calcium hydratés (C-A-H) et des alumino-silicates de calcium hydratés (C-A-S-H) (Glenn and Handy., 1963; Mitchell, 1986; Abdi et Wild, 1993; Narasimha Rao and Rajasekaran, 1996; Rajasekaran and Narasimha, 1997; Khattab, 2002; Al-Mukhtar et al., 2010; Asgari et al., 2015). Ces produits cimentaires importent des effets bénéfiques aux sols stabilisés en faisant augmenter la résistance en compression non confinée (Attoh Okine, 1995; Lin et al., 2007; Harichane et al., 2012) et la résistance au cisaillement (Gay and Schad, 2000; Sezer et al., 2006), mais en faisant diminuer le gonflement (Choquette et al., 1987; Narasimha Rao et Rajasekaran, 1996; Cuisinier et al., 2011; Al-Mukhtar et al., 2012) et la compressibilité (Bagherpour and Choobbasti, 2003; Nalbantoglu and Tuncer, 2001; Rekik and Boutouil, 2006).

La présence de certains types de sulfates lors ou après stabilisation fait perturber fortement le traitement en faisant modifier le processus de l'échange cationique et les réactions pouzzolaniques (Sherwood, 1962; Mitchell, 1986; Hunter, 1988; Kinuthia, 1997), ou voire exclure certains types de sols d'être traités (faire des essais d'aptitude d'un sol au traitement pour le classer comme: apte, douteux ou inapte au traitement) (Le Borgne, 2010). D'autre part, les sulfates font également favoriser la formation de nouvelles phases expansives (ettringite) responsables sur les dommages apportés aux ouvrages construits ainsi que les dégradations observées par exemple sur les plates formes routières (Mitchell, 1986; Hunter, 1988; Rajasekaran, 1994; Baryla et al., 2000; Le Borgne 2010). Ces dommages ne peuvent

avoir lieu qu'à partir d'un seuil de perturbation qui est lui-même dépend de la teneur en liant utilisé et des conditions d'essai (Cuisinier et al., 2011; Le Borgne 2010) et aussi bien de la nature minéralogique du sol stabilisé (Sivapullaiah et al., 2000, 2006). Bien que l'effet des sulfates dépend largement du type des cations associés aux ions sulfates (SO_4^{-2}). Par exemple, les sulfates divalents apportent des effets bénéfiques sur les limites d'Atterberg alors que les sulfates monovalents présentent des effets indésirables (Kinuthia et al., 1999). Des travaux de recherches antérieurs ont été effectués en vue d'étudier l'influence des sulfates monovalents et divalents sur les propriétés physico-mécaniques des sols mous stabilisés à la chaux seule ou combinée avec d'autres additifs (Kinuthia et al., 1999; Sivapullaiah et al., 2000; 2006; Celik and Nalbantoglu., 2013).

En Algérie, la plupart des usines de fabrication du ciment consomment beaucoup d'énergie tout en faisant produire une grande quantité de produits indésirables, qui affectent l'environnement. En terme du développement durable (zéro déchets), les fabricants du ciment utilisent des additions minérales en les mélangeant avec du clinker telles que le laitier, la pouzzolane naturelle ou d'autres ajouts minéraux afin de réduire à la fois la consommation d'énergie et les émissions de CO_2 à effet de serre et ainsi d'augmenter la production (Kenai et al., 2004).

D'ailleurs, l'utilisation des matériaux d'origine volcanique (possédant des quantités importantes de silice réactive) seuls ou combinés avec la chaux apporte des effets bénéfiques aux sols instables (Prabakar et al., 2004; Kumar et al., 2007; Hossain et al., 2007; Harichane et al., 2009, 2010, 2011a, 2011b, 2011c, 2012; McCarthy et al., 2012; Segui et al., 2013; al-Swaidani et al., 2016; Hu et al., 2016). Mais, il y a un manque d'investigation sur l'influence de la présence des sulfates sur le traitement des sols Algériens stabilisés à la chaux seule ou en combinaison avec la pouzzolane naturelle.

2. Objectifs de recherche

L'objectif principal de ce travail recherche est d'étudier l'influence et les changements apportés par les sulfates (sulfate de calcium hydraté: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et sulfate de sodium anhydre: Na_2SO_4) connus comme éléments perturbateurs sur les propriétés physico-mécaniques (plasticité, résistance, minéralogie et microstructure) des sols argileux locaux (les deux sol argileux gris (SG) et rouge (SR) utilisés dans cette étude sont de provenance de la région de Chlef) améliorés avec l'addition de différents ajouts minéraux à savoir la chaux (L), la pouzzolane naturelle (PN) et la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle (L-PN). Cette étude va nous permettre de :

- sélectionner les dosages optimaux pour lesquels la résistance mécanique des sols stabilisée est optimale ainsi que le dosage en sulfate à partir duquel le traitement ne sera plus utile à adopter ;
- décrire les mécanismes de stabilisation ;
- analyser les mécanismes de perturbations du processus de stabilisation ;
- comparer et étudier la différence entre les effets engendrés par les sulfates monovalents et les sulfates bivalents.

3. Plan de travail

Ce travail de recherche s'articule sur six chapitres à savoir :

Le premier chapitre : Il est consacré à la présentation de l'état des connaissances actuelles concernant les différentes méthodes d'amélioration et de renforcement des sols instables ou présentant des propriétés insuffisantes en vue de mieux comprendre les principes, les applications et les procédures de conception pour les différentes techniques d'amélioration.

Le deuxième chapitre : Il consiste à établir une synthèse bibliographique détaillée afin de se renseigner de l'état d'avancement des recherches dans le domaine de la stabilisation chimique des sols argileux par des liants hydrauliques et des matériaux pouzzolaniques (ciment, chaux, cendres volantes, laitier, fumé de silice, pouzzolane naturelle...etc.). L'analyse de l'effet de ces stabilisants sur le traitement des sols argileux avec ou sans présence des sulfates responsables de l'échec d'un traitement a été mis en évidence.

Le troisième chapitre : Il décrit les protocoles expérimentaux, les normes et les procédures suivies pour la préparation et la caractérisation des matériaux sélectionnés. Les propriétés physico-mécaniques, chimiques et minéralogiques des matériaux étudiés ont été déterminées à la base de l'expérience acquise dans les laboratoires des recherches autre que les normes.

Le quatrième chapitre : Il présente l'analyse de différents résultats expérimentaux des effets et des changements apportés par les sulfates sur les limites d'Atterberg (limite de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité) des sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison.

Le cinquième chapitre : Il est consacré pour l'analyse et la discussion de différents résultats expérimentaux des effets et des changements apportés par les sulfates sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison.

Le sixième chapitre : Il présente la discussion de différents résultats expérimentaux des effets et des changements apportés par les sulfates sur la résistance et les paramètres de cisaillement (cohésion et angle de frottement interne) des sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison.

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