الجـــــــــــــــــــمـهـوريـــــة الجـــــــــــــزائـريـة الديمـــــــقـراطيـة الـشـــــــــعبيـة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التـــــــــــــــــــــــــــــعـليـم العـــــــالي و البـــــــــــحث العـــــلـمـــي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جـــــــــــــــامعة 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	Examinateur
KHEMISSA Mohamed	Professeur	Université de M'Sila	Examinateur
ZITOUNI Zein El-Abidine	Maitre de Conférences (A)	Université de Blida	Examinateur
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**, Maitre 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**, Maitre 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. Said 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 ($CaSO_4{\cdot}2H_2O$) والصوديوم (Na_2SO_4) على حدود أتربارغ وكذا مقاومتي الضغط البسيط والقص لكل من التربتين الطينيتين اللتين تمت معالجتهما باستعمال الجير المعالج (L; 0—20%)، البوزولان الطبيعي (PN; 0—20%) أو بدمجهما معا (L—PN). كما أجري اختبار الضغط البسيط والقص على عينات التربتين بعد 7، 30، 60 و 120 يوما من العلاج.

ففي غياب الكبريتات أظهرت النتائج أنه يمكن معالجة كلتا التربتين 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 التربتين الطينيتين قد أظهر تأثير طفيف على كافة الخصائص التي شملتها هذه الدراسة.

أما في حالة وجود الكبريتات بنوعيها وبكميات مختلفة خلال فترات علاج قصيرة المدى، فقد لوحظت زيادات جد معتبرة في مقاومتي الضغط البسيط والقص لكلتا التربتين 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 $CaSO_4{\cdot}2H_2O$ المضافة لعينات التربتين الطينيتين، فإن قيم كافة الخصائص التي شملتها هذه الدراسة قد تحسنت شيئا فشيئا إذا ما قارناها بنفس العينات التي لا تحتوي على المركب الكيميائي $CaSO_4{\cdot}2H_2O$. 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 التربتين. وعلاوة على ذلك، أظهرت الصور (SEM) تشكل المركبات الاسمنتية (C—A—H و C—S—H) المسؤولة عن الزيادة في قيمة المقاومة الميكانيكية لكلتا التربتين الطينيتين. وبشكل عام فإنه من خلال النتائج المتحصل عليها على مستوى المخبر فإنه يظهر جليا أن نجاح التثبيت الكيميائي للأتربة 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 ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$, 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, quelques soit le type du traitement et la teneur en $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ utilisée, toutes les propriétés des deux sols argileux étudiés ont été améliorées de plus en plus. En revanche, pour des fortes teneures 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 ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$, 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 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, the values of all the properties of both clayey soils studied were improved more and more to compare with samples without $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. 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_2SO_4……... 119
4.3.4.1 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de liquidité…… 119
4.3.4.2 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de plasticité……... 119
4.3.4.3 Effet du Na_2SO_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_2SO_4……... 127
4.3.6.1 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de liquidité……..... 127
4.3.6.2 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de plasticité……..... 127
4.3.6.3 Effet du Na_2SO_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_2SO_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_2SO_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_2SO_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_2SO_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_2SO_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 Ochulor, 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 boulles 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_2SO_4), (b): sulfate de calcium hydraté ($CaSO_4.2H_2O$)…….. 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 cisailler, (b): installation de l'éprouvette dans la boite de Casagrande, (c): installation de la boite 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 $CaSO_4.2H_2O$ 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 $CaSO_4.2H_2O$ 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 $CaSO_4.2H_2O$ 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 $CaSO_4.2H_2O$ 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 $CaSO_4.2H_2O$ 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 $CaSO_4.2H_2O$ 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 $CaSO_4.2H_2O$ 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 $CaSO_4.2H_2O$ 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 $CaSO_4.2H_2O$ après 60 jours de cure, (a): SG, (b): SR…… 143

Fig. 5.10 — Effet de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ 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 $CaSO_4.2H_2O$ 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 $CaSO_4.2H_2O$ après 60 jours de cure, (a): SG, (b): SR…… 147

Fig. 5.13 — Effet de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ 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): P0L4N6, (b): P0L8N6…. 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 $CaSO_4.2H_2O$ 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 $CaSO_4.2H_2O$ 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 $CaSO_4.2H_2O$ 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 $CaSO_4.2H_2O$ 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 $CaSO_4.2H_2O$ 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 CaSO4 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
γd	(KN/m^3)	Poids volumique sec
OMC, (W_{OPN})	(%)	Optimum Moisture Content (teneur en eau optimale)
OPN	-	Optimum de Proctor Normal
MDD, (γd_{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

$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	-	Calcium Sulphate Dihydrate (Sulfate de calcium dihydrate)
Na_2SO_4	-	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; Tonoz 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, $CaSO_4.2H_2O$; l'epsomite, $MgSO_4.7H_2O$; l'arcanite, K_2SO_4; la thénardite, $Na_2SO_4.10H_2O$) (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

(Ca^{2+}) 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 flocs, 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 changement causés par la chaux, à court terme, sont responsable 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 (Al_2O_3) et de la silice (SiO_2) 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 dépond 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: $CaSO_4.2H_2O$ 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.

Chapitre 1

Techniques d'Amélioration des Sols Instables

1.1. Introduction
1.2. Les mauvais sols
1.3. Techniques d'amélioration des sols
1.4. Conclusions

1.1 Introduction

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

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

Dans ce chapitre et en premier lieu, une étude bibliographique sera développée sur les trois principales familles d'argiles. En deuxième lieu, les différentes techniques d'amélioration et de renforcement des sols instables seront aussi présentées.

1.2 Les mauvais sols

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

1.2.1 Les argiles

Les argiles sont des roches sédimentaires à grains fins, de taille inférieure à 5µm, composées pour une large part de minéraux spécifiques, silicates en général, d'aluminium plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée qui explique leur plasticité, ou bien une structure fibreuse qui explique leurs qualités d'absorption.

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

lorsqu'elles absorbent de l'eau et, au contraire, diminuer de volume sous l'effet de la sécheresse. Par ailleurs, sous l'effet d'une charge, par exemple celle d'une construction, une partie de l'eau absorbée contenue entre les grains d'argile est chassée, ce qui a pour conséquence de provoquer un tassement sensible du sol.

Les argiles constituent en général une assise acceptable lorsqu'elles sont recouvertes par d'autres couches de terrain. En revanche, elles sont dangereuses lorsqu'elles affleurent au niveau du sol, du fait de leur instabilité, se traduisant par des variations de volume et un fluage dans les terrains en pente.

1.2.1.1 Minéralogie des argiles

Les sols en général, sont constitués principalement des minéraux silicatés (le quartz, les argiles, les feldspaths, les micas), des carbonates, des oxydes et des hydroxydes métalliques. Ces minéraux se présentent généralement dans les sols sous forme de grains polygonaux plus ou moins réguliers dont la taille se situe entre quelques microns et quelques millimètres, de lamelles pour les argiles dont la plus grande dimension ne dépasse pas quelques microns et d'agrégats correspondant à des fragments de roches (Cabane, 2004).

Le quartz est une forme cristalline très commune de la silice (SiO_2). Sa dureté et sa très faible solubilité en font un élément résistant à l'altération, il est donc très présent dans les sols. On peut également retrouver dans les sols d'autres minéraux appartenant à la famille des silicates: feldspaths, silico-aluminates potassiques, sodiques, ou calciques de la famille des tectosilicates, ou micas, de la famille des phyllosilicates, minéraux plus sensibles à l'altération qui sont donc moins présents dans les sols (Le Borgne, 2010). D'après Le Pluart (2002), les phyllosilicates sont également appelés silicates lamellaires.

Il existe plusieurs définitions des argiles. Le terme « argile » n'aura pas le même sens en mécaniques des sols, mécanique des roches, ou en physique du sol; il désigne, selon les cas, un ensemble d'espèces minérales, une famille de roches, une catégorie de sols ou encore une classe granulométrique. Sous cette appellation générique se cache donc une grande variété de matériaux, dont le point commun est de posséder des minéraux argileux, qui sont de nature bien précise (à base de silicates) et dont la structure confère à ces matériaux comparativement à d'autres types de sols ou de roches des propriétés bien spécifiques quant à leur interaction avec l'eau (Kouloughli, 2007).

1.2.1.2 Structure moléculaire microscopique des argiles

Les argiles sont issues de la dégradation des minéraux suite à l'altération qui appartiennent à la famille des phyllosilicates. Ces minéraux argileux sont caractérisés par leur structure en

feuillets. Le réseau cristallographique des phyllosilicates est basé sur un assemblage de tétraèdres (SiO_2), chaque tétraèdre partageant trois sommets avec les tétraèdres voisins. L'ensemble des sommets partagés constitue un assemblage plan hexagonal. Le sommet du tétraèdre qui n'est pas dans le plan est partagé avec un octaèdre $Al(OH)_6$. C'est l'association de couches tétraédriques et de couches octaédriques qui constituent le motif (ou feuillet) du réseau cristallin de chaque argile (Le Borgne, 2010). Le feuillet en tétraèdre est une combinaison d'unités tétraédriques de silice composées de quatre atomes d'oxygène aux sommets entourant un atome unique de silicium. Le réseau est formé par l'arrangement hexagonal des tétraèdres (Fig. 1.1).

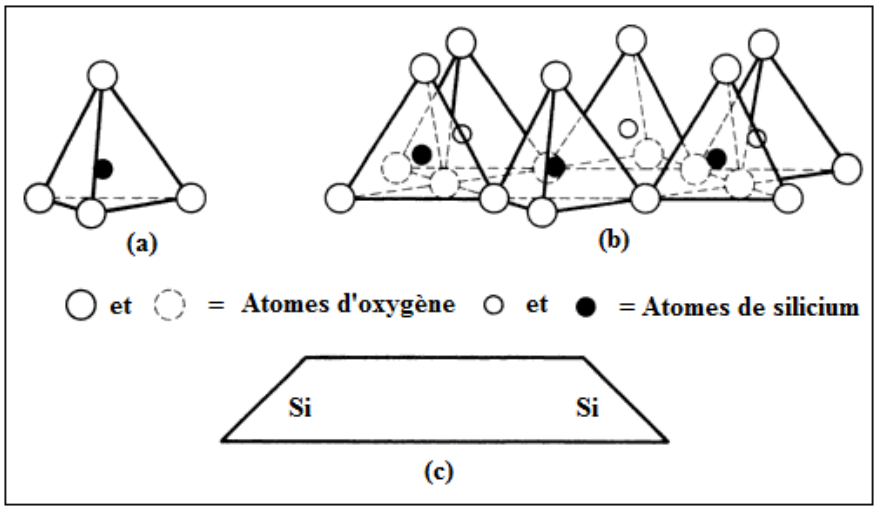


Fig. 1.1 — Structure du tétraèdre, (a): Tétraèdre de silice (Grim, 1959), (b): vue isométrique d'un feuillet de silice en tétraèdre (Grim, 1959), (c): schéma du feuillet de silice (Lambe, 1953).

Le feuillet en octaèdre est une combinaison d'unités octaédriques composées de six atomes d'oxygène ou d'hydroxyle entourant un atome d'aluminium, de magnésium, de fer ou d'un autre élément. Le réseau est formé par l'arrangement linéaire des octaèdres (Fig. 1.2).

La microstructure des phyllosilicates est basée sur les anions O^{-2} et OH^- qui occupent les sommets d'assemblages octaédriques (O^{-2} et OH^-) et tétraédriques O^{-2} (Caillère et al., 1982). Dans les cavités de ces unités structurales élémentaires viennent se loger des cations de tailles variables (Si^{4+}, Al^{3+}, Fe^{3+}, Fe^{2+}, Mg^{2+}) en position tétraédrique ou octaédrique. Ces éléments s'organisent suivant un plan pour constituer des couches octaédriques et tétraédriques dont le nombre détermine l'épaisseur du feuillet.

L'espace entre deux feuillets parallèles s'appelle espace interfoliaire. Lorsque deux cavités sur trois de la couche octaédrique sont occupées par Al^{3+} (ou un autre ion métallique trivalent), la structure est dénommée dioctaédrique. Quand la totalité des cavités octaédriques est occupée par des ions métalliques bivalents, la structure s'appelle trioctaédrique.

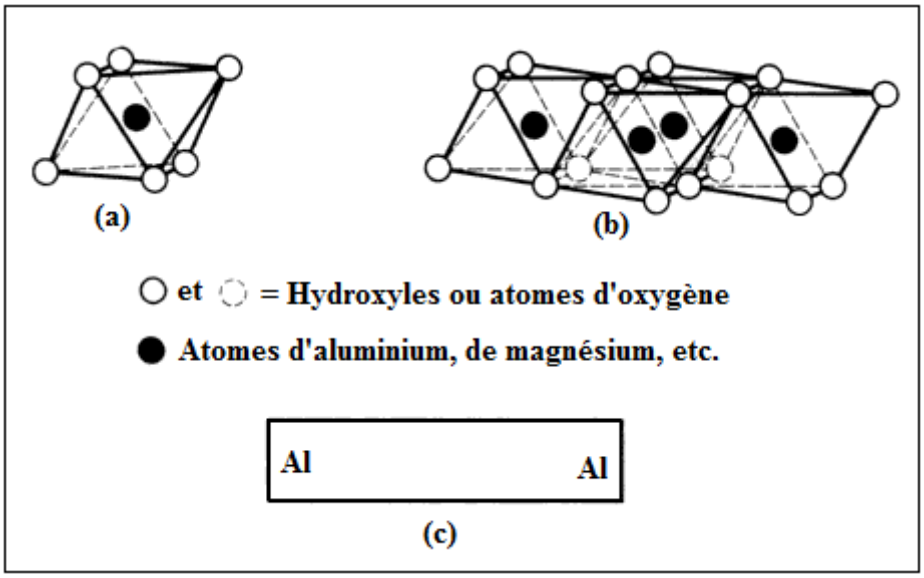


Fig. 1.2 — Structure de l'octaèdre, (a): octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (Grim, 1959), (b): vue isométrique d'un feuillet en octaèdre (Grim, 1959), (c): schéma du feuillet en octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (Lambe, 1953).

Par ailleurs, il peut exister des substitutions isomorphiques dans les couches tétraédriques (Si^{4+} -- Al^{3+}, Fe^{3+}) et /ou octaédrique (Al^{3+} -- Mg^{2+}, Fe^{2+}, ou Mg^{2+} -- Li^{+}). Ces substitutions entraînent un déficit de charge qui est compensé, à l'extérieur du feuillet, par des cations compensateurs (Kouloughli, 2007).

1.2.1.3 Principales familles des minéraux argileux

Tous les minéraux argileux sont constitués de deux feuillets de base qui sont empilés d'une façon caractéristique et qui comportent certains cations dans les feuillets en tétraèdre et en octaèdre. Dans le domaine de l'ingénierie, on ne relève toutefois que les minéraux argileux les plus courants contenus dans les sols dits argileux. Nous allons donc détailler beaucoup plus les trois familles des minéraux argileux les plus importantes et les plus dominantes.

- *Les kaolinites*

La kaolinite est constituée d'une succession de couches alternées de feuillets (silice) et de feuillets en octaèdre d'aluminium ou de gibbsite (Holtz and Kovacs., 1981) (Fig. 1.3). A cause de l'empilement d'une couche de chacun des deux feuillets de base, on considère la kaolinite comme un minéral argileux 1:1 sachant que son épaisseur est de 7 Å. Chaque feuillet est relié à l'autre par l'intermédiaire des liaisons labiles de type hydrogène. La propriété de cette liaison est de permettre la cohésion du cristal tout en laissant la possibilité de clivage des différents feuillets. La kaolinite est connue par la formule chimique suivante : $Al_2Si_2O_5\ (OH)_4$ (Cabane, 2004).

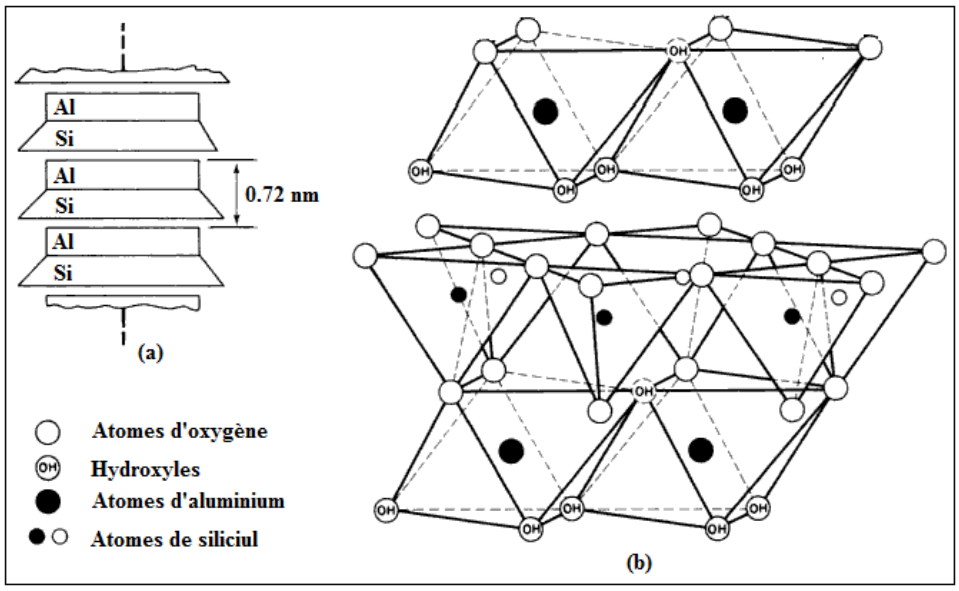


Fig. 1.3 — (a): Schéma de la structure de la kaolinite (Lambe, 1953), (b): vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite (Grim, 1959).

- *Les montmorillonites*

La montmorillonite est un minéral argileux important, composé de deux feuillets de silice et d'un feuillet d'alumine (gibbsite). Elle est désignée comme un minéral 2:1 (Holtz and Kovacs., 1981) (Fig. 1.4). Une partie des atomes d'aluminium de la couche octaédrique est remplacée par des atomes de magnésium voire de fer.

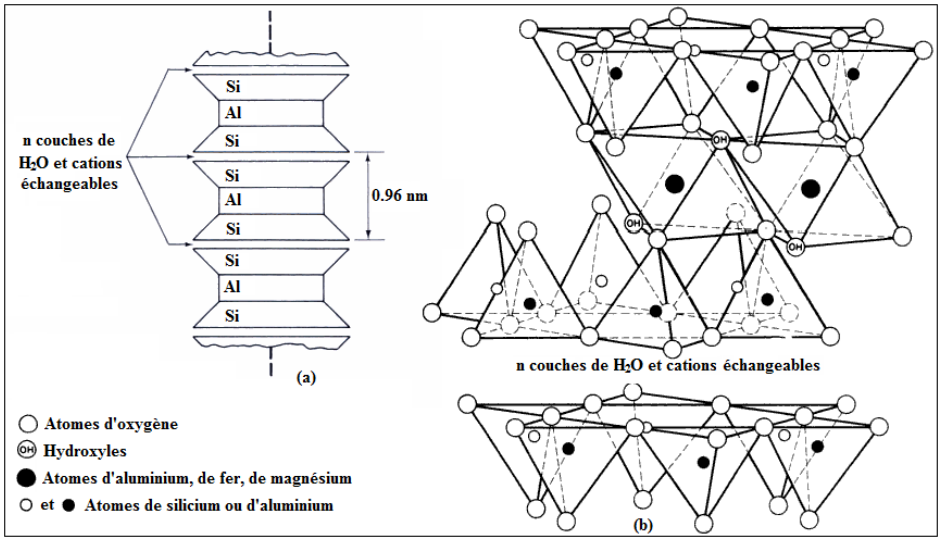


Fig. 1.4 — (a): Schéma de la structure de la montmorillonite (Lambe, 1953), (b): vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite (Grim, 1959).

La compensation des charges négatives excédentaires s'effectue par l'introduction dans l'espace interfoliaire (espace séparant deux triplets consécutifs T:O:T) d'un cation (Ca^{2+}, Na^{+}). Ces cations interfoliaires ont la particularité de pouvoir être solvatés par des molécules d'eau qui provoquent le gonflement du cristal, l'espace interfoliaire passe de 14 à 17 Å en

présence de Ca^{2+} et de 13 Å jusqu'à l'infini en présence de Na^{+}. Il existe plusieurs minéraux argileux dans le groupe des smectites, entre autres, la montmorillonite a pour une formule chimique [$(Al_{1.67}Mg_{0.33})$ Si_4O_{10} $(OH)_2$] (Cabane, 2004). D'après Luckham and Rossi, (1999), le phénomène d'hydratation interfeuillet est responsable de l'augmentation de la distance entre les feuillets (distance basale).

- *Les illites*

L'illite est une autre composante importante des sols argileux. Comme la montmorillonite, elle a une structure 2:1. En effet, la seule différence entre cette composante et celle de la montmorillonite c'est que l'espace interfoliaire de l'illite est rempli par un cation de potassium qui crée un lien très fort entre les couches qui la constitue (Holtz and Kovacs., 1981). Un quart des atomes de silicium dans les tétraèdres est remplacé par des atomes d'aluminium. La compensation des charges négatives s'effectue par l'introduction dans l'espace interfoliaire d'un cation K^{+}. On peut aussi rencontrer, dans le feuillet de silice, certaines substitutions isomorphes de silicium par l'aluminium (Fig. 1.5). La composition minéralogique de l'illite a pour formule chimique [K_{2-x} (Al, Fe)$_{4-y}$ (Fe, Mg)$_y$ (Si_{6+x} Al_{2-x})O_{20} $(OH)_4$] (Cabane, 2004).

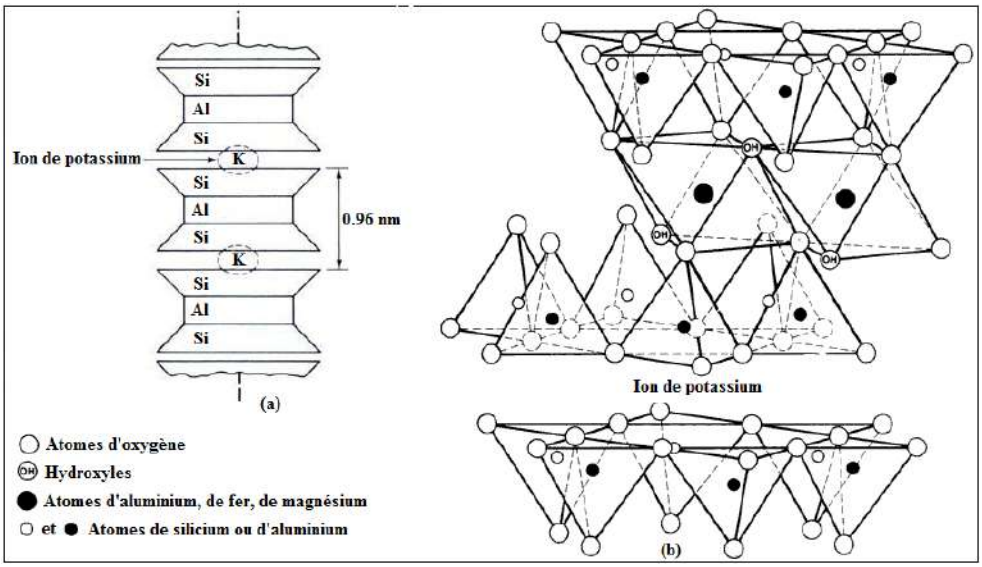


Fig. 1.5 — (a): Schéma de la structure de l'illite (Lambe, 1953), (b): vue isométrique de la structure atomique de l'illite (Grim, 1959).

1.2.2 Les limons

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

1.2.3 Les marnes

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

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

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

- de la chaux avec les marnes argileuses ;
- de la chaux hydraulique avec les marnes proprement dites ;
- du ciment avec les marnes calcaires ou calcaires marneux.

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

Nous pouvons conclure que l'évolution des sols fins est dus 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).

1.3 Techniques d'amélioration des sols

Lorsque les sols posent des problèmes de tassements, de portance ou de liquéfaction pour un ouvrage, les améliorations et les renforcements 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.

1.3.1 Amélioration par remplacement du sol

D'après Gaafer et al. (2015), le remplacement du sol est l'une des méthodes les plus anciennes et les plus simples qui améliorent les conditions du sol support. Le sol support peut être amélioré par le remplacement des sols médiocres (les sols organiques et argile molle) avec des matériaux de capacité portante élevée tels que le sable, le gravier ou de pierre concassée. Cependant, certains sols sont plus difficiles à compacter que d'autres, lorsqu'ils sont utilisés en tant qu'une couche de remplacement. Le tassement vertical diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche de remplacement. De plus, Gabr (2012) a observé que l'utilisation du sol de remplacement peut réduire considérablement les tassements ainsi que les coûts de construction où il a déclaré aussi que malgré les avantages de remplacement du sol, la détermination de l'épaisseur du sol de remplacement est basée sur l'expérience qui, dans de nombreux cas est discutable. Pratiquement, l'utilisation du sol de remplacement sous une fondation superficielle est facile et peut être aussi une solution moins chère que son utilisation sous une fondation profonde.

1.3.2 Méthodes mécaniques

1.3.2.1 Compactage de surface

Le compactage est la densification des sols par application d'énergie mécanique en vue d'améliorer les propriétés géotechniques des sols (Fig. 1.6). 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 décroit 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. 1.6 — Stabilisation par compactage de surface (Cas d'une digue de barrage en terre de Kef-Eddir construit à Tipaza, Algérie).

1.3.2.2 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 (Fig. 1.7). 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. 1.7 — Densification d'un terrain par compactage dynamique (cas réel de l'aéroport de Nice 1978, France).

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.

1.3.2.3 Vibrocompactage

La technique du vibrocompactage (ou compactage par résonance vibratoire) consiste en la vibration de profilés spécialement développés à l'aide de vibreurs verticaux fortement puissants à fréquence variable, installés et adéquatement fixés à la tête du profilé (Fig. 1.8).
L'énergie vibratoire est transmise sur toute la longueur du profilé et provoquant le compactage du sol en place, sans qu'un matériau de remplacement soit nécessaire. Ce type de densification fonctionne de façon optimale dans des sols sableux saturés, les vibrations font développer alors des pressions interstitielles. La mobilité des particules de sable augmente et elles se réorganisent donc plus facilement.



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).

Dans les sols non saturés, ces pressions interstitielles ne se développent pas et la cohésion capillaire rend par ailleurs la réorganisation des particules encore plus difficile (De Cock and Bottiau, 2004). Il est important de signaler que les nuisances vibratoires liées à l'utilisation des compacteurs vibrants doivent être prises en considération par les concepteurs d'infrastructures. En effet, les dégâts occasionnés par exemple sur les structures environnantes constituent actuellement la principale source de contentieux en travaux publics. En effet, on peut assister à une interruption des travaux et des surcoûts importants si une fois les contraintes vibratoires ne sont pas prises en compte au préalable.

1.3.2.4 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 (Fig. 1.9). 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. 1.9 — Amélioration d'un terrain par induction hydraulique (Substitution du sol par du gravier dans un chantier à Saint Martin d'Hères en 2006, France).

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.

1.3.3 Méthodes hydrodynamiques

1.3.3.1 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 (Fig. 1.10). 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 suffisante (Radhakrishnan et al., 2010).

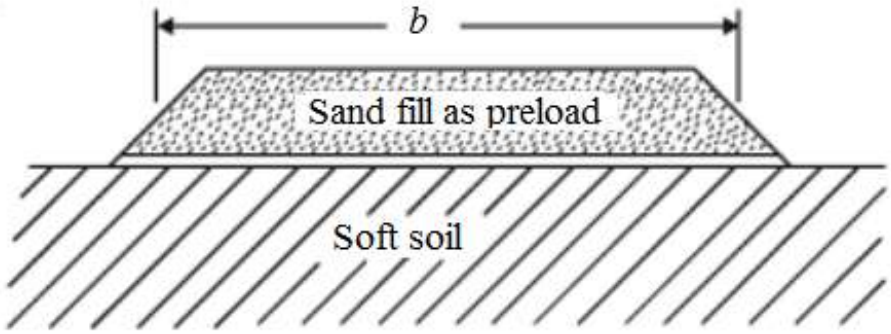


Fig. 1.10 — Amélioration d'un sol mou par la technique de préchargement (Varghese, 2005).

1.3.3.2 Accélération de la consolidation par les drains verticaux

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

Les drains de sable (Fig. 1.11a) sont construits en perçant des trous à travers la couche d'argile à l'aide d'un forage rotatif ou de tarière continue dans le sol. Les trous sont ensuite remplis de sable. Quand un supplément de surcharge est appliqué à la surface du sol, la pression de l'eau interstitielle dans l'argile va augmenter, et elle sera dissipée par le drainage dans les deux directions verticales et horizontales. Le tassement est alors accéléré.

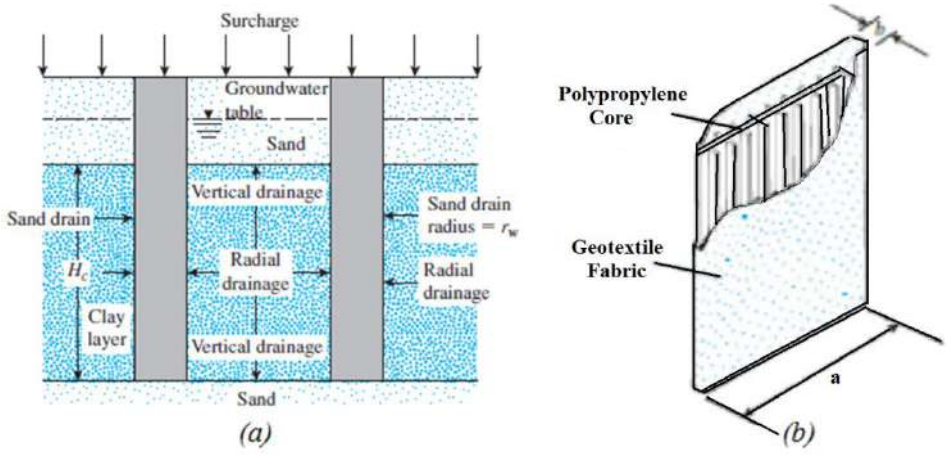


Fig. 1.11 — Amélioration des mous par la technique de l'Accélération de la consolidation par les drains verticaux, (a): drains de sable verticaux, (b): drains verticaux préfabriqués (Das, 1983).

Cependant, les drains verticaux préfabriqués sont également appelés drains verticaux constitués de matières synthétiques canalisés avec un noyau enveloppé dans un tissu de géotextile comme le montre la (Fig. 1.11b). Ils sont flexibles, durables, peu coûteux et ne nécessitent pas de forage. Les drains verticaux préfabriqués sont les mieux adaptés pour les argiles, les limons, les couches argileuses organiques et le sable limoneux. Ils sont placés dans une plaque d'ancrage en acier puis les pousser dans le sol à la profondeur voulue. Ensuite, les drains verticaux préfabriqués seront coupés légèrement au-dessus du sol après drainage (Taube, 2008).

Le drain vertical vise à diminuer le temps requis pour la consolidation des sols mous en accélérant, à l'aide d'une surcharge, l'expulsion de l'eau qu'ils contiennent. Il est constitué d'une plaquette ondulée ou surmontée de "chevilles" en polymère flexible. Cette plaquette, mesurant 100 mm de largeur sur 6 mm d'épaisseur, est enrobée d'une membrane géotextile synthétique, choisie en fonction des propriétés de filtration recherchées et de sa capacité à résister à l'abrasion lors de son installation. Le drain est inséré dans le sol à l'aide d'un mandrin creux fixé à une flèche verticale rattachée à une rétro-caveuse ou à une grue sur chenilles. Une force statique est utilisée pour enfoncer le mandrin et ancrer le drain à la profondeur désirée. En présence de couches de matériaux raides, un vibrateur est ajouté au mandrin, ou des avant-trous sont pratiqués pour passer à travers des couches très raides. Après leur installation, un coussin de sable filtrant et une surcharge placée au-dessus de la surface de travail pour provoquer l'acheminement de l'eau interstitielle vers les drains qui, à leur tour, l'amèneront vers la surface, accélérant dès lors la consolidation des sols mous.

1.3.4 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, lorsqu'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. (Fig. 1.12).

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. 1.12 — Stabilisation provisoire des parois d'un fond par la technique de congélation.

1.3.5 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.

1.3.5.1 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 établis 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 ($CaCO_3$), à une température supérieure à 900°C, qui donne lieu à la naissance d'un oxyde de calcium (CaO) ou la chaux vive munie d'un dégagement du gaz carbonique (CO_2) (Eq. 1).

$$CaCO_3 \text{ (calcination à 900°C)} \rightarrow CaO \text{ (chaux vive)} + \text{(dégagement de } CO_2\text{)} \quad (1)$$

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

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 12 \text{ kJ/mol} \quad (2)$$

La chaux vive CaO peut, après hydratation par l'humidité ambiante ($Ca(OH)_2$), se carbonater sous l'action du CO_2 atmosphérique, (Eq. 3).

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (3)$$

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.

1.3.5.2 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:

- *Action à court terme*

Elle peut se résumer en cinq étapes successives (Fig.1.13) (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 Ca^{2+} et OH^- ;

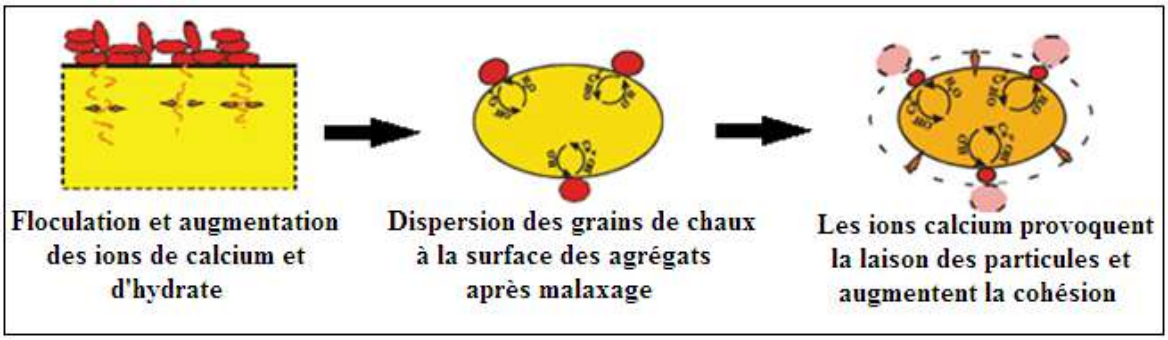


Fig. 1.13 — Action de la chaux à court terme (modification par floculation), (Cabane, 2004).

- la forte concentration en ion Ca^{2+} et OH^- entraine 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 (Fig. 1.14) (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.

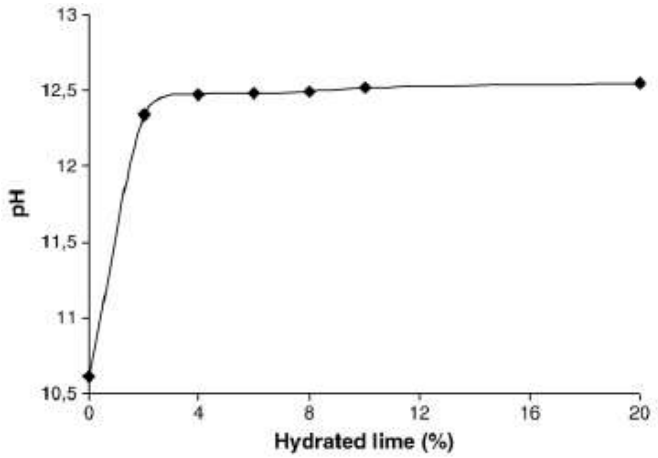


Fig. 1.14 — Effet de la chaux sur le pH d'une argile (bentonite très plastique riche en kaolinite et en montmorillonite), (Al-Mukhtar et al., 2010).

- *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 Ca^{2+} et OH^- augmente le pH du sol (pH≥12.5) ;
- un fort pH, entraine 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).

1.3.5.3 Utilisation du ciment

Un ciment est un liant hydraulique composé de matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. D'ailleurs, pour les travaux de terrassement, la norme NF- P15-108 met en évidence des liants hydrauliques routiers destinés notamment, à la réalisation d'assises de chaussées, de couches de forme et de terrassements.

La norme NF- EN 197-1 subdivise les liants hydrauliques en cinq type en fonction de leur composition à savoir: le ciment Portland (CEM I), le ciment Portland composé (CEM II), le ciment de haut-fourneau (CEM III), le ciment pouzzolanique (CEM IV) et le ciment composé (CEM V). En général, tous les liants doivent contenir un ou plusieurs constituants qui présentent l'une au moins l'une des propriétés suivantes:

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

1.3.6 Amélioration des sols par renforcement des terres

1.3.6.1 Terre renforcé

La terre renforcée est un matériau composite qui consiste en un sol contenant des éléments le renforcement (bandes d'acier galvanise ou des négrides plastiques).

Le sol grenu est généralement faible en traction en plaçant à l'intérieur de celui ci des éléments de renforcement alors les forces de traction peuvent etre transmises du sol aux éléments. Le matériau composite possède alors une résistance à la traction dans la direction ou le renforcement commence à travailler (frottement).

Pour les sols fins ou l'adhésion entre le remblai et le renforcement est mauvaise et peut etre réduite par l'augmentation de «U» on utilisera donc des matériaux sandwichs (couche de sable en contact avec les éléments renforçant). L'efficacité du renforcement est commandée par sa résistance à la traction et la liaison qu'il développe avec le sol adjacent.

Plusieurs éléments de renforcement peuvent être utilisés par exemple les bandes d'acier ou d'aluminium, les câbles d'acier, les matériaux polymère ou géosynthétiques, les treillis métalliques, les grilles sont des éléments métalliques ou en polymère arranges en réseaux rectangulaires (maillages), les fibres sont en géotextiles, métalliques ou en fibres naturelles…etc.

Le mécanisme de transfert de charge entre le sol et l'élément renforçant est gouverne par le frottement qui se développe à l'interface entre les deux constituants. Dans le cas des murs en terre renforcée, les deux éléments sont considères comme un bloc cohérent dans l'analyse de la stabilité, avec une pression des terres active actionnant derrière le bloc (analyse contre le glissement, renversement et rupture de la capacité portante). La rupture interne peut arriver uniquement s'il ya une perte du frottement entre le sol et le renforcement, ou par rupture de la traction des éléments renforçant.

1.3.6.2 Technique de renforcement in situ

Le principe de base consiste à mobiliser un certain volume de terrain ou de rocher encaissant de façon a rétablir ou à renforcer la stabilité d'une fondation au renversement, au glissement ou au soulèvement.

Il ya 02 techniques de renforcement des sols in situ pour stabiliser les pentes et les excavations: clouage des sols, micro pieux réticulés (Fig. 1.15).

La méthode consiste à sceller des barres d'acier dans les masses de rochers fracturées rendant ainsi au "rocher" son monolithisme. Elle vise à stabiliser les déplacements différentiels des parois de la faille par un clouage multidirectionnel variant de 45° à 60° environ. Ces méthodes sont comparables à celles de clouage des parois rocheuses fracturées.

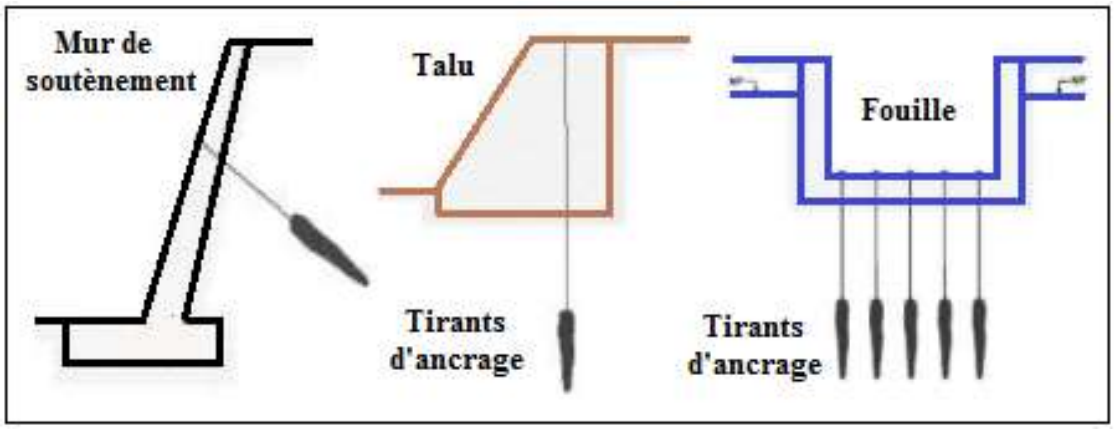


Fig. 1.15 — Technique de renforcement in situ par tirants d'ancrage.

1.3.6.3 Matériaux synthétiques

La construction de remblais sur sols compressibles constitue un enjeu majeur. Dans ce contexte, l'utilisation de nappes géosynthétiques pour améliorer la stabilité de ces remblais est une des techniques de renforcement de sol parmi les plus efficaces et largement éprouvée. Il y en a plusieurs types de matériaux géosynthétiques à savoir les produits polymériques (polypropylène, polyester, polyéthylène, polyamide, polyvinyle Chloride, polystyrène), les géonets, les géogrides, les géomembranes, les géotextiles, les géocomposites…etc.

1.3.7 Amélioration des sols par inclusion

1.3.7.1 Colonnes à module contrôlé

Les colonnes à module contrôle sont des inclusions semi-rigides et cimentées dont les modules de déformation peuvent varier de 500 a 12,000 MPa, ou de l'ordre de 5 à 30 fois plus faibles que ceux du béton. Elles sont mises en œuvre comme procédé de renforcement de sol.

Ce type de traitement ne vise donc pas à réaliser des pieux devant supporter la totalité de la charge apportée par l'ouvrage, mais à réduire la déformabilité globale du sol à l'aide d'éléments semi-rigides régulièrement repartis.

Cette technique est préférable aux colonnes ballastées, réalisées par Vibro-Remplacement, lorsque:

- le sol est trop mou ou organique et n'offre pas d'étreinte latérale suffisante ;
- les charges sont élevées ou les tolérances de tassement sévères.

Les colonnes à module contrôlé sont généralement réalisées à l'aide d'une vis spécialement conçue par MENARD SOL-TRAITEMENT pour refouler le sol. L'outil est vissé dans le sol jusqu'à la profondeur désirée puis remontée lentement sans déblais vers la surface. Simultanément, un coulis ou mortier est injecté dans le sol par l'âme de la tarière creuse de la vis spéciale en utilisant des pressions modérées. Ainsi, l'on constitue une colonne de 450 à 600 cm de diamètre de matériau cimenté qui admet des contraintes de 10 à 50 bars, selon les dosages.

1.3.7.2 Colonnes ballastées

Le procédé des colonnes ballastées est une technique d'amélioration de sol permettant de créer des colonnes de granulats expansées afin d'augmenter la portance d'un sol et d'en réduire sa compressibilité. Cette technique est particulièrement performante dont il est possible de mettre en œuvre des semelles superficielles avec une contrainte de sol de l'ordre de 0,2 à 0,3 MPa. C'est une alternative aux fondations profondes de type pieux et dalle portée, ou aux fondations semi-profondes de type puits. En effet, construire un ouvrage sur des colonnes ballastées permet de le fonder comme sur du «bon sol» et donc de respecter les règles usuelles de fondations superficielles.

Les colonnes ballastées sont des colonnes constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement dans le sol et compactés par passes successives (Fig. 1.16). Ces colonnes ne comportent en particulier aucun liant sur leur hauteur. Elles peuvent etre réalisées en maillages réguliers ou variables, en lignes, en groupes ou même de manière isolée. Leur dimensionnement tient compte du type d'ouvrage, de la nature des charges, des tassements absolus et différentiels ainsi que de la nature du sol à traiter.

Cette technique est utilisée dans les sols cohérents tels que les limons et les argiles. L'introduction latérale du ballast à la base du vibreur est réalisée soit gravitairement soit à l'aide d'une pompe à graviers. Ce remplissage est effectué par couches successives tout en maintenant la vibration afin de compacter le ballast et de continuer à refouler le sol. Dans certains cas particuliers, il est possible de procéder à un remplissage complémentaire de coulis

bentonite-ciment simultanément à la mise en place du ballast à l'aide d'un tube latéral. L'ensemble de ces opérations est réalisé par passes remontantes sur la totalité de la hauteur de terrain à consolider.

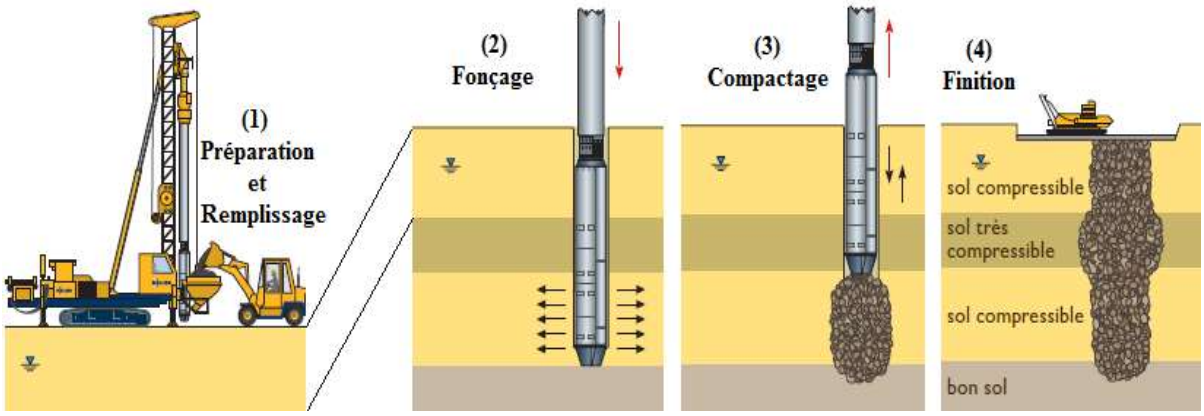


Fig. 1.16 — Principe de renforcement des sols par colonnes ballastées.

L'amélioration de sol par colonnes ballastées consiste à mettre en œuvre un «maillage» de colonnes constituées de matériaux ou graveleux, amenant une densification des couches compressibles et les rendant aptes à reprendre des charges issues de fondations. Le traitement d'un sol par colonnes ballastées conjugue les actions suivantes:

- augmenter la capacité portante du sol ;
- diminuer les tassements totaux et différentiels ;
- diminuer le temps de consolidation par création d'éléments drainant ;
- diminuer les risques induits par les phénomènes de liquéfaction lors des séismes.

1.3.7.3 Inclusion rigide

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

D'ailleurs, le renforcement des sols compressibles par inclusions rigides permet de réaliser la fondation d'ouvrages de grandes longueurs (remblais routiers, ferroviaires…etc.) ou de grandes dimensions (bâtiments industriels, réservoir de stockage…etc.) sur des sols à caractéristiques médiocres tout en étant économiquement intéressants. Ce procède, en superposant un matelas granulaire à un réseau d'inclusions rigides verticales, tire parti des transferts de charges se mettant en place dans tout matériau granulaire. Cette technologie, par la mise en œuvre d'un matelas granulaire associe ou non à un rigides permet de reporter vers le réseau de pieux un maximum de charge (Fig. 1.17).

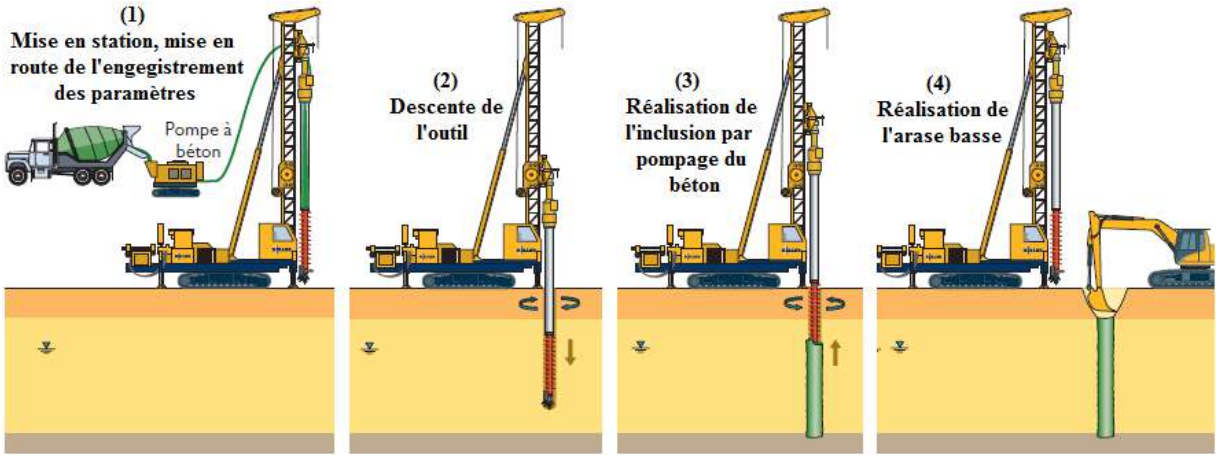


Fig. 1.17 — Principe de renforcement des sols compressibles par inclusion rigide.

1.3.8 Amélioration des sols par injection

1.3.8.1 Injections classiques (Jet grouting)

Une injection classique est une injection qui agit à priori sans déplacement des terrains ; sa mise en œuvre n'est en tout cas pas destinée à resserrer ceux-ci. C'est donc une technique de comblement et d'imprégnation, destinée à remplir des vides naturels, qui sont, soit des fissures (terrains cohérents, rocher), soit les vides des terrains granulaires. Le remplissage se fait avec un coulis sans déformation intentionnelle du sol (Fig. 1.18).

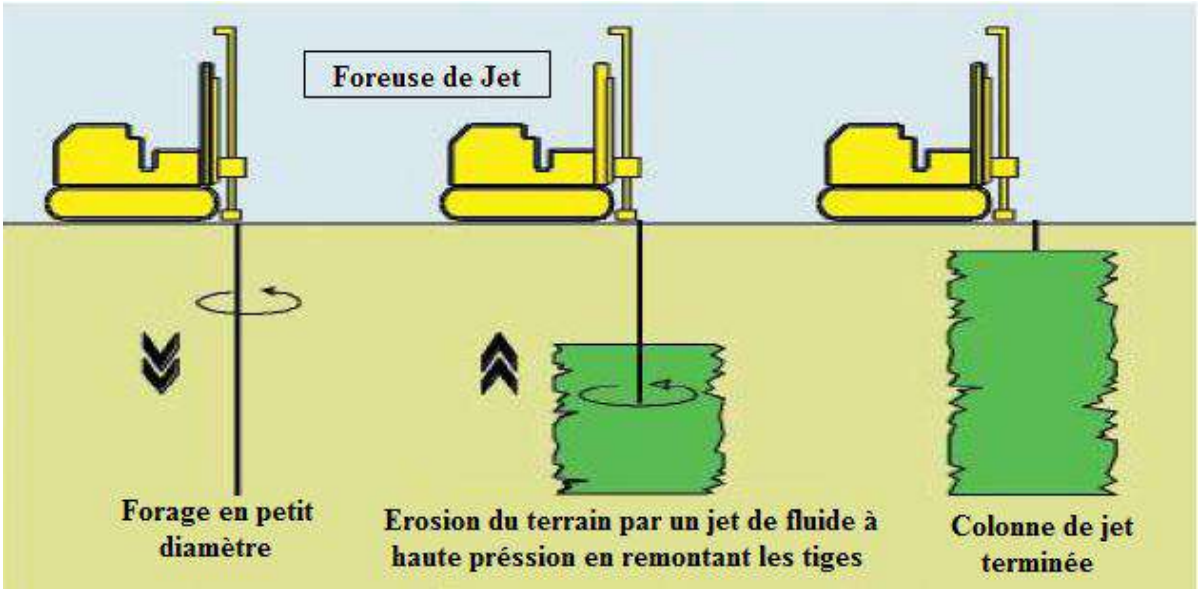


Fig. 1.18 — Principe de réalisation d'une colonne de jet grouting.

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

- une déstructuration des terrains en place sous un jet à très grande vitesse ;

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

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

1.3.8.2 Injections de claquage (Injections de compensation)

À l'origine, le procédé d'injection de compensation a été utilisé par l'industrie pétrolière, afin de créer dans le sous-sol des cheminements préférentiels du pétrole vers les pompes d'extraction. Dans les années 1960, les ingénieurs de Keller ont trouvé pour cette technique d'intéressantes applications dans le domaine des fondations. Cette technique permet aujourd'hui de résoudre les problèmes de fondation ou de stabilisation d'ouvrages, partout où les procédés d'injection classique ne sont pas applicables. De même, cette technique permet le relèvement d'ouvrages affaissés. De plus, grâce aux techniques spécifiques de mesure, d'analyse et d'asservissements développés dans ce but, il est possible de réaliser des relevages d'importance pluri-décimétrique des ouvrages à traiter.

Ce procédé provoque des petites fractures dans le sol, qui se remplissent de coulis qui y fait prise. Grâce à des injections répétitives et sélectives et un système de mesure de tassement perfectionné, on peut améliorer n'importe quel terrain et également provoquer des soulèvements contrôlés.

1.3.9 Méthodes hydrauliques

1.3.9.1 Technique de drainage

L'évacuation de l'eau par drainage, est applicable sur des terrains présentant une perméabilité faible à très faible, et notamment, les argiles, les marnes, les limons…etc. Les systèmes de drainage sont fabriqués de filtres d'agrégats poreux pour collecter l'eau et ensuite la drainer ailleurs. Les drains doivent être capables de drainer toute l'eau qui s'y infiltre sans provoquer une accumulation excessive de la charge. Il est important de réduire la perte de charge due au flux à travers le filtre à une valeur basse compatible avec la granulométrie dictée, et également, De concevoir une couche d'agrégat fin gradué pour filtrer et d'une couche d'agrégat grossier à forte perméabilité pour drainer l'eau. Cela va limiter le problème de colmatage de vides des drains par la migration des fines des sols adjacents. (Fig. 1.19).

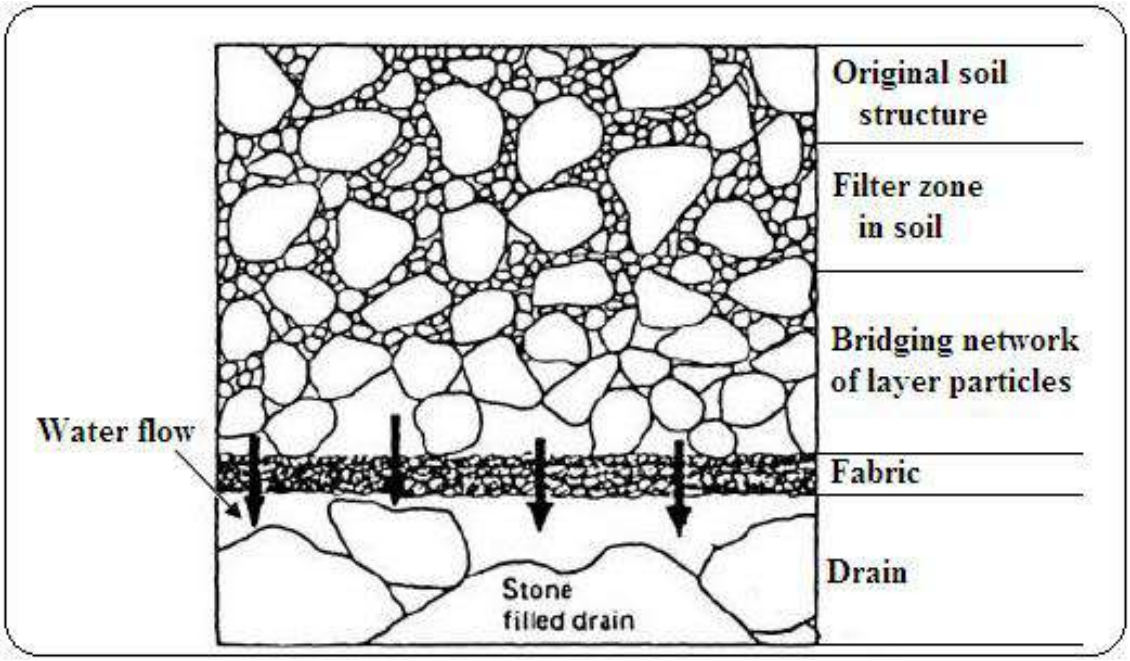


Fig. 1.19 — Technique de drainage par un drain filtre.

1.3.9.2 Le rabattement de la nappe par pompage

Il consiste à abaisser la pression des nappes à l'intérieur d'un volume de terrain déterminé, en dessous de la surface extérieure du volume considéré. Il est obtenu par un nombre approprié de captages disposés autour du volume à rabattre et dans lesquels un pompage permanent est assuré. Plusieurs procédés de rabattement peuvent être distingues, en fonction de la nature des terrains rencontrés:

- le rabattement à pleine fouille, qui consiste à pomper l'eau dans un puisard aménagé au fond de la fouille et surcreusé d'environ 0,5 à 1 m par rapport à ce dernier ;
- le rabattement par puits filtrant est employé pour les terrains perméables; les puits sont perforés au moyen d'une technique appropriée.

1.3.10 Autres techniques d'amélioration des sols

1.3.10.1 Electro-osmose

L'électro-osmose a été initialement mise au point par Casagrande (1947) pour éliminer l'eau contenue dans les argiles actives à faible perméabilité. Cette technique s'est révélée efficace lorsqu'elle a été employée pour introduire un agent chimique dans le sol, soit par dissolution de l'anode, soit par utilisation directe d'un électrolyte (Fig. 1.20).

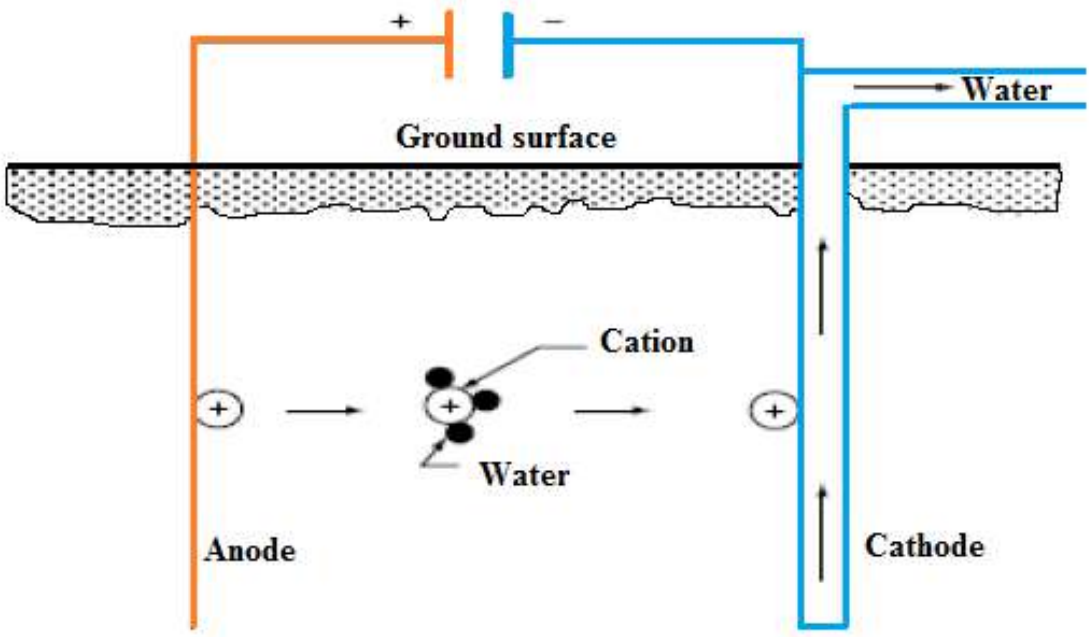


Fig. 1.20 — Principe de la technique électro-osmose.

Cette opération améliore la stabilité du sol soit par modification chimique dans les matériaux argileux par déplacement d'ions, soit par cimentation partielle des vides interstitiels. Cette variante d'électro osmose est connue sous le nom de stabilisation électrochimique.

1.3.10.2 Electrochimie

L'électrochimie a pour effet de réduire suffisamment la teneur en eau des sols et, par conséquent, d'augmenter leur résistance au cisaillement. La consolidation électrochimique est une variante de l'électro osmose. Elle repose sur le fait que si l'on met à l'anode une solution salée, on peut arriver à la faire migrer dans le sol. Si la solution est bien choisie, cette migration créera une consolidation par imprégnation d'ions (Fig. 1.21).

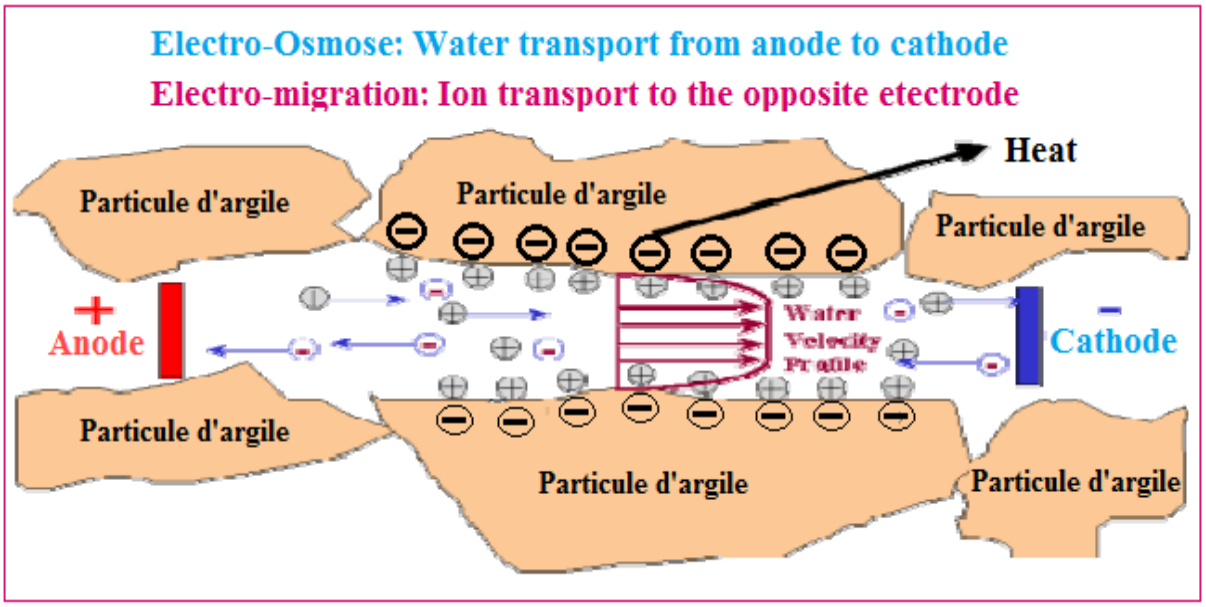


Fig. 1.21 — Principe de la technique électrochimie.

Les cations associes aux argiles sont interchangeables; en conséquence l'introduction dans une argile riche en cations faiblement retenus et ayant une haute capacité d'échange, de solutions contenant un excès de cations mieux retenus conduira à un échange d'ions et améliorera les propriétés du sol. Tel est le fondement de la stabilisation de surface des montmorillonites par addition de chaux, de ciment ou d'autres composants.

1.4 Conclusions

Les différentes techniques d'amélioration des sols sont largement utilisées à travers le monde en vue de consolider des terrains ayant une structure hétérogène et inconstructible. L'utilisation intensive de remblais sableux pour gagner des terrains sur la mer en est sans doute l'exemple le plus représentatif. Dans ce cas, différentes techniques ont été développées depuis des décennies.

Grace à une large gamme de solutions disponibles pour le traitement des sols, qui sont jusqu'à présent maintenues à la pointe de la technologie, en mesure d'apporter une solution globale de traitement pour chaque cas. Les nombreuses références acquises mettent en avant la pérennité et l'efficacité de ces solutions, s'agissant de délais et de qualité du traitement.

Ces choix doivent toujours être guides par le souci constant de ne pas aggraver les désordres d'une autre structure qui présente déjà des insuffisances, ou de ne pas mettre en péril la bonne tenue des ouvrages voisins.

La stabilisation chimique des sols par l'utilisation des additifs peut être efficace et elle reste jusqu'à présent la plus utilisée et la moins onéreuse. Par conséquent, une synthèse bibliographique détaillée sera développée dans le chapitre suivant afin de se renseigner de l'état d'avancement des recherches de la stabilisation chimique des sols argileux tout en utilisant des liants hydrauliques et des matériaux pouzzolaniques à savoir le ciment, la chaux, les cendres volantes, le laitier, la fumé de silice, la pouzzolane naturelle…etc. L'analyse de l'effet de ces stabilisants sur le traitement des sols argileux avec ou sans présence des sulfates sera également mis en évidence.

Chapitre 2

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

2.1. Introduction
2.2. Effet des ajouts cimentaires sur la plasticité
2.3. Effet des ajouts cimentaires sur les caractéristiques du compactage
2.4. Effet des ajouts cimentaires sur la résistance à la compression non confinée
2.5. Effet des ajouts cimentaires sur la résistance au cisaillement
2.6. Effet des ajouts cimentaires sur la compressibilité
2.7. Effet des ajouts cimentaires sur le gonflement
2.8. Conclusion

2.1 Introduction

La technique d'amélioration fait appel à l'utilisation de différents ajouts minéraux ou cimentaires, ces ajouts peuvent être d'origine naturelle (pouzzolane naturelle), artificielle (chaux, ciment…etc.) ou déchets minéraux (fumée de silice, cendres volantes…etc.). Ils possèdent des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques différentes. L'addition de ces produits aux sols médiocres améliore considérablement leurs propriétés géotechniques, mais malgré ça, le problème reste encore posé, car, après traitement, le sol stabilisé peut être altéré par certains éléments chimiques nommés «éléments perturbateurs» à savoir les sulfates, les chlorures, les fertilisants, la matière organique … etc. La microstructure et la nature minéralogique du sol traité peuvent aussi influer négativement sur le processus d'amélioration.

Dans ce présent chapitre, nous allons présenter en détail, les travaux de recherches réalisés sur la stabilisation chimiques des sols par différents types d'ajouts. L'objectif principal est d'établir une synthèse bibliographique sur l'effet des liants hydrauliques (le ciment et la chaux) et les matériaux pouzzolaniques (les cendres volantes, le laitier, la fumé de silice, la pouzzolane naturelle…etc.) sur le traitement des sols avec ou sans présence des éléments perturbateurs (les sulfates, les nitrates, les chlorures, les phosphates, la matière organique…etc.) responsables de l'échec ou la réussite d'un traitement.

2.2 Effet des ajouts cimentaires sur la plasticité

2.2.1 Effet de la chaux

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; Kamon, 1992; Attoh-Okine, 1995; Indraratna, 1996, Osula, 1996; Narasimha Rao and Rajasekaran, 1996; Guney et al., 2007; Kavak and Kyarah, 2007; Yong and Ouhadi, 2007; Manasseh and Olufemi, 2008, Al-Mukhtar et al., 2012; Celik and Nalbantoglu, 2013; Khemissa and Mahamedi, 2014).

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 Na^+ qui se présentent dans le sol par des ions de Ca^{2+} apportés par l'addition de la chaux. Un comportement inverse a été observé par Indraratna (1996) et Jha and Sivapullaiah (2015) où la limite de liquidité des sols stabilisés diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux additionnée.

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

Afès et al. (2000) ont reporté que la limite de plasticité d'une argile stabilisée par 6% de chaux augmente de 24% jusqu'à 32.4 et 34% après une cure de 7 et 30 jours, respectivement. Le même comportement a été observé par plusieurs chercheurs (Attoh-Okine, 1995; Bell, 1996; Okagbue and Yakubu, 2000; Yong and Ouhadi, 2007). Cela peut être expliqué par l'utilisation de la chaux qui conduit à la floculation des particules d'argiles en causant une augmentation immédiate de la limite de plasticité du sol stabilisé. De plus, l'augmentation de la limite de plasticité provoque une réduction des propriétés plastiques du sol stabilisé. 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 (Na_2SO_4 et K_2SO_4) et divalents ($CaSO_4$ et $MgSO_4$) sur les paramètres de consistance d'une kaolinite traitée à 6% de chaux (Fig. 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 (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.

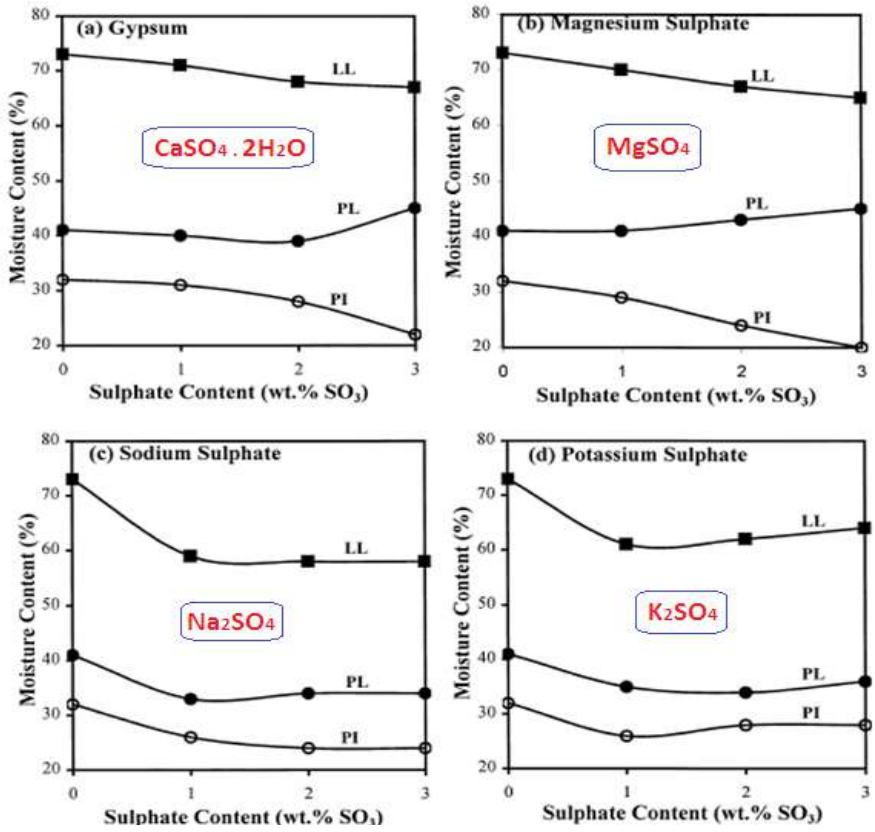


Fig. 2.1 — Effet des sulfates monovalents et divalents sur les limites d'Atterberg d'une kaolinite traitée à 6% chaux, (Kinuthia et al., 1999).

Sivapullaiah et al. (2000) ont étudié l'effet apporté par les différentes concentrations (0.5, 1 et 3%) d'un sulfate monovalent (Na_2SO_4) et divalent ($CaSO_4$) sur la limite de liquidité d'un sol montmorillonitique traitée à 6% de chaux éteinte. Les résultats obtenus ont montré que la limite de liquidité augmente avec l'augmentation de la concentration en sulfate à savoir que le sulfate de sodium a une influence considérable par rapport au sulfate de calcium (Tableau 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 présences des mêmes concentrations en sulfate monovalent (Na_2SO_4) décroit initialement pour une faible concentration (1%.SO_3) puis elle augmente avec son augmentation (2 et 3%SO_3). Contrairement au sulfate divalent ($CaSO_4.2H_2O$), la limite de liquidité diminue avec leur augmentation. Cela mis en évidence l'effet de la nature des minéraux argileux qui se présentent dans les sols du fait que les sols montmorillonitiques possèdent généralement une capacité d'échange cationique (CEC) bien plus élevée que celle des sols kaoliniques.

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

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

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

2.2.2 Effet du ciment

Le ciment est généralement utilisé seul ou en combinaison avec d'autres additifs comme la chaux pour les sols possédant une faible plasticité à savoir les sables, les limons,…etc. En effet, Asgari et al. (2015) ont utilisé différentes proportions de ciment (0-9%) dans le traitement d'un sol peu plastique (IP=9%). Les résultats obtenus ont montré que la limite de liquidité et l'indice de plasticité augmentent jusqu'à un optimum qui correspond à 3% de ciment puis ils diminuent avec l'augmentation de la teneur en ciment. Cependant, la limite de plasticité augmente avec l'augmentation de la quantité du ciment utilisé (Fig. 2.2).

Plusieurs auteurs s'accordent que l'addition du ciment provoque une réduction dans l'indice de plasticité. L'incorporation du ciment réduit la plasticité des sols. Ces résultats ont été confirmés par plusieurs chercheurs (Basha et al., 2003; Degirmenci et al., 2007).

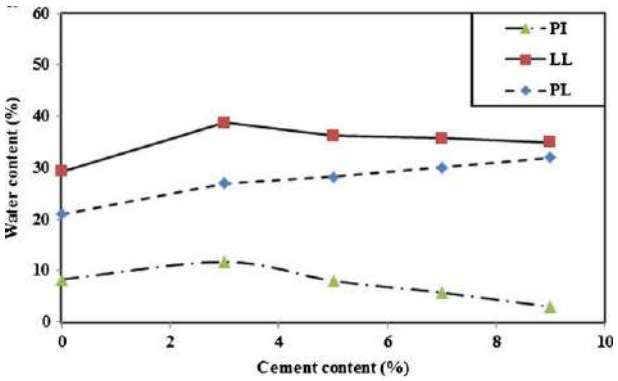


Fig. 2.2 — Effet du ciment sur les limites d'Atterberg d'un sol peu plastique, (Asgari et al., 2015).

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

2.2.3 Effet des cendres volantes

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 (Fig. 2.3). 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.

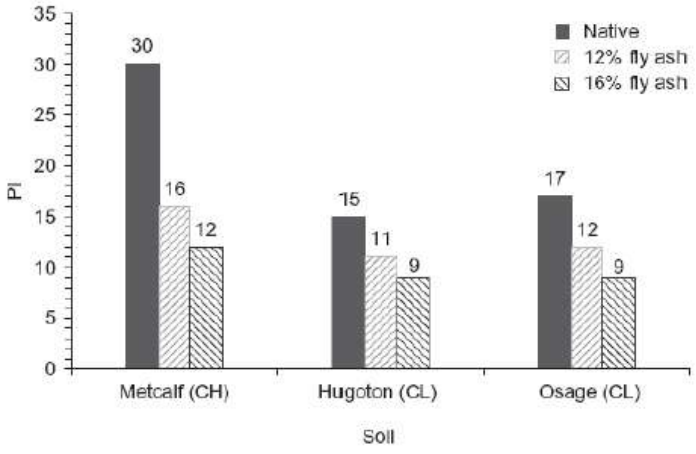


Fig. 2.3 — Effet des cendres volantes sur l'indice de plasticité d'un sol moyennement plastique, (Parsons and Kneebone, 2005).

D'ailleurs, Kolias 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.

2.2.4 Effet de la pouzzolane artificielle (Sarooj)

La pouzzolane artificielle ou «le Sarooj» est un ajout cimentaire obtenu par la calcination d'argile mélangée avec de la chaux et de l'eau. Il est peut être utilisé comme un agent de cimentation dans la stabilisation chimique des sols. Le Tableau 2.2 illustre l'effet du Sarooj sur les limites d'Atterberg du sol traité (Al-Rawas et al., 2005). Les résultats obtenus ont montré que la limite de liquidité a augmenté de 50 à 61% en présence de 3% du sarooj puis elle s'est stabilisée à 54% environ malgré l'augmentation du dosage en Sarooj. D'autre part, la limite de plasticité a diminué préalablement puis elle augmente lorsque la teneur en Sarooj est supérieure à 6%.

Tableau 2.2 — Effet de la pouzzolane artificielle sur les limites d'Atterberg, (Al-Rawas et al., 2005).

Sarooj (%)	0	3	6	9	10
WL (%)	50	61	54	55	53
WP (%)	30	28	19	40	39
IP (%)	20	33	35	15	14

2.2.5 Effet de la cendre de l'écorce de riz (RHA)

Basha et al. (2003) ont constaté que l'utilisation de 20% de la cendre de l'écorce de riz (RHA) comme additif fait diminuer l'indice de plasticité de la Kaolinite et de la bentonite de l'ordre de 30% et de 25%, respectivement (Fig. 2.4b et c). Tandis que pour la même teneur en RHA, l'indice de plasticité du sol résiduel reste constant (13%) et comparable au sol non traité (Fig. 2.4a). Cela implique que le RHA n'est peut être utilisé que pour les sols présentant un indice de plasticité élevé.

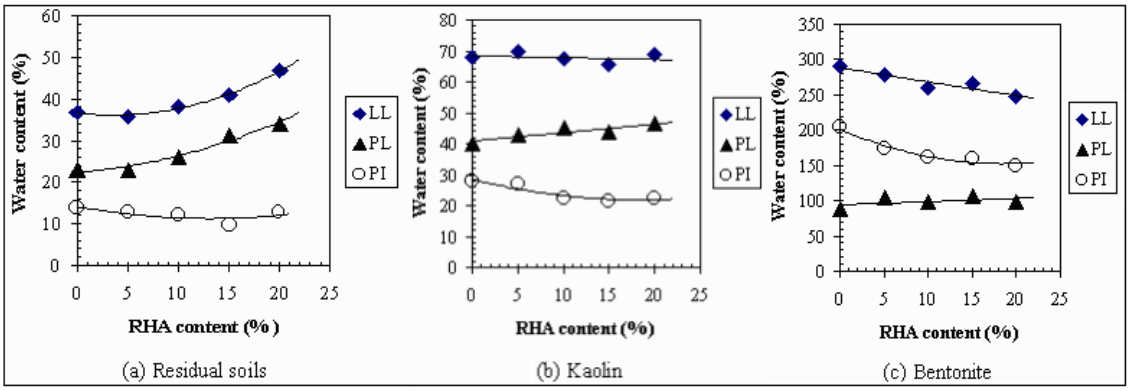


Fig. 2.4 — Effet de l'utilisation de la cendre de l'écorce de riz (RHA) comme additif sur les limites d'Atterberg de trois types de sols, (Basha et al., 2003).

2.2.6 Effet de la combinaison chaux/ciment

Al-Rawas et al. (2005) ont étudié l'effet de la combinaison de la chaux avec du ciment sur un sol gonflant (contenant principalement 43% de montmorillonite et d'autres minéraux argileux). Les résultats obtenus ont met en évidence la réduction remarquable de l'indice de plasticité de 20 à 8% si une fois les combinaisons de 3%chaux + 3% ciment et 5%chaux + 3%ciment sont utilisées.

2.2.7 Effet de la combinaison chaux/fumée de silice

Bagherpour and Choobbasti (2003) ont étudié la combinaison d'un ciment avec la fumée de silice et la chaux avec la fumée de silice. Ils ont trouvé que l'addition de la fumée de silice n'a pas d'influence sur l'indice de plasticité du mélange «sol-chaux-fumée de silice», car l'adhésion entre la chaux et la fumée de silice était incomplète. Par contre, la fumée de silice influe sur l'indice de plasticité du mélange «sol-ciment-fumée de silice», elle diminue l'indice de plasticité par l'adhésion entre le ciment et la fumée de silice.

2.2.8 Effet de la combinaison chaux/cendres volantes

En absence des sulfates, Ansary et al. (2006) ont étudié deux sols (A et B) de plasticité faible par la combinaison de la chaux et de cendres volantes. Les résultats obtenus ont montré que la limite de liquidité et de plasticité augmentent pour le sol -B- quelque soit le dosage chaux/cendres volantes, tandis que la limite de liquidité du sol -A- diminue alors que sa limite de plasticité augmente avec l'augmentation du dosage en cendres volantes (Tableau 2.3).

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).

Propriétés	**Sols non traités**		**3% de chaux mélangée avec**					
			6% de cendres volantes		**12% de cendres volantes**		**18% de cendres volantes**	
	Sol -A-	Sol -B-	Sol -A-	Sol -B-	Sol -A-	Sol -B-	Sol -A-	Sol -B-
$\mathbf{W_L}$	43.7	25.5	42.5	31.2	41	32.3	41.5	33.7
$\mathbf{W_P}$	30.4	23.5	32.9	28.9	37.1	33.5	38.1	35.8

En présence des sulfates, le même comportement a été observé par Sivapullaiah and Jha (2014) où l'argile (très plastique et fortement expansive) a été traitée avec plusieurs combinaison de chaux et de cendres volantes et à titre d'exemple l'indice de plasticité diminue de 40.4 à 5,9% avec un traitement combiné de 10%CV et de 6% de chaux (Tableau 2.4). Cela peut être dû à la diminution de la teneur en argile et la modification de son classement en raison de la taille plus grossière des particules et de la plus faible limite de liquidité de cendres volantes par rapport au sol. Cependant, pour la même combinaison

(10%CV et de 6% de chaux), l'indice de plasticité diminue encore plus jusqu'à 1,4% en présence seulement de 1% de gypse. Cela peut être dû à la diminution supplémentaire de la double couche diffuse et de l'augmentation de la viscosité des fluides de pores par l'absorption de plus d'ions calcium présents dans le gypse.

Tableau 2.4 — 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).

Teneurs en eau	Argile non traitée	Argile traitée avec des combinaisons de Chaux/CV sans			Argile traitée avec des combinaisons de Chaux/CV avec		
		10%FA+ 2%L	10%FA+ 4%L	10%FA+ 6%L	10%FA+ 2%L	10%FA+ 4%L	10%FA+ 6%L
WL (%)	72.10	60.00	58.30	55.20	59.50	56.80	54.20
WP (%)	31.70	47.00	47.70	49.30	48.30	51.70	52.80
IP (%)	40.40	13.00	10.60	5.90	11.20	5.10	1.40

2.2.9 Effet de la combinaison chaux/laitier

Celik and Nalbantoglu (2013) ont constaté que l'indice de plasticité d'un sol argileux traité avec la combinaison de 5% de chaux et 6% de laitier (*GGBS*) diminue de 32% jusqu'à 5, 7.5 et 10% en présence de 2000, 5000 et 10000 ppm du sulfate de sodium, respectivement. De plus, le traitement combiné chaux/laitier en présence d'un sulfate de sodium améliore significativement la plasticité des sols fins mieux que l'utilisation de la chaux seule à savoir que pour les deux types de traitement, l'indice de plasticité augmente avec l'augmentation de la concentration en sulfate de sodium (Fig. 2.5).

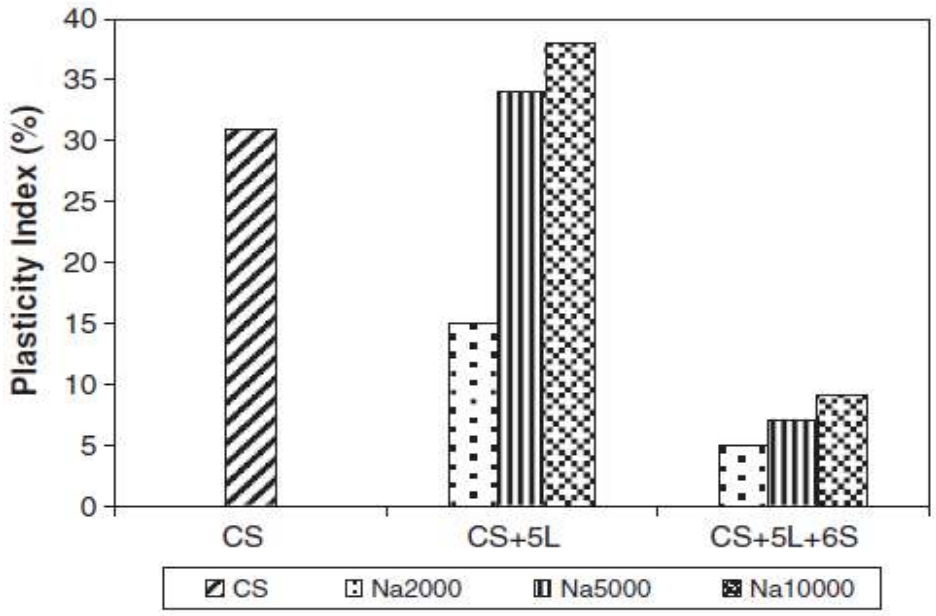


Fig. 2.5 — Effet de différentes teneurs du sulfate de sodium sur l'indice de plasticité d'un sol argileux fin traité à 5% de chaux seule et en combinaison avec 6% de laitier, (Celik and Nalbantoglu, 2013).

2.3 Effet des ajouts cimentaires sur les caractéristiques du compactage

2.3.1 Effet de la chaux

En absence des sulfates, les caractéristiques de compactage contrôlent le comportement mécanique des sols tels que la perméabilité, la rigidité, la résistance, le tassement et la stabilité vis-à-vis du gonflement. Généralement, la densité obtenue après compactage dépend de la teneur en eau du sol. En effet, la densité sèche augmente avec la teneur en eau jusqu'à un optimum, puis elle décroit avec l'augmentation de la teneur en eau. Sur le chantier, il est important de connaitre cet optimum pour obtenir des sols suffisamment denses. D'après Attoh-Okine (1995), l'addition de la chaux comme additif dans un traitement d'une laterite (riche en kaolinite, en oxyde de fer et d'aluminium) fait augmenter sa teneur en eau optimale et réduire sa densité sèche maximale. Les mêmes résultats ont été obtenus par plusieurs chercheurs (Ola, 1977; Rahman, 1986; George et al., 1992; Indraratna, 1996; Kinuthia et al.,1999; Gay and Schad, 2000; Kavak and Akyarli, 2007; Hossain et al., 2007; Manasseh and Olufmi, 2008; Ghobadi et al., 2014; Asgari et al., 2015; Jha and Sivapullaiah, 2015). D'une part, Les modifications apportées par l'utilisation de la chaux sont dues à la formation immédiate des produits de cimentation (Yong and Ouhadi, 2007). D'autre part, Harichane et al. (2011c) ont indiqué que les modifications apportées sur les paramètres de compactage des sols argileux stabilisés par l'utilisation de la chaux peuvent être expliquées par:

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

En présence des sulfates, 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. La Figure 2.6 indique que les sulfates divalents

présentent une variation cadencée alors que les monovalents ont une variation perturbée. Le même comportement a été observé par Sivapullaiah and Jha (2014).

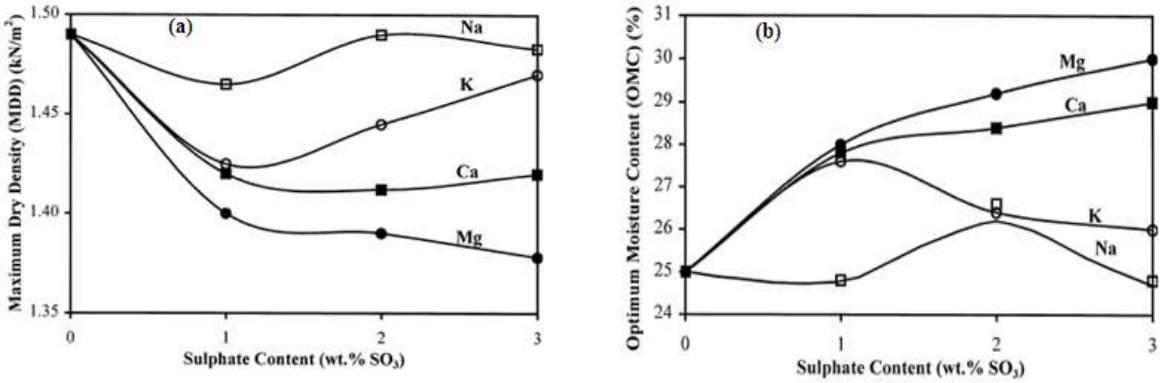


Fig. 2.6 — Effet des sulfates monovalents et divalents sur les paramètres de compactage d'une kaolinite traité à 6% de chaux, (a): la densité sèche maximale, (b): la teneur en eau optimale, (Kinuthia et al., 1999).

2.3.2 Effet du ciment

Gay and Schad (2000) ont montré que l'addition du ciment dans un sol argileux de forte plasticité augmente la teneur en eau optimale et réduit la densité sèche maximale. Un comportement similaire a été observé par Asgari et al. (2015). Selon Okagbue and Ochulor (2007), l'addition de 0, 2, 6 et 10% de ciment au sol induit une augmentation de la densité sèche maximale et une réduction considérable de la teneur en eau optimale (Fig. 2.7). L'augmentation de la densité sèche peut être attribuée par la nature du sol étudié «sol graveleux bien gradué», la présence des composants du gravier et l'indice de vide élevé permet un compactage plus efficace. L'addition du ciment améliore et modifie les caractéristiques du sol, menant encore à un compactage performant avec une augmentation de la densité sèche.

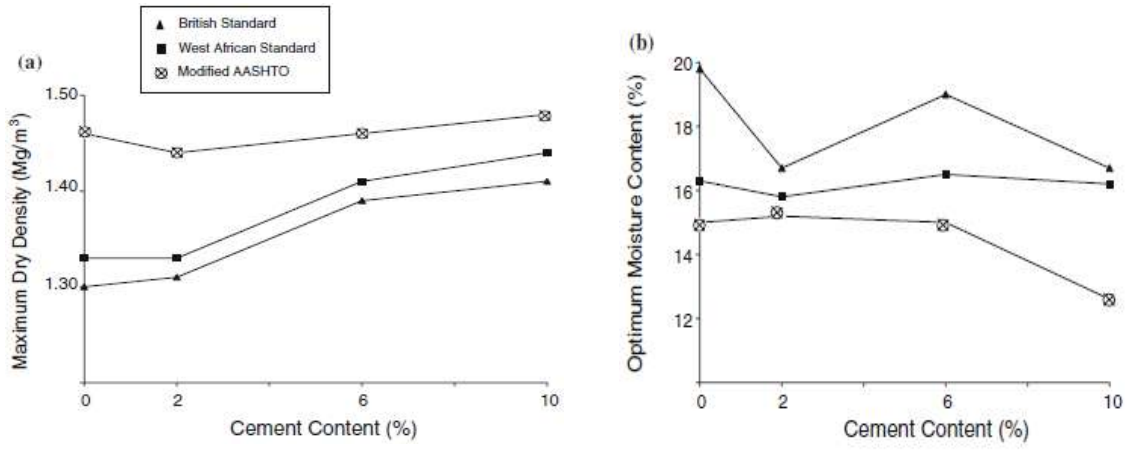


Fig. 2.7 — Variation des caractéristiques de compactages en fonction de la teneur du ciment additionnée, (a): densité sèche maximale, (b):teneur en eau optimale, (Okagbue and Ochulor, 2007).

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

2.3.3 Effet des cendres volantes

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^3 pour 24% de CV et elle reste presque constante pour une même teneur en FA (Fig. 2.8).

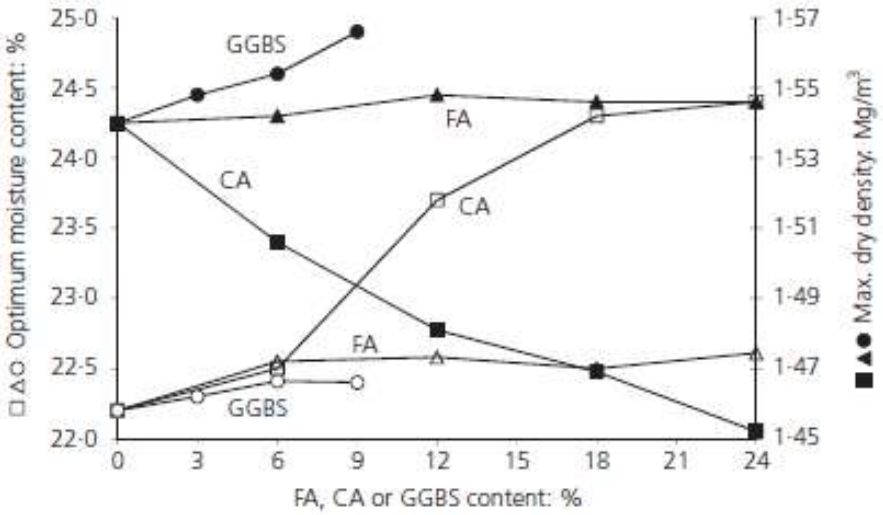


Fig. 2.8 — Variation des caractéristiques de compactage d'une argile traitée avec différents pourcentages de cendres volantes et de GGBS, (McCarthy et al., 2012).

2.3.4 Effet de la combinaison ciment/cendres volantes

Kolias et al. (2005) ont étudié l'effet de 5, 10 et 20% des cendres volantes de type C combinée avec 2 et 4% de ciment sur trois sols argileux. Ils ont constaté que la densité sèche maximale diminue et la teneur en eau optimale augmente avec l'augmentation du dosage en cendres volantes. Ces résultats sont en concordance avec ceux obtenus par Basha et al. (2003). De plus, Bell (1993) a démontré que l'influence de la combinaison ciment/cendres volantes sur le comportement mécanique de trois types d'argiles à savoir: la kaolinite, la montmorillonite et le quartz est presque le même malgré la grande différence qui existe entre ces trois espèces d'argiles. En général, Il s'agit d'une diminution de leur densité sèche maximale et une augmentation de leur teneur en eau optimale.

2.3.5 Effet du de la combinaison ciment/phospho-gypse

Selon Degirmenci et al. (2007) si une fois le ciment et le phospho-gypse sont combinés pour traiter un sol mou, les caractéristiques de compactage de ce sol seront influencées positivement. A savoir, une augmentation de la densité sèche et une diminution de la teneur en eau ont été constatées. Cette augmentation de la densité sèche est généralement acceptée comme un indicateur d'amélioration de la portance du sol.

2.3.6 Effet de la combinaison chaux/pouzzolane naturelle

Harichane et al. (2011a) ont étudié l'effet de la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur les caractéristiques de compactage de deux sols mous argileux. Les résultats obtenus ont montré que la combinaison pouzzolane naturelle-chaux a fait augmenter la densité sèche maximale du sol gris argileux et a diminué celle du sol rouge argileux. La même combinaison a diminué la teneur en eau optimale du sol gris argileux et a augmenté celle du sol rouge argileux. Le comportement qui semble très différent entre ces deux sols peut être lié à l'une des raisons suivantes:

- la chaux 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 densité spécifique de la chaux est généralement plus faible que celle des sols naturels testés ;
- les réactions pouzzolaniques entre les particules d'argile et 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.

2.3.7 Effet de la combinaison chaux/cendres volantes

Sivapullaiah and Jha (2014) ont étudié l'effet de plusieurs combinaison de chaux et de cendres volantes sur les caractéristiques de compactage d'une argile très plastique et fortement gonflante en présence de 1% de gypse (Tableau 2.5). Les résultats obtenus ont montré que la γ_{dmax} diminue avec l'augmentation de la W_{OPN} après l'addition de différents dosages en chaux dans les mélanges de sol-cendres volantes. Cependant, la tendance de la γ_{dmax} à la diminution est notifiée marginale au delà de 4% de chaux. Ceci est dû à la floculation des particules d'argile en résistant à l'effet de l'effort de compactage. La réduction progressive de la γ_{dmax} avec l'augmentation de la teneur en chaux reflète l'amélioration de la floculation et la cimentation des particules. Ainsi, la tendance de la W_{OPN} à l'augmentation peut être la cause de l'amélioration de la capacité de rétention d'eau dans les flocs, qui peut accueillir des molécules d'eau. Des observations similaires ont été signalées par plusieurs chercheurs (Bell, 1996; George et al., 1992; Kumar et al., 2007).

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).

Teneurs en eau	**Argile non traitée**	**Argile traitée avec des combinaisons de Chaux/CV sans**			**Argile traitée avec des combinaisons de Chaux/CV avec**		
		10%FA+ 2%L	10%FA+ 4%L	10%FA+ 6%L	10%FA+ 2%L	10%FA+ 4%L	10%FA+ 6%L
W_{OPN} (%)	32.50	31.80	35.20	34.00	34.00	36.00	37.00
γ_{dmax} (KN/m^3)	13.40	13.40	12.83	12.80	13.05	12.80	12.48

D'ailleurs, plus de réduction de la γ_{dmax} et plus d'augmentation de W_{OPN} sont observés avec l'addition seulement de 1% de gypse dans les mélanges de chaux-sol- cendres volantes. Cela peut être dû à une meilleure liaison des particules en présence du gypse. Cependant, l'augmentation de la W_{OPN} peut être attribuée à une plus grande capacité de rétention d'eau dans les flocs et l'exigence de l'eau supplémentaire pour l'hydratation du gypse avec des mélanges de chaux-sol-cendres volantes. McCarthy et al. (2012) ont rapporté le même comportement pour un sol riche en sulfate et stabilisé par l'addition de la chaux et des cendres volantes.

2.4 Effet des ajouts cimentaires sur la résistance à la compression non confinée

2.4.1 Effet de la chaux

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 à 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 2.6).

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).

Dosage en chaux (%)	**Résistance à la compression non confinée (MPa, ± 0.1MPa)**	
	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) ont indiqué que la stabilisation d'une bentonite naturelle très plastique (montmorillonite-Na est le constituant principal) avec l'addition du gypse comme additif présente un effet positif sur la résistance à la compression non confinée. Ils ont trouvé que la résistance augmente de 58 à 77.5 KPa pour 5% de gypse puis elle se stabilise presque à 80 KPa pour 7.5 et 10% de gypse.

Aldaood 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 plastic fait augmenter considérablement sa résistance à la compression non confinée avec l'augmentation de la température et de la période de cure (Fig. 2.9). 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).

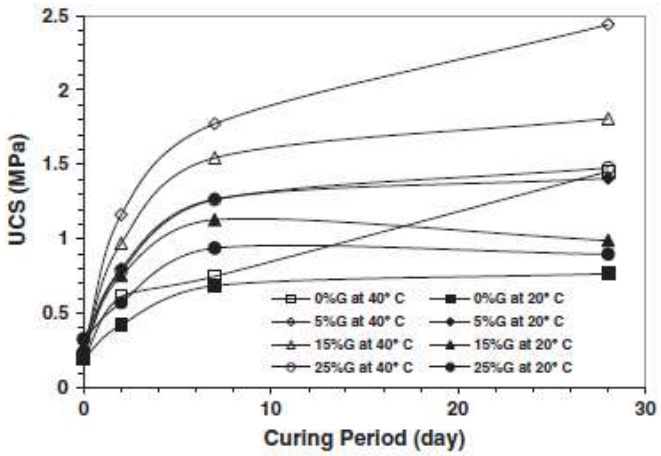


Fig. 2.9 — Effet apporté par l'utilisation de gypse comme additif sur la résistance à la compression non confinée d'un sol peu plastique traité à la chaux, (Aldaood et al., 2014a).

2.4.2 Effet du ciment

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 (Fig. 2.10).

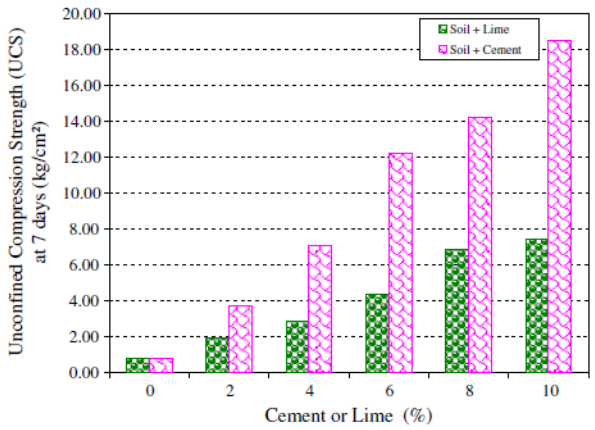


Fig. 2.10 — Effet de l'utilisation du ciment (CEM II) et de la chaux comme additifs sur la résistance à la compression non confinée d'un sol argileux peu plastique, (Ouhadi et al., 2014).

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 (Fig. 2.11).

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).

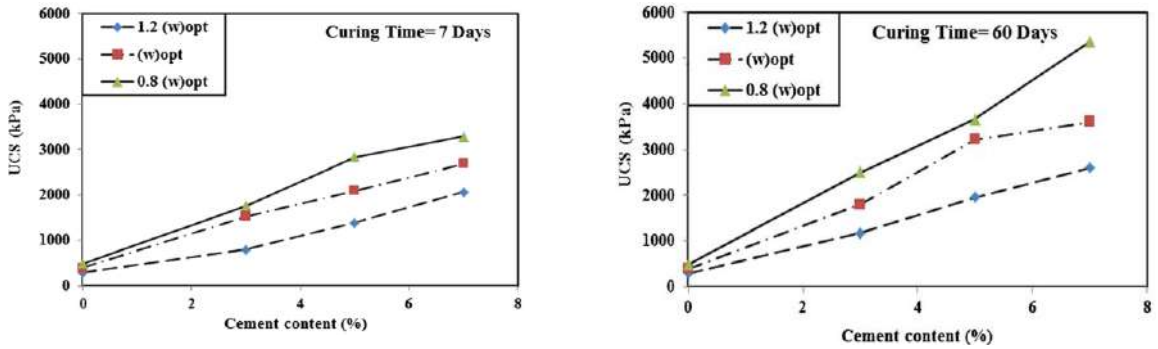


Fig. 2.11 — Effet de l'utilisation du ciment sur la résistance à la compression non confinée d'un sol peu plastique préparé à différentes teneur en eau après 7 et 60 jours de cure, (Asgari et al., 2015).

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 (Fig. 2.12). 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.

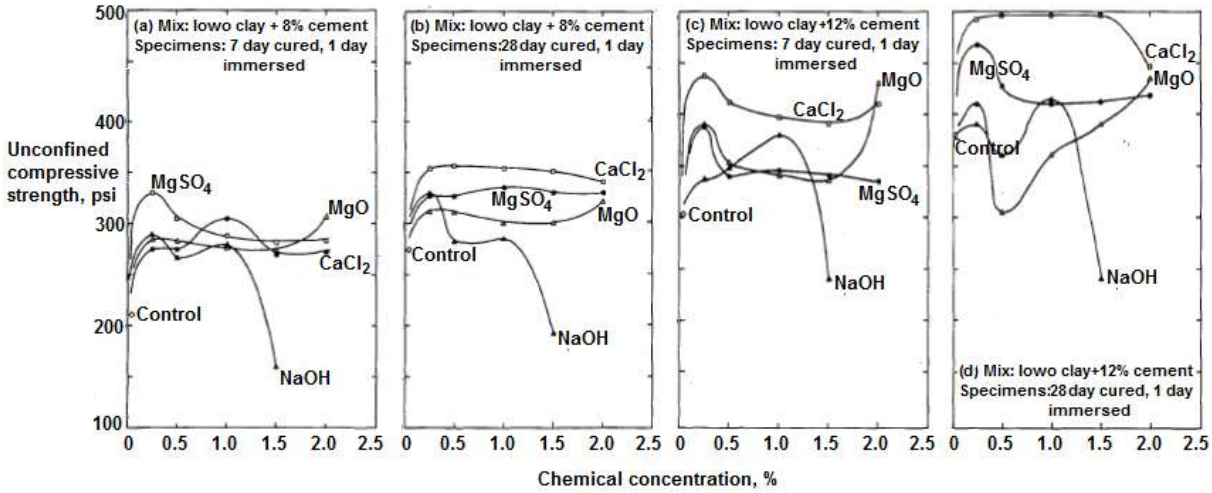


Fig. 2.12 — Effet de certains types de composés chimiques sur la résistance à la compression non confinée de l'argile d'Iowa après 7 et 28 jours de cure, (Laguros, 1962).

2.4.3 Effet des cendres volantes

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 (Fig. 2.13).

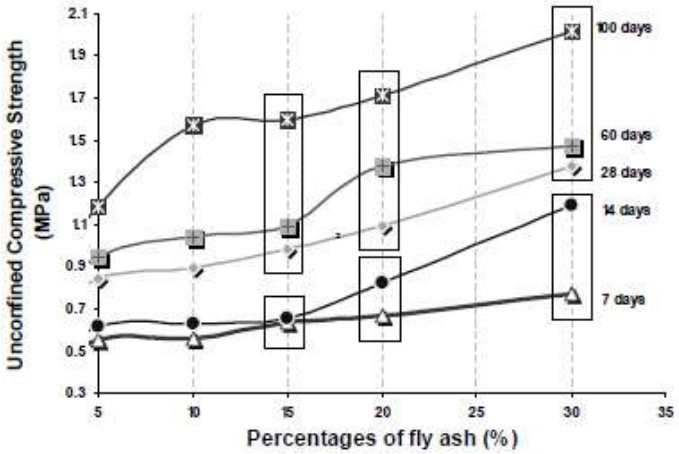


Fig. 2.13 — Effet de différents pourcentages de cendres volantes sur la résistance à la compression non confinée d'un sédiment marin après différentes périodes de cure, (Silitonga et al., 2011).

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 mettre 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 de la combinaison chaux/pouzzolane naturelle

Harichane et al. (2011a) ont étudié l'effet de la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur la résistance de deux sols mous argileux (Fig. 2.14).

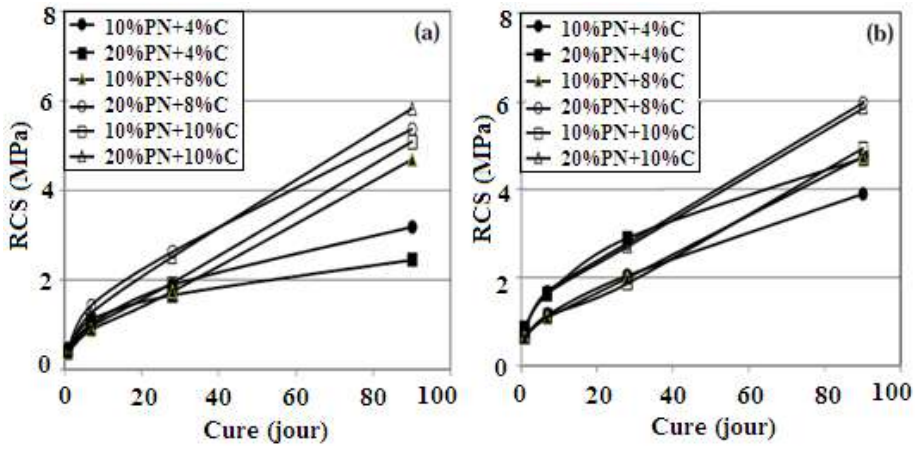


Fig. 2.14 — Effet de la combinaison chaux-pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression simple, (a): sol argileux gris et (b): sols argileux rouge, (Harichane et al., 2011a).

Les résultats obtenus ont montré que les résistances ont été améliorées considérablement pour les deux sols argileux traités, la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la période de cure et de la teneur en ajouts additionnés. Cette augmentation de la résistance à la compression 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.

2.4.5 Effet de la combinaison ciment/cendres volantes

Hossain et al. (2007) ont constaté que la résistance à la compression simple de deux sols argileux augmente avec l'augmentation du dosage en cendres volcaniques et l'âge de cure. La combinaison "ciment- cendres volcaniques" produit plus de résistance que la combinaison "chaux- cendres volcaniques". Ils ont indiqué aussi que le type du sol a une grande influence sur les propriétés mécaniques.

Kolias et al. (2005) ont étudié l'effet des cendres volantes (5, 10 et 20%) combinées avec du ciment (2-4%) sur trois sols argileux. Ils ont démontré que leur résistance à la compression simple après traitement a été considérablement améliorée (Fig. 2.15). Plus le rapport « ciment-cendres volantes » augmente, plus la résistance augmente.

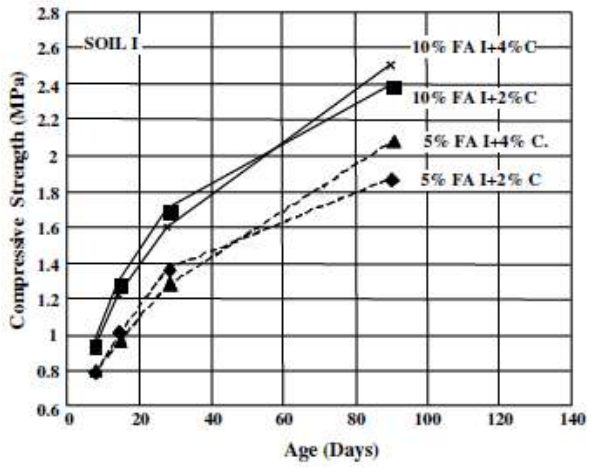


Fig. 2.15 — Effet de différentes combinaisons des ajouts minéraux sur la résistance à la compression simple d'un sol, (Kolias et al., 2005).

2.4.6 Effet de la combinaison chaux/ciment et chaux/laitier

La Figure 2.16 représente la résistance à la compression simple en fonction du temps d'un sol amélioré avec différentes combinaisons d'ajouts minéraux en absence des sulfates. Le traitement seul à 7% de ciment a donné la résistance la plus faible. En effet, le sol traité avec les combinaisons «chaux/laitier», «chaux/cendres volantes» et «chaux/ciment» ont présenté des résistances plus fortes. L'augmentation de résistance à la compression simple d'un sol traité va aussi dépendre du type de liant hydraulique utilisé (Fontaine, 1984).

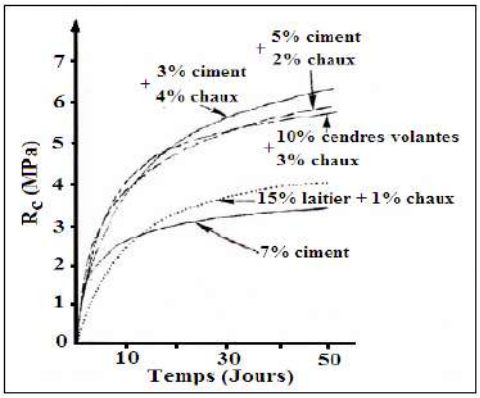


Fig. 2.16 — Effet de différentes combinaisons des ajouts minéraux sur la résistance à la compression simple d'un sol, (Fontaine, 1984).

En présence des sulfates, Le Borgne (2010) a étudié l'effet de la combinaison de 1.5% de chaux avec 6% de ciment (CEM I ou CEM II) en présence d'un sulfate incorporé sous forme de gypse sur la résistance à la compression simple d'un sol limoneux (Fig. 2.17). En absence du gypse, le CEM I améliore la résistance à la compression plus que le CEM II. Si le sulfate est présent, les deux types de traitement influent d'une manière différente l'un par rapport à l'autre. Le traitement chaux-CEM I, en présence d'une faible ou d'une forte concentration du sulfate augmente faiblement la résistance à la compression simple. Tandis que, si on remplace le CEM I par le CEM II pour le même traitement, la résistance à la compression diminue. Donc, l'effet sur le traitement d'un sol dépend non seulement de la concentration en sulfate mais aussi du type du liant. Ces résultats s'accordent avec ceux qui ont été obtenus par Cuisinier et al., (2011).

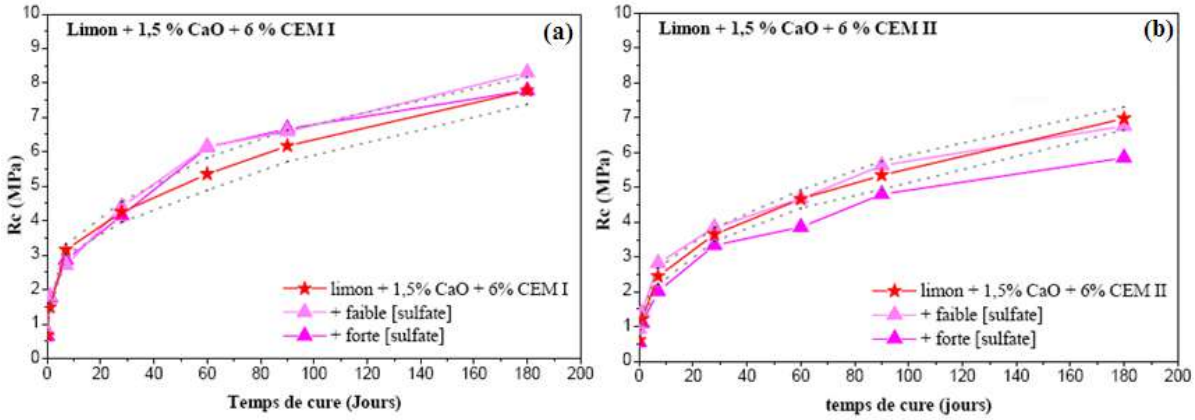


Fig. 2.17 — Effet du sulfate et du type du liant sur la résistance à la compression simple d'un sol limoneux traité par combinaison chaux-ciment, (Le Borgne, 2010).

D'ailleurs, Wild et al. (1998) ont fait traiter une kaolinite par la substitution progressive de la chaux éteinte par le laitier (GGBS) en présence du sulfate SO_3 (1, 2 et 3%) à différentes périodes de cures. Les résultats obtenus ont montré qu'en absence de sulfate, la résistance à la

compression simple augmente faiblement avec la substitution partielle de la chaux par le laitier jusqu'à un optimum de 2000 KN/m^2 qui correspond au rapport « 5%GGBS/1%chaux». Alors qu'en présence de sulfate, la résistance à la compression simple augmente fortement dès que la substitution partielle de la chaux par le laitier jusqu'à le même optimum quelle que soit la concentration en sulfate. Si la chaux est entièrement absente, le traitement n'aura pas de sens car, la résistance à la compression devient 4 fois plus petite que celle d'une kaolinite non traitée malgré la présence du sulfate. La période de cure joue un rôle très important dans l'amélioration des performances mécaniques.

2.4.7 Effet de la combinaison chaux/cendres volantes

Le tableau 2.7 présente l'effet apporté par l'addition de 10% de cendres volantes mélangé avec six combinaisons de chaux-sol sur la résistance à la compression non confinée d'une argile très plastique et fortement gonflante en présence de 1% de gypse (Sivapullaiah and Jha, 2014). Ils ont constaté qu'avec 2 et 4% de chaux dans le mélange de sol-cendres volantes, l'augmentation de la RCS ne se prononce pas, même après 28 jours de cure. Ceci montre que la teneur en silice réactive des cendres volantes est non significative. Cependant, l'augmentation significative de la résistance est observée avec l'addition de 6% de la chaux au mélange sol-cendres volantes. Des comportements similaires de variation de la RCS se présentent juste après l'addition du gypse aux mélanges de sol-cendres volantes jusqu'à 4% de chaux. Cependant, la résistance des mélanges en présence du gypse est légèrement considérable que son absence. Cela peut être dû à la disponibilité du calcium supplémentaire venant du gypse additionné en produisant une grande quantité de composés pouzzolaniques par dissolution de la silice du sol dans un pH plus élevé.

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).

Propriété étudié	Combinaison	Période de cure (jours)				
		0	7	14	28	90
Résistance à la compression (KPa)	10%FA+2%L+0%Gypse	352.75	260.50	415.09	482.50	-
	10%FA+4%L+0%Gypse	274.85	387.50	423.69	352.50	-
	10%FA+6%L+0%Gypse	270.00	549.00	684.15	1091.18	1981.70
	10%FA+2%L+1%Gypse	280.00	224.00	290.00	329.00	-
	10%FA+4%L+1%Gypse	317.50	380.00	496.50	495.00	-
	10%FA+6%L+1%Gypse	309.12	721.00	1055.00	1017.23	1928.63

D'ailleurs, il est à constater que la RCS obtenue à 7 et 14 jours de cure avec du gypse est plus grande et presque égale à la RCS obtenue à 14 et 28 jours de cure sans présence du gypse, respectivement. Il est maintenant clair que le gypse accélère la résistance initiale des

mélanges. Cela peut être attribué à la formation d'ettringite dans les vides de la matrice du sol à un pH plus élevé et, par conséquent, la formation de cristaux de structure étendue à l'intérieur de la matrice du sol (Little et al., 2009). Il est à noter que pour 90 jours de cure, la RCS du mélange de 10%CV+6%Chaux+sol avec ou sans gypse est presque deux fois plus grande que celle du même mélange après 28 jours de cure.

2.5 Effet des ajouts cimentaires sur la résistance au cisaillement

2.5.1 Effet de la chaux

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

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

D'ailleurs, Sivapullaiah et al. (2000, 2006) ont observé que la nature minéralogique du sol traité fait influencer d'une façon significative sur les paramètres de cisaillement. En effet, l'effet apporté par l'utilisation de 6% de chaux comme additif sur les angles de frottement interne effectifs (φ') et les cohésions effectives (C') de deux sols argileux, à savoir une montmorillonite très plastique (IP=47.5%) et une kaolinite peu plastique (IP=22%) était fortement différent. Il s'est avéré que la période de cure joue également un rôle très important dans l'évolution des paramètres de cisaillement (Tableau 2.8).

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.

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

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

En présence des sulfates, une variation remarquable des paramètres de cisaillement d'une montmorillonite traité à 6% de chaux en fonction de la concentration en sulfate monovalent (Na_2SO_4) et divalent ($CaSO_4$) a été reporté par Sivapullaiah et al. (2000) (Tableau 2.9). Cette variation dépend non seulement de la concentration des sulfates utilisés mais aussi de la période de cure et du type des cations (Na^+ ou Ca^{2+}) associés à l'anion SO_4^{-2}. Au jeune âge, l'angle de frottement interne effectif diminue avec l'augmentation de la concentration en sulfate monovalent ou divalent, mais avec la présence de 1% de $CaSO_4$, l'angle de frottement interne devient plus grand par rapport à celui du sol traité sans $CaSO_4$.

Tableau 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).

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_2SO_4)	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 ($CaSO_4$)	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
	3		47	42	35

Cependant, après 7 jours de cure, la cohésion effective du sol traité initialement diminue en présence d'une faible concentration en sulfate monovalent (1%), puis elle augmente pour des fortes concentrations. Par contre, pour la même période de cure, l'effet apporté sur la cohésion a été inversé pour le cas d'un traitement en présence d'un sulfate divalent. Tandis que la variation des paramètres de cisaillement à très long terme n'est pas claire du fait qu'il y ait

une variation fortement perturbée avec la variation de la concentration des deux sulfates utilisés. D'après ces résultats, il s'avère que le sulfate monovalent généralement se comporte contrairement au sulfate divalent 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 $CaSO_4$, respectivement. Cependant, après la même période de cure, la résistance au cisaillement du même type de sol diminue considérablement jusqu'à 400 et 100 KPa en présence de 0.5 et 1% de Na_2SO_4, respectivement. Ces résultats indiquent que l'altération de la résistance au cisaillement est très importante avec le sulfate de sodium que le sulfate de calcium où la résistance s'est altérée très tôt (à 2% de déformation) avec la présence d'une faible concentration en sulfate de sodium que sulfate de calcium. En général, la dégradation des performances mécaniques (résistance) dépend non seulement de la concentration en sulfate utilisé mais aussi du type de cations associés à l'anion SO_4^{-2} (Fig. 2.18).

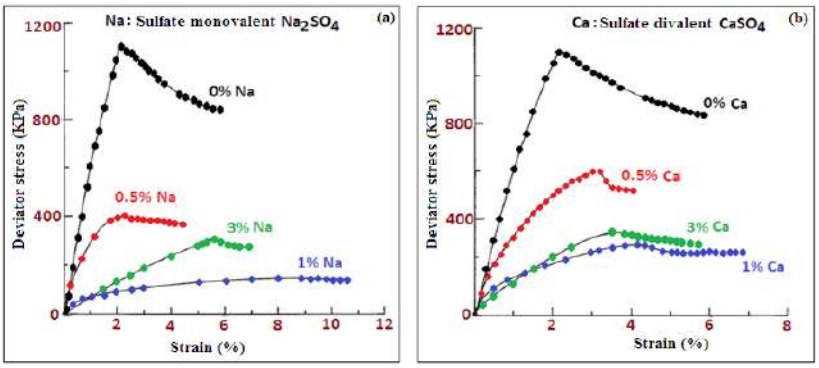


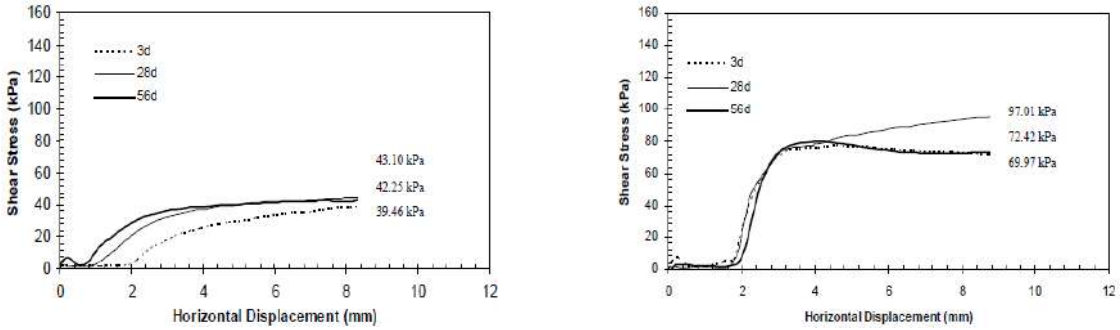
Fig. 2.18 — Effet des sulfates sur la résistance au cisaillement d'une montmorillonite traitée avec 6% de chaux après une année de cure (pression de confinement: PC = 100 KPa), (Sivapullaiah et al., 2000).

2.5.2 Effet du ciment

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 2.19 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 différentes teneurs de ciment ont été améliorées d'une façon considérable particulièrement avec la cure. Pour 8% de ciment et après 28jours 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.



(a) (b)

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).

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 $CaSO_4$, 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 2.10). 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 $CaSO_4$ et par conséquent l'augmentation de la compacité et donc sa cohésion.

Tableau 2.10 — Effet de 2% de CaSO4 sur les paramètres de cisaillement d'un sol limoneux traité avec 12% de ciment portland, (Laguros, 1962).

Désignation	Cohésion (KPa) après 7 jours	Angle de frottement interne (°) après 7 jours
Limon d'Iowa non traité	10	15
Limon d'Iowa + 12% de ciment	20	37
Limon d'Iowa + 12% de ciment + 2% de $CaSO_4$	60	33

2.5.3 Effet des cendres volantes

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 2.11).

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

Sample N°	% Fly ash	Cohesion (Kg/cm^2)			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'	-

2.5.4 Effet de la combinaison chaux/cendres de calcaire

Okagbue and Yakubu (2000) ont étudié l'effet des cendres de calcaire «*Limestone Ash*» comme un substituant de la chaux pour l'amélioration des caractéristique de cisaillement d'un sol. Les résultats obtenus ont montré que l'angle de frottement interne diminue et la cohésion augmente avec le dosage en cendres de calcaire (Fig. 2.20). Ces deux propriétés sont responsables de l'amélioration de la résistance au cisaillement des sols améliorés.

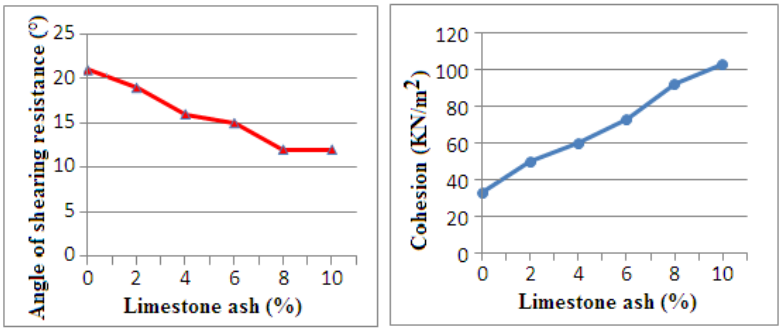


Fig. 2.20 — Effet des cendres de calcaire sur les paramètres de cisaillement, (Okagbue and Yakubu, 2000).

2.5.5 Effet de la combinaison chaux/cendres volantes

D'ailleurs, Sezer et al. (2000) ont rapporté que la combinaison des cendres volantes et de la chaux avec une teneur élevée fait augmenter l'angle de frottement interne du sol traité du fait

que les cendres volantes ont un angle de frottement interne bien plus élevé que celui du sol. En outre, la floculation des particules augmente la valeur de l'angle de frottement interne, alors que la cimentation des particules fait augmenter la valeur de la cohésion.

2.5.6 Effet de la combinaison chaux/cendres de vase calcinée

Lin et al. (2007) ont effectué une étude pour mettre en évidence l'effet du traitement combiné de la chaux et de la cendre de vase calcinée d'un sol sur la résistance au cisaillement à différentes périodes de cure.

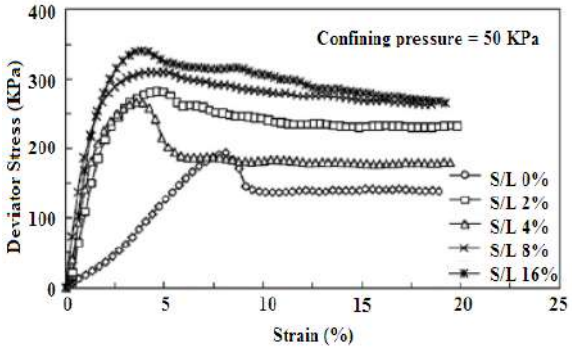


Fig. 2.21 — Effet de la combinaison de chaux-cendres de vase calcinée sur la résistance au cisaillement d'un sol, (Lin et al., 2007).

Ils ont constaté que le pic de la résistance au cisaillement augmente avec le dosage combiné en « chaux-cendres de vase calcinée ». Cette amélioration est attribuée à l'augmentation de la cohésion du sol par l'intervention des réactions pouzzolanique qui donnent lieu à la formation des composés cimentaires (Fig. 2.21).

2.6 Effet des ajouts cimentaires sur la compressibilité

2.6.1 Effet de la chaux

En absence des sulfates, Ouhadi et al. (2014) ont étudié l'effet de l'addition de différentes teneurs en chaux (0, 2, 4, 6, 8 et 10%) sur les caractéristiques de compressibilité d'un sol argileux peu plastique (Fig. 2.22). Les résultats obtenus montrent que l'addition de 2% de chaux fait réduire l'indice de compression de l'ordre de 40%. De plus, l'indice de compression continue à diminuer jusqu'à 88% en présence de 6% de chaux. La réduction considérable de ce paramètre est attribuée aux réactions pouzzolaniques développées par l'interaction de la chaux avec les particules argileuses du sol traité tout en produisant de nouveaux composés cimentaires (CSH et CAH) résistants aux charges extérieures. En outre, la pression de préconsolidation augmente significativement avec l'augmentation de la quantité de chaux utilisée.

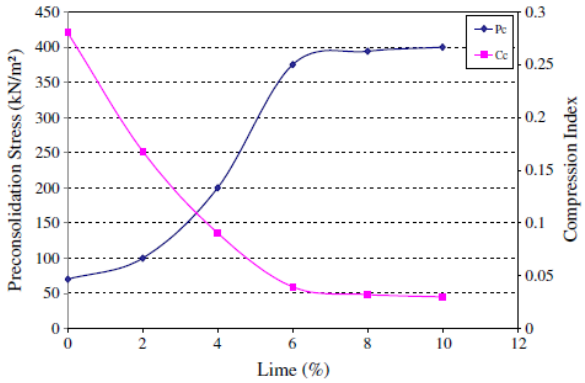


Fig. 2.22 — Effet de différentes teneur en chaux sur l'indice de compression et la pression de préconsolidation d'un sol argileux peu plastique, (Ouhadi et al., 2014).

Nalbantoglu and Tuncer (2001) ont étudié l'effet de différentes teneur en chaux (0 à 7 %) sur les caractéristiques de compressibilité d'un sol argileux gonflant de Chypre. Les résultats ont indiqué une augmentation de la contrainte verticale effective et une diminution des caractéristiques de compressibilité des sols traités avec l'augmentation de la teneur en chaux. Un comportement similaire a été observé par Indraratna (1996) où il a observé que l'indice des vides diminue avec l'augmentation du dosage en chaux. Ce changement est attribué à l'agrégation et la cimentation des particules des sols provoqués par l'action de chaux. D'après Rao and Shivananda (2005), l'indice de compression d'un sol argileux très plastique (I_P=46%) diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux utilisée. Un comportement similaire a été observé par Jha and Sivapullaiah (2015) où ils ont constaté que l'indice de compression diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux utilisée et de la période de cure.

Si les sulfates sont présents et pour une cure de 60 jours, la Figure 2.23 montre que l'indice de compression d'une argile marine traitée à la chaux en présence de 0.2% de sulfate de calcium et 1.8% de chlorure de calcium diminue de 0.85 à 0.49 tandis que, la pression de préconsolidation augmente de 36 à 70 KN/m^2 (Rajasekaran and Narasimha Rao, 2002).

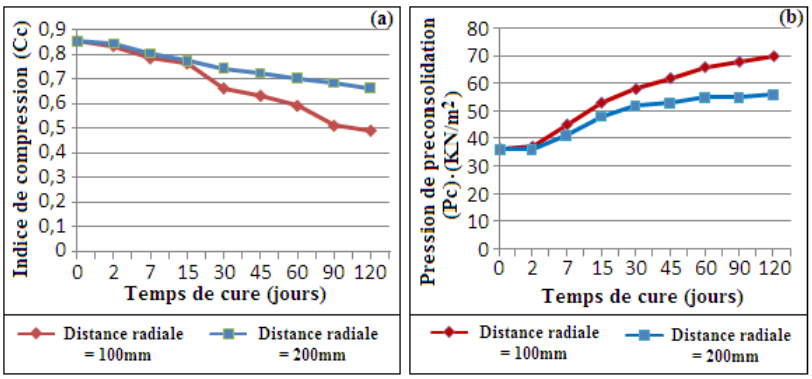


Fig. 2.23 — Effet du sulfate de calcium et du chlorure de calcium sur les paramètres de compressibilité d'une argile marine traitée à la chaux, (a): indice de compression, (b): pression de préconsolidation, (Rajasekaran and Narasimha Rao, 2002).

Un comportement similaire a été constaté par Broms (1987). L'effet bénéfique apporté par la présence du sulfate de calcium est due à la diffusion effective des ions de calcium Ca^{2+} à l'intérieur de la matrice argileuse qui viennent de remplacer les ions de sodium Na^{+}.

Rajasekaran et Narasimha Rao (2002) ont constaté que le chlorure de calcium fait augmenter la pression de préconsolidation de 36 à 82 KN/m^2 et réduire l'indice de compression de 0.85 à 0.42. Cependant, après 10 jours de cure, le sulfate de sodium ne produit qu'une faible diminution de l'indice de compression (de 0.7 à 0.8). Tandis que la pression de préconsolidation augmente de 36 à 48 KN/m^2 puis elle diminue jusqu'à 45 KN/m^2 en présence du sulfate de sodium. L'augmentation de la pression de préconsolidation est liée à la formation des phases cimentaires et également la formation d'une phase expansive (ettringite). Plusieurs travaux de recherches ont confirmé que l'ettringite peut se former dans un sol traité à la chaux en présence des sulfates (Hunter, 1988; Rollings et al., 1999; Yong and Ouhadi, 2007; Le Borgne, 2010; Aldaood et al., 2014a).

2.6.2 Effet du ciment

Ouhadi et al. (2014) ont étudié l'effet de l'addition de différentes teneurs en ciment (0-10%) sur les caractéristiques de compressibilité d'un sol argileux peu plastique (Fig. 2.24). Les résultats obtenus montrent que l'indice de compression diminue avec l'augmentation du dosage en ciment utilisé. La réduction considérable de cet indice est liée aux réactions pouzzolaniques développées par l'utilisation du ciment permettant l'émergence de nouvelles phases cimentaires (CSH et CAH) qui résistent aux charges extérieures. Cependant, la pression de préconsolidation augmente significativement avec l'augmentation de la quantité de ciment utilisée. D'ailleurs, Ho and Chan (2011) ont montré que l'indice de compression d'un sol mou limoneux diminue avec l'augmentation du dosage en ciment additionné et de la période de cure. Un comportement similaire a été observé par Eskisar (2015).

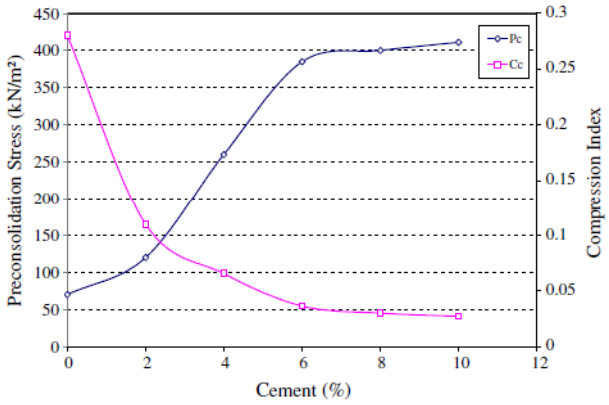


Fig. 2.24 — Effet de différentes teneurs en ciment (CEM II) sur l'indice de compression et la pression de préconsolidation d'un sol argileux peu plastique, (Ouhadi et al., 2014).

2.6.3 Effet des cendres volantes

Knapik et al. (2014) ont effectué des tests œdométriques pour étudier l'effet de 10 et 40% de cendres volantes sur la compressibilité d'une kaolinite après 0 et 7 jours de cure. Les résultats obtenus sont tracés en termes de l'indice des vides « e » et de contrainte verticale « σ'v » (Fig. 2.25). Il est noté que l'addition de cendres volantes conduit à augmenter l'indice des vides après 0 et 7 jours de cure. De plus, la compressibilité du sol traité diminue avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes. Un comportement similaire a été observé par Indraratna (1996). Ainsi, le rôle important du temps de cure peut être observé pour les mélanges de sol et de cendres volantes en quantité de 40% (Fig. 2.25b). La diminution de la compressibilité du sol traité avec la période de cure est probablement due aux effets des composés de cimentation (C-S-H et C-A-H) qui sont le résultat des réactions pouzzolaniques favorisées par un environnement fortement alcalin.

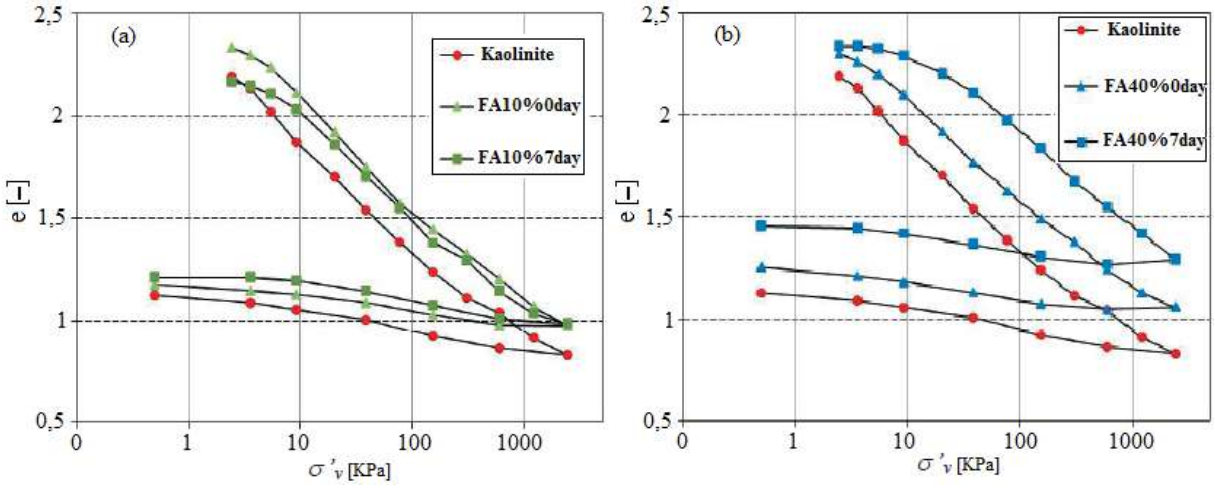


Fig. 2.25 — Effet de différentes teneurs en cendres volantes sur la compressibilité d'une kaolinite, (Knapik et al., 2014).

2.6.4 Effet du laitier de haut fourneau

Indraratna (1996) a étudié l'effet de différents pourcentages (2, 5, 7 et 10%) de laitier (contenant 42 à 46% de CaO) sur la compressibilité d'une argile peu plastique après 28 jours de cure (Fig. 2.26). Ils ont démontré que l'argile traitée devient moins compressible avec l'augmentation de la teneur en laitier additionné. L'addition du laitier broyé à l'argile naturelle fait réduire également l'indice des vides des échantillons mélangés, sauf au niveau de 10% lorsque la phase d'hydratation devient significative. Cette réduction de l'indice des vides a des conséquences désirables pour la perméabilité qui en résulte.

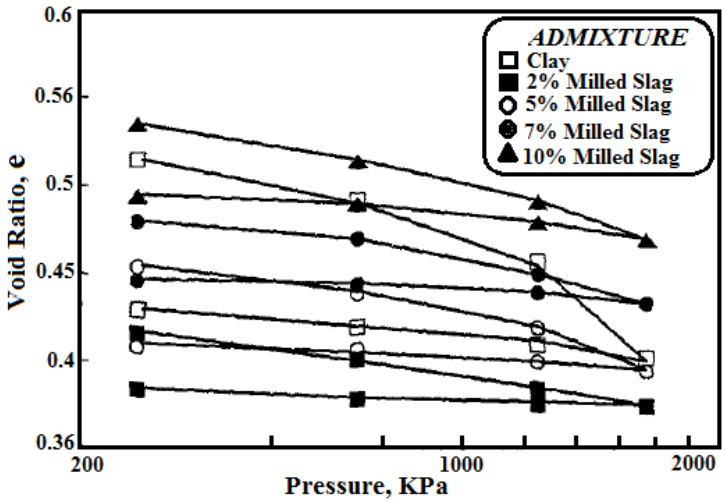


Fig. 2.26 — Effet de différents pourcentages du laitier sur la compressibilité d'une argile peu plastique après 28 jours de cure, (Indraratna, 1996).

2.6.5 Effet de la combinaison chaux/cendres volantes

Knapik et al. (2014) ont étudié l'effet apporté par la combinaison de 10% de cendres volantes et de 1% de chaux sur la compressibilité d'une kaolinite après 0 et 7 jours de cure. Les résultats obtenus sont représentés en termes de l'indice des vides « e » et de contrainte verticale « σ'v » (Fig. 2.27). Ils ont trouvé que l'addition de 10% de cendres volantes en combinaison avec 1% de chaux fait conduire à la diminution de la compressibilité du sol traité où sa réduction est considérablement importante après 7 jours de cure. Cela est probablement dû aux effets des composés cimentaires formés suite à des réactions pouzzolaniques favorisées par les ions calcium apportés par l'addition de la chaux. Un comportement similaire a été obtenu par Nalbantoglu and Tuncer (2001).

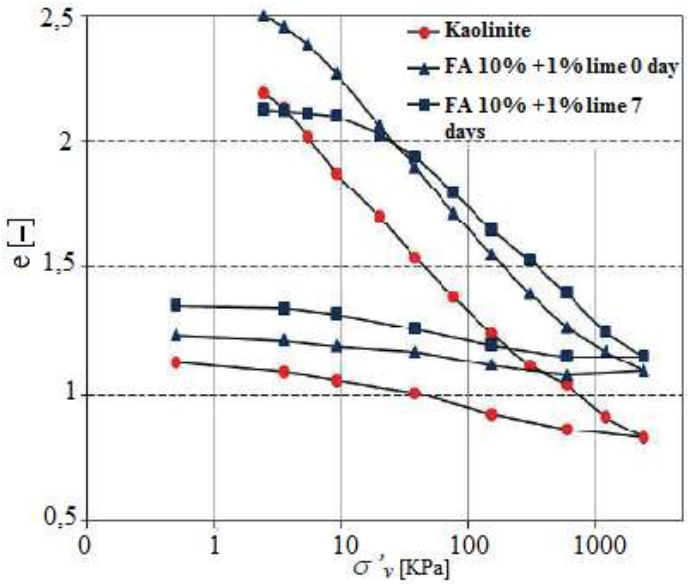


Fig. 2.27 — Effet de la combinaison de la chaux et des cendres volantes sur la compressibilité d'une kaolinite, (Knapik et al., 2014).

2.7 Effet des ajouts cimentaires sur le gonflement

2.7.1 Effet de la chaux

L'étude réalisée par Al-Mukhtar et al. (2012) sur une argile gonflante (famille des smectites) a révélé que l'addition de différents pourcentages de chaux en absence des sulfates fait diminuer considérablement sa pression de gonflement, particulièrement, à long terme (Tableau 2.12). La réduction de la pression de gonflement peut être attribuée à la cimentation des particules argileuses par la formation des hydrates cimentaires suite aux réactions pouzzolaniques qui se produisent entre le calcium apporté par la chaux et l'alumine et la silice contenant dans le sol après leur dissolution dans un pH élevé (Bell, 1996). De plus, Puppala et al. (2005) ont constaté que le gonflement d'une kaolinite traitée à la chaux diminue de 25% jusqu'à 23 et 20% en présence de 4 et 8% de chaux, respectivement. Un comportement similaire a été obtenu par Jha and Sivapullaiah (2015).

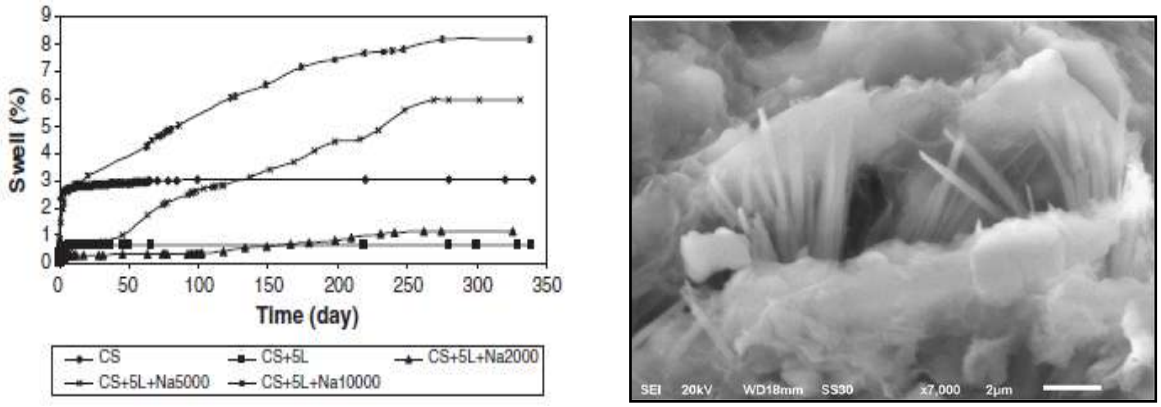
Tableau 2.12 — Effet du dosage en chaux et de la période de cure sur la pression de gonflement d'une argile de la famille des smectites, (Al-Mukhtar et al., 2012).

Dosage en chaux (%)	Pression de gonflement (KPa, ± 5KPa)	
	Après 7 jours	Après 90 jours
0%	« 150 KPa sans cure »	
1%	120	110
4%	20	10
10%	15	10

D'ailleurs, Afès and Didier (2000) ont étudié le potentiel de gonflement d'une argile traitée avec 3 et 6 % de chaux. Les résultats obtenus ont montré que le potentiel de gonflement diminue considérablement avec l'augmentation de la teneur en chaux utilisée. Généralement, l'utilisation de la chaux comme additif peut réduire considérablement, ou voire de supprimer, le gonflement des sols argileux qui ont une grande aptitude à l'expansion à savoir la famille des smectites (montmorillonite).

En présence des sulfates, Yilmaz and Civelekoglu (2009) ont trouvé que le traitement d'une bentonite par l'addition du gypse fait diminuer son gonflement de 65% jusqu'à 30 et 18% en présence de 2.5 et 10% de gypse, respectivement. Kouloughli (2007) a rapporté que l'action des contaminants (ex: métaux lourds Cu^{2+}, Pb^{2+}, Zn^{2+}, Cd, Mn, Ni) sur la composition chimique de la bentonite s'est traduite surtout par une augmentation de la teneur en Ca^{2+}. Cette augmentation, bien que très modeste, peut s'accompagner d'une dégradation des capacités de gonflement de la bentonite. Des variations dans les teneurs de Mg, SiO_2, Al_2O_3 et $CaCO_3$ sont également apparues et peuvent être associés à un processus d'échange cationique entre la bentonite et les différents contaminants. De plus, Celik and Nalbantoglu (2013) ont

trouvé que pour une faible concentration de sulfate de sodium (2000 ppm), le gonflement d'un sol argileux traité avec l'addition de 5% de chaux diminue considérablement de 3% à 1% après une cure de 340 jours. Cependant, pour des fortes concentrations et pour une même période de cure, le gonflement augmente de 3% jusqu'à 6 et 9% en présence de 5000 et 10000 ppm, respectivement (Fig. 2.28a). Le gonflement marqué dans les éprouvettes de sol stabilisées à la chaux en présence de fortes concentrations en sulfate de sodium est due à la formation d'ettringite expansive (Fig. 2.28b).



(a) (b)

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).

De plus, Harris et al. (2005) ont montré que le traitement à la chaux d'un sol diminue les gonflements volumiques (0 ppm + 6% lime). Mais si le gypse est ajouté en faible concentration avec la chaux le gonflement diminue considérablement (3K ppm + 6% lime), au contraire, si le dosage en gypse ajouté avec la chaux est important, la diminution du gonflement est très faible. Ces résultats confirment qu'un traitement à la chaux en présence d'un fort dosage en gypse empêche la diminution ou la suppression du gonflement. Alors, les échecs du traitement dépendent non seulement de la présence du gypse et sa concentration mais aussi du type du liant utilisé dans le traitement.

En général, les composés soufrés participant au phénomène de gonflement peuvent se présenter sous forme de gypse ($CaSO_4.2H_2O$) ou de pyrite (FeS_2). Les sulfates solubles ou solubilisés sont en provenance de la dissolution de ces derniers. Ces composés soufrés peuvent se former sous certaines conditions et en créant des dommages extrêmement importants sur des ouvrages en terre traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (Hunter, 1988; Ouhadi and Yong, 2008; Baryla et al., 2000). Les dommages crées peuvent être observés sous forme de fissures et des gonflements liés principalement à la formation de nouvelles phases expansives telles que l'ettringite et la thaumasite. Yong and Ouhadi (2007)

ont indiqué que la stabilisation de la marne (Palygorskite, $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2.nH_2O$) avec l'addition de la chaux est l'exemple des réactions chimiques conduisant à la formation de nouvelles phases expansives (l'ettringite et/ou la thaumasite) suivant la chaine des réactions chimiques suivantes:

- Hydratation de la chaux vive au contact de l'eau (Eq. 1):

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \quad (1)$$

- Ionisation de la chaux éteinte et l'augmentation du pH à 12.5 (Eq. 2):

$$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2(OH)^- \quad (2)$$

- Dissolution des minéraux argileux dans un pH supérieur à 10.5 (Eq. 3):

$$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O + 2(OH)^- + 10H_2O \rightarrow 2[2Al(OH)^{-4} + 4H_4SiO_4] + nH_2O \quad (3)$$

- Dissolution des sulfates dans les sols ou déjà solubles dans l'eau de nappe (Eq. 4) :

$$M_xSO_4 \cdot nH_2O \rightarrow XM^{Y+} + (SO_4)^{2-} + nH_2O \quad (4)$$

Tel que : x = 1; y = 2 ou x = 2; y = 1 (M: éléments chimiques mono et divalents).

- Formation d'ettringite (Eq. 5):

$$6Ca^{2+} + 2Al(OH)^{-4} + 4OH^- + 3(SO4)^{2-} + 26H_2O \rightarrow Ca_6Al_2(SO_4)3(OH)_{12} \cdot 26H_2O \quad (5)$$

Les minéraux d'ettringite peuvent croître tant que la température reste au dessus de 15°C. En dessous, l'ettringite se transforme en thaumasite (Eq. 6). Ce changement s'effectue par substitution de l'aluminium par du silicium, et du sulfate par du carbonate (Le Borgne, 2010).

$$Ca_6[Al(OH)_6]_2 \cdot (SO_4)_3 \cdot 26\,H_2O + 2H_2SiO_4^{2-} \text{ (Ettringite)} + 2CO_3^{2-} + O_2 \rightarrow Ca_6[Si(OH)_6]_2 \cdot (SO_4)_2 \cdot (CO_3)_2 \cdot 24H2O \text{ (Thaumasite)} + 2Al(OH)^{4-} + SO_4^{2-} + 4OH^- + 2H_2O \quad (6)$$

La formation d'ettringite ou de thaumasite va provoquer un gonflement qui peut être lié à la variation volumique globale ou de l'enveloppe qui accompagne la cristallisation de l'ettringite ou de la thaumasite. Le volume de l'enveloppe de ces derniers est plus grand que le volume de l'enveloppe des réactifs initiaux. La pression créée peut atteindre des valeurs supérieures à la résistance en traction des sols traités, à titre d'exemple 240MPa (Le Borgne, 2010).

2.7.2 Effet du ciment

Puppala et al. (2004) ont étudié l'efficacité des ciments résistants aux sulfates (types I/II et V) sur le potentiel de gonflement de quatre sols argileux très plastiques et riches en sulfates à savoir: Sol1, Sol2, Sol3 et Sol4 contenant respectivement des teneurs en sulfate soluble de 287, 1490, 5688 et 32122 ppm. Les résultats obtenus ont montré que les deux types de ciment

utilisés ont fait améliorer les propriétés physiques des sols traités en réduisant leur potentiel de gonflement libre (Fig. 2.29). En effet, pour 5% de ciment, le potentiel de gonflement est devenu nul après 90 jours de cure. De plus, Les résultats de DRX ont confirmé la diminution du potentiel de gonflement qui est attribué à trois mécanismes possibles à savoir:

- les faibles niveaux d'intensités de l'ettringite minérale observée sur les diagrammes expliquent clairement le faible gonflement des sols traités ;
- les oxydes de fer présentant dans les deux types de ciments utilisés produisent des types d'ettringite minérale de faible gonflement dans les sols traités ;
- la distribution des vides et la conductivité hydraulique des sols argileux traités diminuent avec l'utilisation de ces deux types de ciments comme additifs.

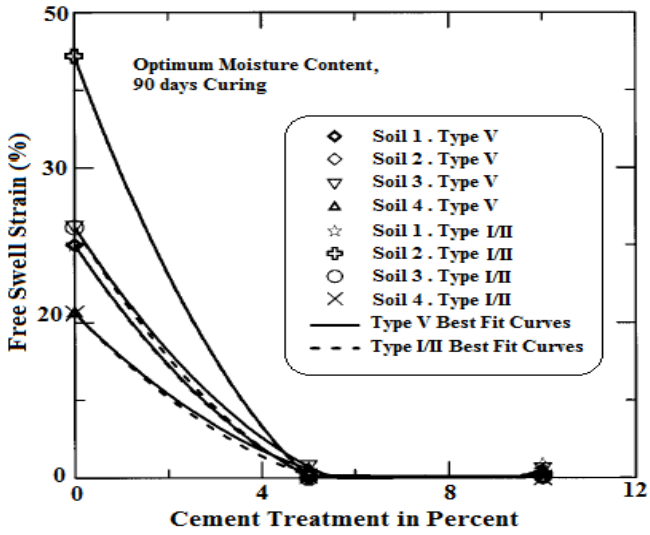


Fig. 2.29 — Effet de différents dosages en ciment sur le potentiel de gonflement de quatre sols argileux très plastiques contenant différentes teneurs en sulfate soluble après 90 jours de cure, (Puppala et al., 2004).

2.7.3 Effet de la combinaison chaux/cendres volantes

McCarthy et al. 2012 ont étudié l'influence des cendres volantes sur le gonflement de cinq différentes argiles contenant de différentes proportions de sulfate total à savoir: Weald (0.0 g), Gault (0.3 g), Kimmeridge (0,9 g), Lias (1.1 g) et Oxford (3.4 g) (Fig. 2.30). Ces argiles ont été prétraitées par l'addition de 3% de chaux vive (en masse de sol sec) pendant un jour de cure et suivi par un traitement avec l'addition de 6, 12,18 et 24% deux cendres volantes possédant des caractéristiques différentes.

Les résultats obtenus ont montré que le gonflement des argiles testées augmente avec le contenu total de sulfate dans les mélanges stabilisés et diminue avec l'augmentation du dosage en cendres volantes et de leur finesse. Cependant, la diminution du gonflement avec l'augmentation de la teneur en CA additionnée est attribué à un phénomène essentiellement

physique associé à une augmentation du volume des pores dans le système ce qui permet de recevoir des produits de sulfates hautement expansifs tout en augmentant la résistance au gonflement de la structure stabilisée.

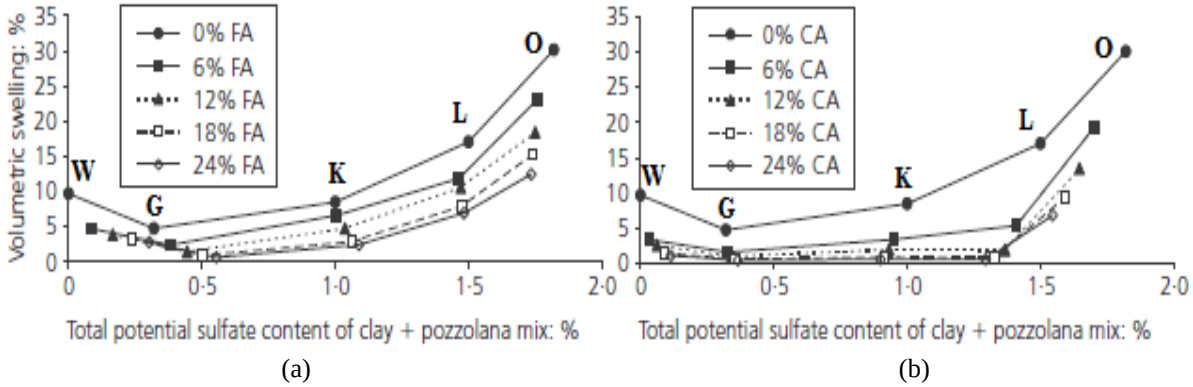


Fig. 2.30 — Gonflement des échantillons traités avec 3% de chaux (1 jour de cure) et différents pourcentages de FA (fine) et de CA (grossière) pour 3 jours de cure, suivis de 7 jours d'immersion dans l'eau à 40°C (argiles testées: Weald (W), Gault (G), Kimmeridge (K), Lias (L) et Oxford (O)), (McCarthy et al., 2012).

2.7.4 Effet de la combinaison ciment/laitier

Cokca et al. (2010) ont testé le gonflement d'un sol argileux contenant 85% de kaolinite et 15% de bentonite-Na, le sol a été traité par la combinaison laitier-ciment portland (GBFSC) pour deux périodes de cure. Les résultats obtenus ont mis en évidence l'effet positif apporté par ce type de traitement sur le gonflement de cette argile, à savoir que celui-ci est quatre fois plus petit par rapport au sol non traité. En effet, plus le rapport GBFS/C est important, plus le gonflement diminue. Le temps de cure n'a pas un effet sur le gonflement (Fig. 2.31).

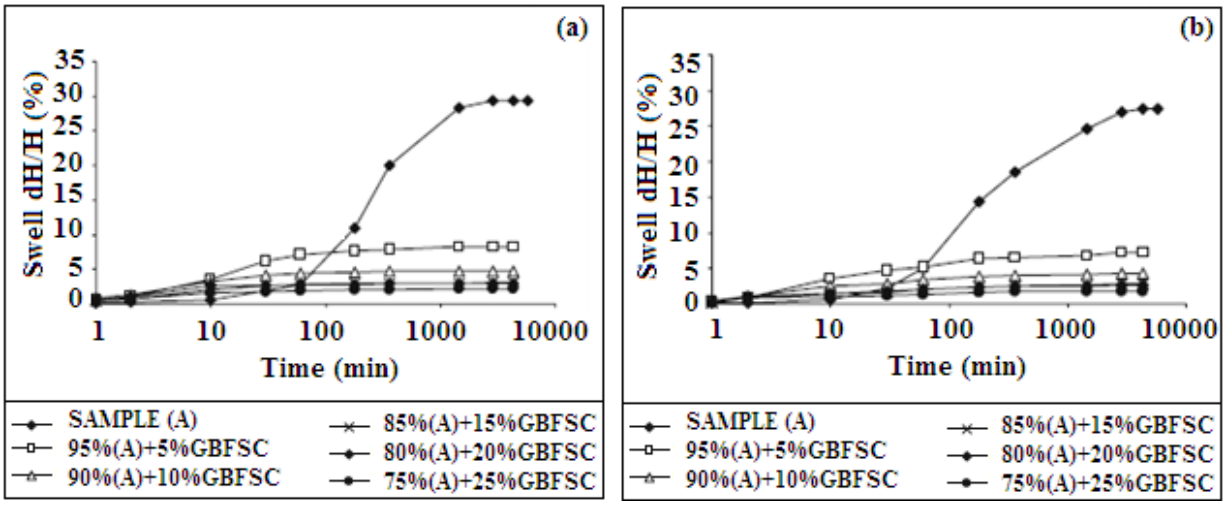


Fig. 2.31 — Effet de la combinaison du laitier-ciment portland sur le gonflement d'un sol argileux pour deux périodes de cure, (a): 7 jours, (b): 28 jours, (Cokca et al., 2010).

2.7.5 Effet de la combinaison chaux/laitier

Wild et al. (1998) ont étudié l'effet de la substitution progressive de la chaux éteinte par le laitier (GGBS) en présence du gypse (0, 2, 6 et 8%) pendant 7 jours de cure (Fig. 2.32). Les résultats obtenus ont montré que le traitement au laitier seul provoque un retrait important de la kaolinite. Alors que, la stabilisation par la combinaison de la chaux et du laitier en absence du gypse n'induit ni un gonflement ni un retrait de celui-ci. La présence du gypse dans le traitement par la combinaison chaux-laitier engendre un gonflement du sol traité, mais ce gonflement diminue avec l'augmentation progressive du rapport «laitier/chaux». Le gypse seul provoque un retrait considérable du sol traité, ce retrait augmente progressivement avec le dosage en gypse jusqu'à un optimum qui correspond à 6% de gypse, puis il décroit. Donc l'expansion de la kaolinite traitée diminue si on substitue progressivement la chaux par le laitier (GGBS) malgré l'augmentation de la quantité des sulfates. L'expansion durant la cure augmente avec l'augmentation du dosage en chaux.

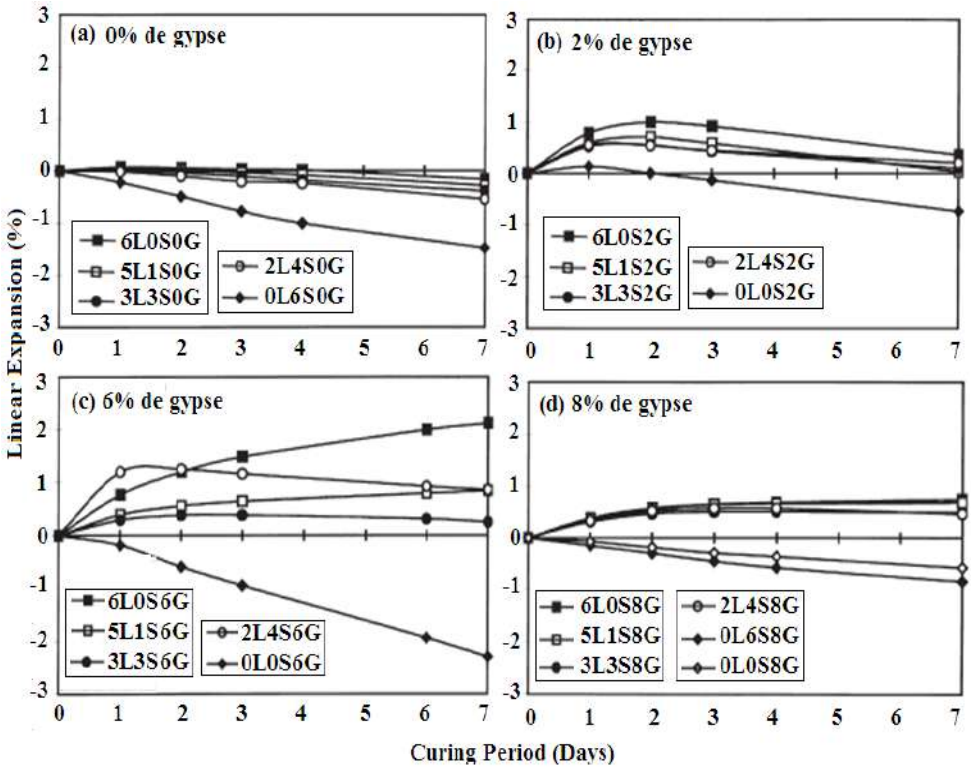


Fig. 2.32 — Effet du gypse sur le gonflement linéaire d'une kaolinite traitée par la substitution progressive de la chaux par le laitier (GGBS), (Wild et al., 1998).

D'après Celik and Nalbantoglu (2013), le gonflement d'un sol argileux traité avec la combinaison de 5% de chaux et 6% de laitier (*GGBS*) en présence de différentes concentrations du sulfate de sodium (2000 ppm) est pratiquement nul. De plus, le traitement combiné chaux/laitier en présence d'un sulfate de sodium a fait éliminer significativement le

gonflement du sol stabilisé mieux que l'utilisation de la chaux seule à savoir que pour les deux types de traitement, le gonflement augmente avec l'augmentation de la concentration en sulfate de sodium.

2.8 Conclusion

À partir de la revue bibliographique effectuée, plusieurs travaux de recherche ont été entrepris dont le but d'étudier l'influence des éléments perturbateurs (principalement les sulfates) sur le traitement des sols fins en utilisant des ajouts cimentaires seuls ou combinés (ciment, chaux, laitier, pouzzolane naturelle, cendres volantes, fumée de silice…etc.). Cela nous a permet de comprendre d'une part le mécanisme de la perturbation d'un traitement à savoir que l'échec de traitement observé sur chantier dépend non seulement de la présence des éléments perturbateurs mais aussi:

- de la nature du sol ;
- de la nature du liant ;
- du dosage en liant ;
- de la nature chimique de l'élément potentiellement perturbateur ;
- des propriétés physiques de cet élément perturbateur ;
- de la concentration en élément perturbateur ;
- de la nature de l'eau en présence ;
- des conditions de cure (température, humidité).

Par conséquent, l'effet des sulfates sur le traitement des sols argileux par la combinaison chaux/pouzzolane n'a pas été étudié. Dans le chapitre suivant, une étude expérimentale sera entreprise en vue d'étudier l'effet d'un sulfate monovalent (Na_2SO_4) et divalent ($CaSO_4.2H_2O$) sur le comportement physico-mécanique de deux sols argileux à savoir les limites d'Atterberg, la résistance à la compression non confinée et la résistance au cisaillement des sols fins argileux stabilisés en utilisant des additifs (chaux, pouzzolane naturelle et leur combinaison). L'analyse minéralogique et microstructurale des sols sélectionnés avant et après traitement sera aussi effectuée.

Chapitre 3

Etude Expérimentale

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

3.1 Introduction

Un programme expérimental a été entrepris pour mieux comprendre l'effet des sulfates (monovalent ou divalent) sur le traitement des sols argileux stabilisés à la chaux, à la pouzzolane naturelle et par leur combinaison. Et pour cela, nous avons sélectionné deux types de sols argileux, un sol gris de forte plasticité et un sol rouge de plasticité moyenne. Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes caractéristiques des matériaux choisis pour cette étude ainsi que les protocoles expérimentaux des expériences effectuées. Toutes les analyses ont été réalisées avec des matériaux argileux réduits en poudre de granulométrie inférieure à 1 mm. Les protocoles expérimentaux employés s'appuient sur des normes ASTM (2000). Les essais ont été effectués au niveau du laboratoire de l'habitat et de la construction centre (LHCC) de Rouiba et Oued Smar (Alger).

3.2 Matériaux utilisés et préparation

3.2.1 Sols naturels

3.2.1.1 Lieu de prélèvement

Deux sols ont été utilisés dans cette étude, le premier est un sol argileux gris (SG), il a été prélevé à partir de 4m de profondeur, de provenance d'un projet de remblai situé approximativement à 18 km au Nord-est de la ville de Chlef (Fig. 3.1). Le deuxième 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 (Fig. 3.2).

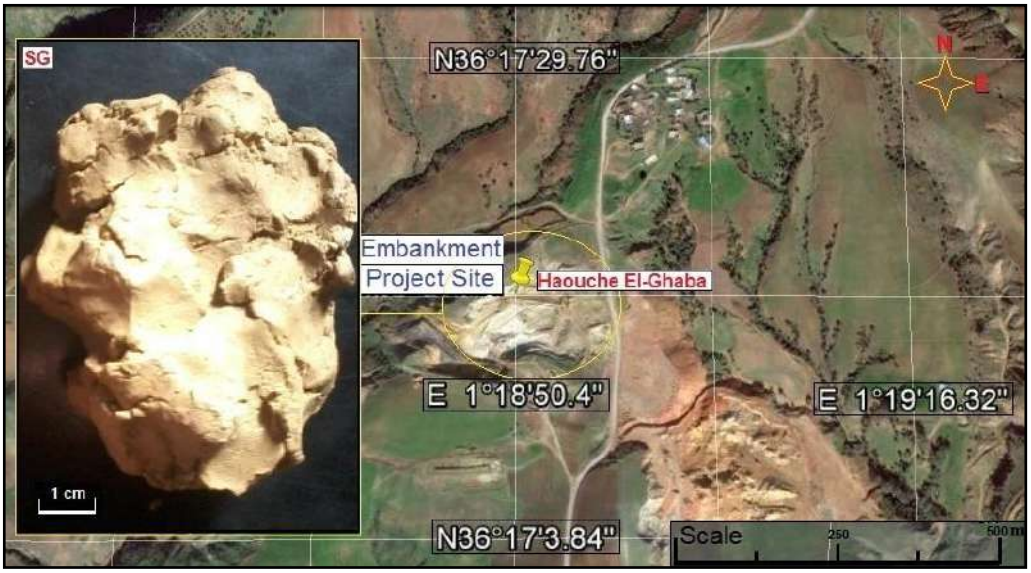


Fig. 3.1 — Prélèvement du sol argileux gris (SG) à partir d'un projet de remblai (Haouche El-Ghaba).



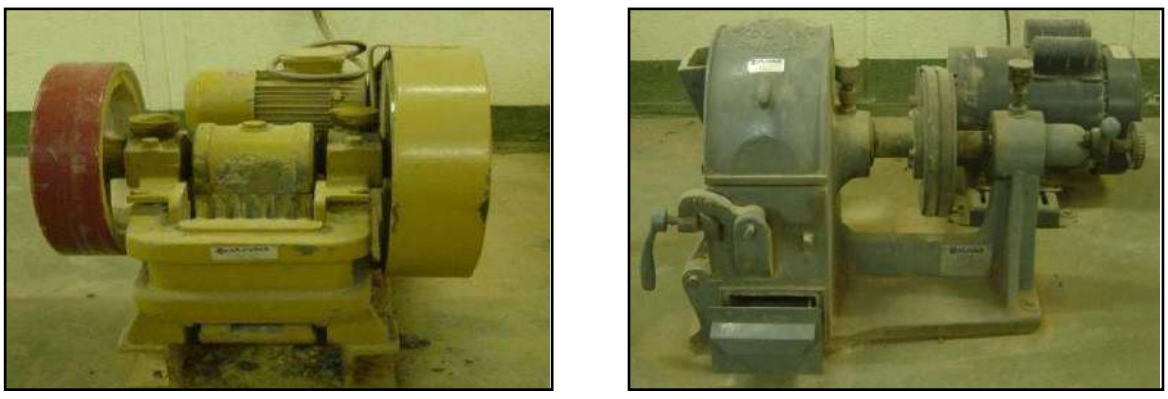
Fig. 3.2 — Prélèvement du sol argileux rouge (SR) à partir d'un projet d'autoroute Est-Ouest (Harchoun, Algérie).

3.2.1.2 Préparation

Après leur extraction, les sols ont été placés dans des sacs en plastique, transportés au laboratoire et passés à l'étuve à 50°C pendant 24h. Après séchage, les sols ont été ensuite concassés et broyés pour la préparation et exécution des essais géotechniques d'identification (ou de caractérisation) (Fig. 3.3 et Fig. 3.4).

3.2.1.3 Identification et caractérisation

Le Tableau 3.1 représente les différentes caractéristiques physico-mécaniques des sols fins étudiés ainsi que leur 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 3.5.



(a) **(b)**

Fig. 3.3 — Moyens utilisés pour la préparation des sols, (a): concasseur, (b): broyeur.



(a) **(b)** **(c)**

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.

Tableau 3.1 — Caractéristiques physico-mécaniques des sols.

Caractéristiques de base	**Sol gris (SG)**	**Sol rouge (SR)**
Teneur en eau naturelle (%)	32.9	13.8
Densité spécifique	2.71	2.84
Eléments passant au tamis 80µm (%)	85	97.5
Limite de liquidité (%)	82.8	46.5
Limite de plasticité (%)	32.2	22.7
Indice de plasticité (%)	50.6	23.8
Classification (USCS)	CH	CL
Teneur en eau optimale (%)	28.3	15.3
Densité sèche maximale (kN/m^3)	13.8	16.9
Résistance à la compression non confinée (MPa)	0.34	2.54
Perte au feu (%)	17.03	7.13

Tableau 3.2 — Propriétés chimiques des sols étudiés.

Nom chimique	**Formule chimique**	**SG (%)**	**SR (%)**
Oxyde de calcium	CaO	14.43	2.23
Oxyde de magnésium	MgO	1.99	2.14
Ferrite	Fe_2O_3	5.56	7.22
Alumine	Al_2O_3	14.15	19.01
Silice	SiO_2	43.67	57.02
Sulfite	SO_3	0.04	0.19
Chlorure	Cl^-	0.14	0.2
Potentiel d'hydrogène	pH	9.18	7.25
Oxyde de sodium	Na_2O	0.34	0.93
Oxyde de potassium	K_2O	1.96	3.17
Dioxyde de titan	TiO_2	0.65	0.83
Phosphore	P_2O_5	0.18	0.14

Tableau 3.3 — Propriétés minéralogiques des sols étudiés.

Nom minéralogique	**Formule chimique**	**SG (%)**	**SR (%)**
Quartz	SiO_2	20	32
Calcite	$CaCO_3$	26	4
Albite	$NaAlSi_3O_8$	-	8
Illite	$2K_2O.Al_2O_3.24SiO_2.2H_2O$	16	24
Kaolinite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	12	16
Montmorillonite	$Al_2((Si_4Al)O_{10})(OH)_2.H_2O$	20	-
Chlorite	$Mg_2Al_4O_{18}Si_3$	-	9
Minéraux ferrugineux et autres	-	6	7

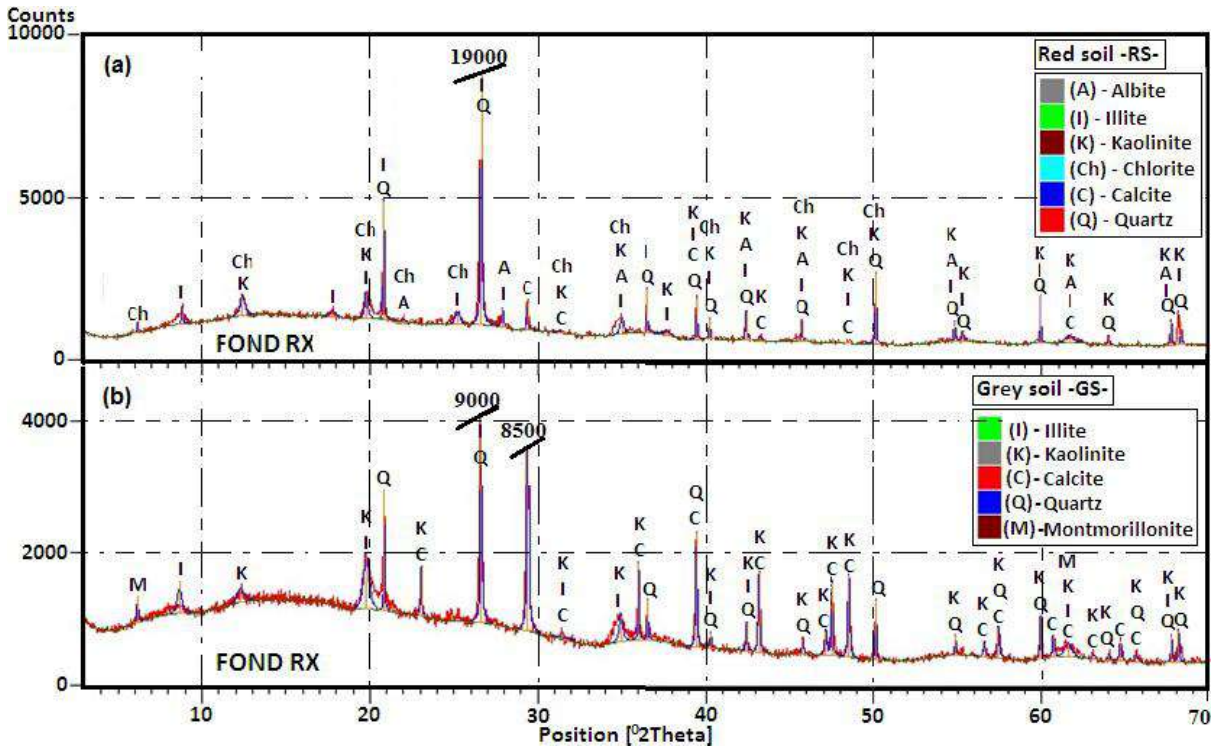


Fig. 3.5 — Les diagrammes diffractométriques présentant la composition minéralogique des sols étudiés, (a): sol argileux rouge, (b): sol argileux gris.

3.2.2 Pouzzolane naturelle

3.2.2.1 Lieu de prélèvement

La pouzzolane naturelle utilisée dans cette étude est une roche d'origine volcanique. Elle a été procurée du gisement de Bou-Hamidi (Béni-Saf) situé dans l'Ouest du territoire national sous forme de roches concassées de type pierre ponce de diamètre variant de 10 à 20cm. (Fig. 3.6)



Fig. 3.6 — Le gisement volcanique de Bou-Hamidi (Béni-Saf, Algérie).

3.2.2.2 Préparation

Nous avons d'abord procédé à son concassage puis son étuvage à 105°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage au micro-Deval (Fig. 3.7). La roche a été broyée au laboratoire jusqu'à une surface spécifique de 420 m^2/kg en se basant sur un broyage au micro-Deval (Fig. 3.8).



(a) (b) (c)

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.



(a) (b) (c)

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 boulles 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.

3.2.3 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 (Fig. 3.9). Les propriétés physico-chimiques de la chaux et de la pouzzolane naturelle sont présentées dans le Tableau 3.4 (Harichane et al. 2011a).



(a) **(b)** **(c)**

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.

Tableau 3.4 — Propriétés physico-chimiques des ajouts utilisés.

Nom chimique	**Chaux (%)**	**Pouzzolane naturelle (%)**
CaO	> 83.3	9.90
MgO	< 0.5	2.42
Fe_2O_3	< 2	9.69
Al_2O_3	< 1.5	17.5
SiO_2	< 2.5	46.4
SO_3	< 0.5	0.83
Na_2O	0.4 - 0.5	3.30
K_2O	-	1.51
CO_2	< 5	-
TiO_2	-	2.10
$P2O_3$	-	0.80
$CaCO_3$	< 10	-
Apparence physique	Poudre blanche sèche	Poudre brune 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	-	5.34

3.2.4 Produits chimiques

Deux produits chimiques (éléments perturbateurs du traitement) ont été utilisés dans cette étude (Fig. 3.10). Le premier est un sulfate de sodium anhydre (Na_2SO_4, sulfate monovalent) alors que le deuxième est un sulfate de calcium hydraté ($CaSO4.2H_2O$, sulfate divalent). Les quantités prédéterminées de chacun de ces deux types de sulfates ont été mélangées à sec avec les deux sols sélectionnés sous forme d'une poudre fine (0/80µm). Les propriétés physico-chimiques de ces deux éléments chimiques sont représentées dans le Tableau 3.5.



(a) **(b)**

Fig. 3.10 — Les sulfates utilisés dans l'étude expérimentale, (a): sulfate de sodium anhydre(Na_2SO_4), (b): sulfate de calcium hydraté ($CaSO_4.2H_2O$).

Tableau 3.5 — Caractéristiques physico-chimiques des sulfates utilisés.

Propriétés	**Sulfate de sodium**	**Sulfate de calcium**
Couleur	Blanche	Blanche
Taille des particules	0/80µm	0/80µm
Formule chimique	Na_2SO_4	$CaSO_4.2H_2O$
Masse molaire (g/mol)	142.042	136
Auuay (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 (PO_4, %)	0.002	-
Calcium (Ca, %)	0.01	-
Fer (Fe, %)	0.0005	< 0.005
Sodium (Na, %)	-	< 0.005
Potassium (K, %)	-	< 0.005
Cuivre (Cu, %)	-	< 0.005

3.3 Déroulement des essais

3.3.1 Combinaison des échantillons

Des essais au laboratoire concernant la plasticité et la résistance à la compression non confinée ont été effectués sur les deux sols argileux choisis. Plusieurs combinaisons de la pouzzolane naturelle et de la chaux ont été utilisées pour la stabilisation des deux sols. Les teneurs de la pouzzolane naturelle sont de 0, 10 et 20% tandis que celles de la chaux sont de 0, 4, 8%. Ces combinaisons ont été perturbées par 2, 4 et 6% de sulfate de sodium anhydre et d'un sulfate de calcium hydraté où les deux sulfates ont été ajoutés sous forme d'une poudre fine (0/80µm) par rapport au poids du sol sec. Cela permet d'obtenir 72 combinaisons pour les deux types sols étudiés (Tableau. 3.6).

Afin que les éprouvettes de sols confectionnées et destinées à soumettre les essais d'écrasement ou de cisaillement atteignent une densité maximale, nous avons procédé à évaluer quantitativement la masse des sols, la masse des additifs (chaux, pouzzolane naturelle

et sulfates) et la masse de l'eau par rapport aux paramètres de compactage (γ_{dmax} et ω_{opt}) déterminées par l'essai de Proctor standard normal.

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

D	EM (%)				D	EM (%)				D	EM (%)				D	EM (%)			
	S	NP	L	Ca		S	NP	L	Ca		S	NP	L	Na		S	NP	L	Na
RS / GS	100	0	0	0	P0L0C4	96	0	0	4	P0L0N2	98	0	0	2	P0L0N6	94	0	0	6
P0L4	96	0	4	0	P0L4C4	92	0	4	4	P0L4N2	94	0	4	2	P0L4N6	90	0	4	6
P0L8	92	0	8	0	P0L8C4	88	0	8	4	P0L8N2	90	0	8	2	P0L8N6	86	0	8	6
P10L0	90	10	0	0	P10L0C4	86	10	0	4	P10L0N2	88	10	0	2	P10L0N6	84	10	0	6
P20L0	80	20	0	0	P20L0C4	76	20	0	4	P20L0N2	78	20	0	2	P20L0N6	74	20	0	6
P10L4	86	10	4	0	P10L4C4	82	10	4	4	P10L4N2	84	10	4	2	P10L4N6	80	10	4	6
P20L4	76	20	4	0	P20L4C4	72	20	4	4	P20L4N2	74	20	4	2	P20L4N6	70	20	4	6
P10L8	82	10	8	0	P10L8C4	78	10	8	4	P10L8N2	80	10	8	2	P10L8N6	76	10	8	6
P20L8	72	20	8	0	P20L8C4	68	20	8	4	P20L8N2	70	20	8	2	P20L8N6	66	20	8	6
P0L0C2	98	0	0	2	P0L0C6	94	0	0	6	P0L0N4	96	0	0	4	D : Designation				
P0L4C2	94	0	4	2	P0L4C6	90	0	4	6	P0L4N4	92	0	4	4	EM : Echantillon Mélangé				
P0L8C2	90	0	8	2	P0L8C6	86	0	8	6	P0L8N4	88	0	8	4	S : Sol				
P10L0C2	88	10	0	2	P10L0C6	84	10	0	6	P10L0N4	86	10	0	4	NP : Pouzzolane Naturelle				
P20L0C2	78	20	0	2	P20L0C6	74	20	0	6	P20L0N4	76	20	0	4	L : Lime (Chaux)				
P10L4C2	84	10	4	2	P10L4C6	80	10	4	6	P10L4N4	82	10	4	4	Ca : $CaSO_4.2H_2O$				
P20L4C2	74	20	4	2	P20L4C6	70	20	4	6	P20L4N4	72	20	4	4	Na : Na_2SO_4				
P10L8C2	80	10	8	2	P10L8C6	76	10	8	6	P10L8N4	78	10	8	4	SR : Sol Rouge (Non traité)				
P20L8C2	70	20	8	2	P20L8C6	66	20	8	6	P20L8N4	68	20	8	4	SG : Sol Gris (Non traité)				

Les quantités de sols, d'additifs et de sulfates ont été pesées et mélangées manuellement à l'état sec jusqu'à ce que les mélanges aient une couleur plus homogène que possible. Les mélanges obtenus ont été introduits dans des sachets en plastique, préservés et stockés dans un endroit à température ambiante, comme indique sur la Figure 3.11.



(a) **(b)** **(c)**

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.

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 400µm) ont d'abord été mélangés avec la quantité prédéterminée de sulfate de sodium, de pouzzolane naturelle et de chaux ou la combinaison des deux dans un état sec. De l'eau distillée a été ajoutée au mélange obtenu (Fig. 3.12). 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 et 30 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 ou de calcium ont été obéis à trois essais après des périodes de cures de 1, 15 et 30 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.



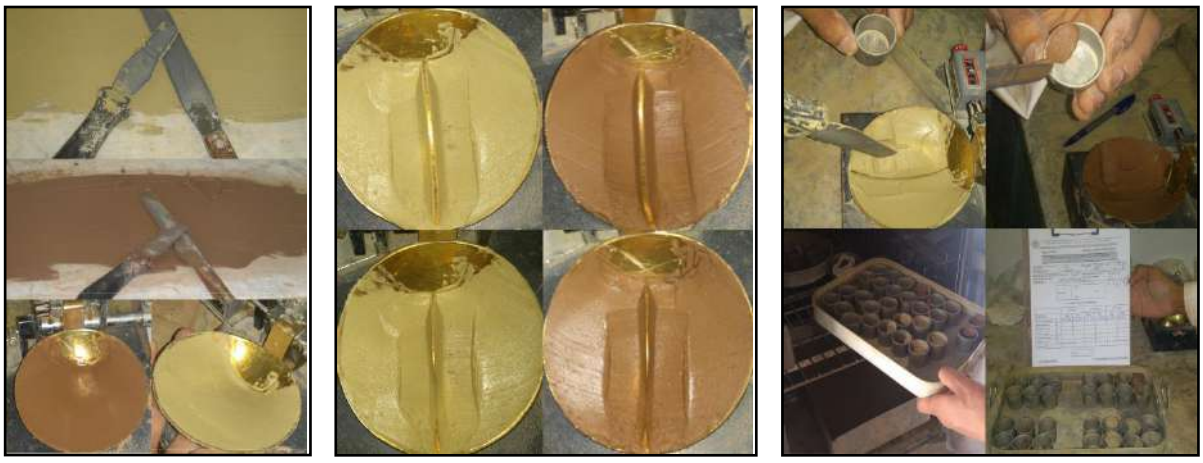
(a) **(b)**

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.

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 et 30 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 (Fig. 3.13a). 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 (Fig. 3.13b). 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 coté des lèvres de la rainure pour en déterminer la teneur en eau par dessiccation à l'étuve (Fig. 3.13c).

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.



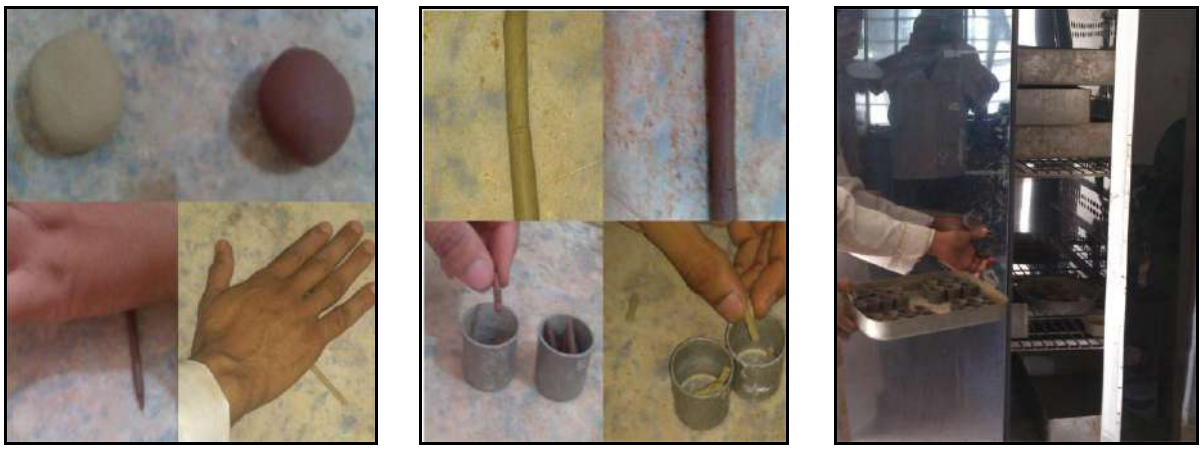
(a) **(b)** **(c)**

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.

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 (Fig. 3.14a-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.



(a) (b) (c)

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.

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 six 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, pouzzolane naturelle et sulfates) sont introduits dans des boites étanches et en les conservant pendant une heure avant l'exécution de l'essai de compactage.

Dans cette présente étude, les paramètres de compactage adoptés pour la préparation des éprouvettes des sols à soumettre aux essais de la résistance au cisaillement et de la compression non confinée sont présentés dans le Tableau 3.7 (Harichane et al. 2011a).

Tableau 3.7 — Références de compactage des sols étudiés.

Désignation	Sol argileux gris		Sol argileux rouge	
	Densité sèche maximale (kN/m^3)	Teneur en eau optimale (%)	Densité sèche maximale (kN/m^3)	Teneur en eau optimale (%)
P0L0	13.8	28.3	16.9	15.3
P0L4	13.2	30.4	16.4	17.8
P0L8	12.9	31.1	16.2	17.4
P10L0	14.0	27.6	17.1	14.3
P20L0	14.3	25.8	17.1	13.8
P10L4	13.3	26.8	16.5	16.6
P20L4	13.6	29.0	16.4	18.7
P10L8	13.3	29.8	16.1	17.7
P20L8	13.6	28.2	16.0	18.2

3.3.2.3 Résistance à la compression non confinée

Afin d'évaluer l'effet des additifs (chaux et pouzzolane naturelle) en présence ou non des sulfates (Na_2SO_4 et $CaSO_4.2H_2O$) sur la capacité de portance des sols fins argileux, des essais de résistance en compression non confinée ont été effectués sur des échantillons de sols conformément à la norme ASTM D2166 (2000).

3.3.2.3.1 Préparation des combinaisons et confections des éprouvettes

Les échantillons traités et non traités sont préparés à la teneur en eau optimale et compactés à la densité sèche maximale. Les mélanges ont été directement mélangés avec la quantité d'eau désirée et mixés manuellement jusqu'à ce que le mélange devienne homogène. Ensuite, les mélanges ont été conservés dans des sacs hermétiques et stockés à température ambiante pendant une heure. Ces dispositions garantissent l'homogénéité de la teneur en eau dans le mélange. La Figure 3.15a-c montre les étapes respectives de la préparation du sol avant d'entamer la phase de confection.

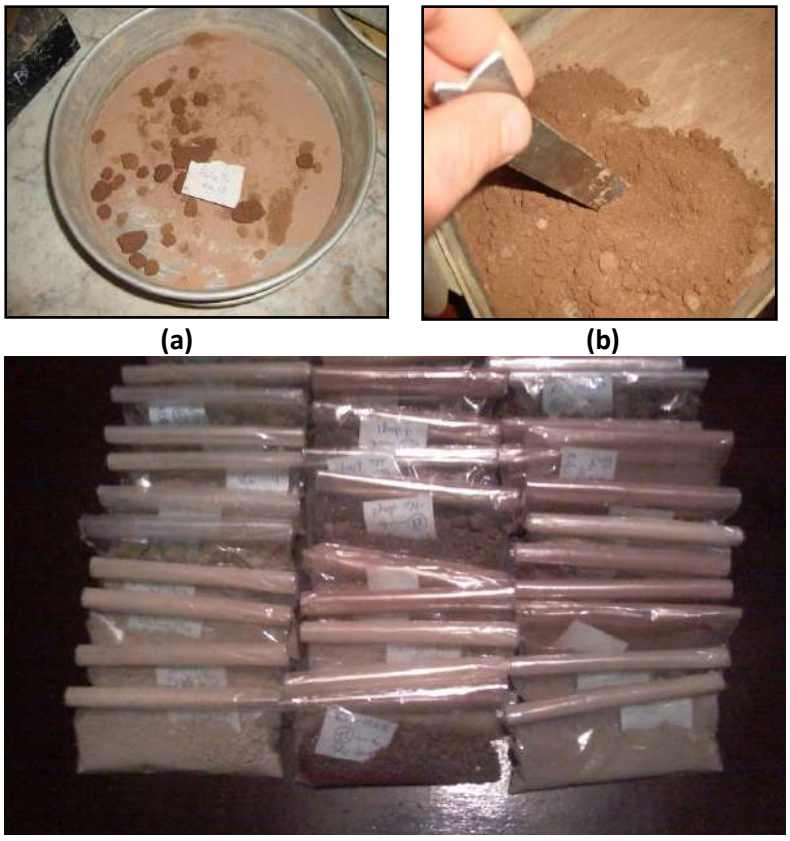


Fig. 3.15 — Préparation des combinaisons pour la confection et le compactage, (a): humidification, (b): malaxage, (c): conservation pendant une heure.

Afin que les échantillons soient compactés à la densité maximale désirée, les mélanges ont été confectionnés par compression statique et reconstitués sous forme d'éprouvettes de 3.8 cm de diamètre et de 7.6 cm de la hauteur tout en utilisant une presse statique manuelle qui consiste à appliquer par l'intermédiaire d'un piston, un effort vertical exercé sur le mélange à confectionner dans un moule formé en deux parties symétriques. Les parois intérieures du moule doivent être enduites d'une couche de graisse afin de réduire les frottements mélange-moule et d'éviter la rupture de l'éprouvette lors du démoulage. L'extraction de l'éprouvette

du moule peut se faire manuellement en glissant l'une de ses deux parties par rapport à l'autre. On détermine ensuite son poids et ses dimensions (Fig. 3.16).



(a) (b)

Fig. 3.16 — Confection des éprouvettes, (a): Presse statique manuelle destinée à la confection des éprouvettes, (b): moule cylindrique formé en deux parties symétriques.

Après démoulage, les échantillons ont été immédiatement stockés dans des sachets en plastique pour prévenir d'éventuelles pertes d'humidité et de les éloigner de tout contact avec le CO_2 qui est le responsable de la carbonatation de la chaux pendant la maturation. De plus, les échantillons sont confectionnés pour différentes périodes de cure (7-120 jours). La maturation à 20°C est assurée au laboratoire à température contrôlée. Le mode opératoire du compactage est illustré dans la Figure 3.17.



(a) (b) (c)

Fig. 3.17 — Confection des éprouvettes par compactage statique, (a): compactage, (b): démoulage, (c): éprouvette compactée et conservée dans un sachet en plastique.

3.3.2.3.2 Ecrasement des éprouvettes

A la fin de la période de cure, des essais de résistance à la compression non confinée sont effectués. La valeur de la résistance à la compression est la moyenne de deux essais effectués sur chaque type d'échantillon. L'évolution de la résistance à la compression simple est étudiée en fonction de la quantité des ajouts utilisés (0, 4 et 8% de la chaux et 0, 10 et 20% de PN), de la concentration en sulfates (0, 2, 4 et 6% de Na_2SO_4 ou $CaSO_4.2H_2O$) et du temps de maturation (7-120 jours). La résistance à la compression statique non confinée a été déterminée à l'aide d'une presse triaxiale avec une vitesse de chargement de 1 mm/min. Le mode opératoire est présenté dans la Figure 3.18.

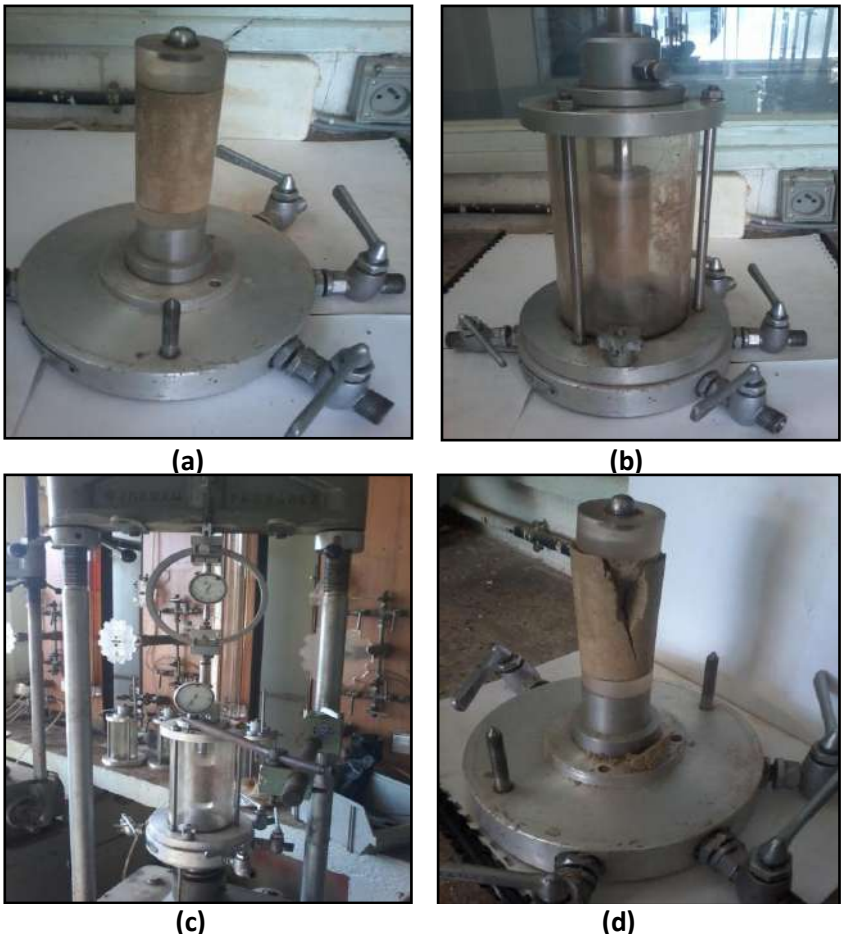


Fig. 3.18 — Procédure d'écrasement, (a): éprouvette à écraser, (b): installation de l'éprouvette dans la cellule, (c): installation de la cellule dans la presse statique, (d): éprouvette après écrasement.

3.3.2.4 Résistance au cisaillement

Afin d'évaluer l'effet des additifs (chaux et pouzzolane naturelle) en présence ou non des sulfates (Na_2SO_4 et $CaSO_4.2H_2O$) sur la résistance des sols fins argileux, des essais de résistance au cisaillement direct non consolidé non drainé (UU) ont été effectués sur des éprouvettes de sols conformément à la norme ASTM D6528-00 (2000).

3.3.2.4.1 Préparation des combinaisons et confections des éprouvettes

Les échantillons traités et non traités ont été préparés à la teneur en eau optimale et compactés à la densité sèche maximale. En suivant les mêmes étapes décrites dans la section (3.3.2.3.1) pour la préparation des mélanges destinés pour la confection et la conservation des éprouvettes à soumettre aux essais de cisaillement direct. Les mélanges ont été confectionnés par compression statique et reconstitués sous forme d'éprouvettes de 6 cm de diamètre et de 4 cm de hauteur en utilisant une presse statique manuelle. L'extraction de l'éprouvette du moule peut se faire manuellement à l'aide d'un piston en bois de diamètre égal à 5,8 cm. On détermine ensuite le poids de l'éprouvette et ses dimensions. Après démoulage, les éprouvettes confectionnées ont été immédiatement stockés dans des sachets en plastique pour prévenir d'éventuelles pertes d'humidité et loin de tout contact avec le CO_2 pour éviter le maximum possible leur carbonatation. Les éprouvettes ont été conservées à 20°C pendant des périodes de cures de 7, 30, 60 et 120 jours (Fig. 3.19).



Fig. 3.19 — Préparation des éprouvettes par compactage statique, (a): humidification, (b): confection, (c): démoulage, (d): préservation des éprouvettes dans des sacs hermétique.

3.3.2.4.2 Cisaillement des éprouvettes

A la fin de la période de cure, des essais de résistance au cisaillement direct non consolidé non drainé sont effectués. La valeur de la résistance au cisaillement est la moyenne de deux essais effectués sur chaque type d'échantillon. L'évolution de la résistance au cisaillement est également étudiée en fonction de la quantité des ajouts utilisés (0, 4 et 8% de la chaux et 0, 10 et 20% de PN), de la concentration en sulfates (0, 2, 4 et 6% de Na_2SO_4 ou $CaSO_4.2H_2O$) et du temps de maturation (7-120 jours). La résistance au cisaillement à la boite de Casagrande a été déterminée à l'aide d'un appareil de cisaillement avec une vitesse de chargement de 1 mm/min. Le mode opératoire de cet essai est présenté dans la Figure 3.20.

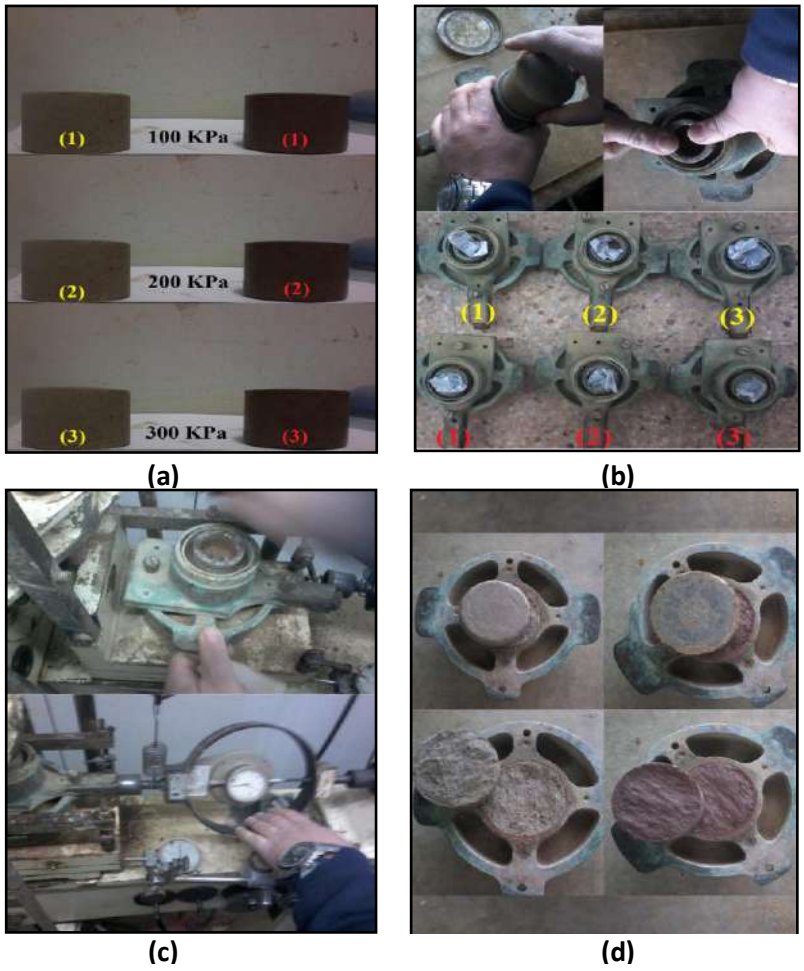


Fig. 3.20 — Procédure de cisaillement, (a): éprouvettes à cisailler, (b): installation de l'éprouvette dans la boite de Casagrande, (c): installation de la boite de Casagrande dans l'appareil de cisaillement, (d): éprouvette après cisaillement.

3.3.2.5 Essais sur la minéralogie (DRX) et la microstructure (MEB)

3.3.2.5.1 Diffraction aux rayons X et de Microscopie électronique à balayage

Les deux essais de DRX et MEB ont été effectués afin d'étudier respectivement l'aspect minéralogique et macrostructural des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec l'utilisation de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison. La formation éventuelle des composés de cimentation et/ou de l'ettringite minérale peut être observée avec des diagrammes de DRX alors que les changements de la macrostructure produite par des additifs et/ou des sulfates utilisés peuvent être observés avec des images MEB.

3.3.2.5.2 Préparation des échantillons et exécutions des essais

Un diffractomètre de type *Philips PW3020* (Fig. 3.21a) a été utilisé pour l'analyse au DRX. Après les écrasements d'éprouvettes, les petits fragments issus des éprouvettes fracturées de l'essai de la résistance à la compression non confinée ont été récupérés et puis séchés pendant 1 jour à 40 °C (Fig. 3.21b-d). Avant l'exécution de l'essai, les échantillons de sol prélevés ont

été broyés en poudres fines, passées à travers un tamis de 400 µm et puis conservées dans des sacs en plastique hors humidité afin de les utiliser comme échantillons pour les tests de DRX (Fig. 3.21e-h).

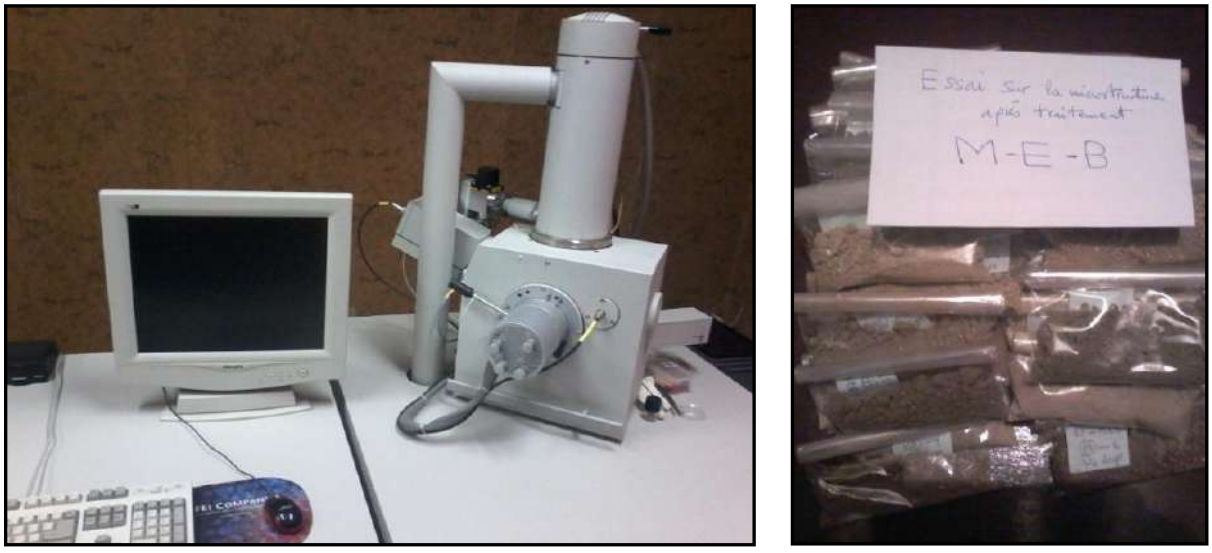


Fig. 3.21 — Analyse minéralogie par diffraction des rayons X, (DRX), (a): diffractomètre de type Philips PW3020, (b): éprouvette du sol rouge (ex: P20L8N4 après 60 jours de cure) avant et après écrasement, (c): récupération des petits fragments après écrasement, (d): séchage pendant 24 heures à 40°C, (e): broyeur, (f): tamiseuse, (g): poudre fine de l'échantillon P20L8N4, (h):conservation hors humidité.

Les motifs de diffraction ont été effectuées en utilisant un rayonnement (Cu-Ka) avec un angle de Bragg (2θ de) de gamme variant entre 4° et 60° avec une vitesse d'exécution de $0.83.10^{-2}$/2 sec. Après 60 jours de cure, l'examen de la formation éventuelle d'ettringite et des composés de cimentation a été effectué sur des échantillons de sol argileux traités et non traités. En outre, le contrôle de la formation des composés de cimentation et d'ettringite minérale a également été effectué sur des échantillons de sol contenant 4% du sulphate de sodium (Na_2SO_4) et de calcium ($CaSO_4.2H_2O$).

Cependant, la MEB de type *FEI XL30 ESEM* (Fig. 3.22a) a été utilisé pour les tests de MEB. la MEB consiste en un faisceau d'électrons balayant la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines particules. Ces particules sont analysées par différents détecteurs qui permettent de reconstruire une image en trois dimensions de la surface.

Les échantillons de sol (Fig. 3.22b) ont été insérés par résine époxy, fixés et puis balayés par une faible résolution MEB. L'examen d'éventuels changements dans la macrostructure a été réalisé uniquement sur certains échantillons de sol afin d'expliquer les variations possibles dans les propriétés physiques et mécaniques des deux sols stabilisés.



(a) **(b)**

Fig. 3.22 — (a): Microscopie électronique à balayage (MEB) de type FEI XL30 ESEM, (b): échantillons des deux sols à analyser.

3.4. Conclusion

Les matériaux sélectionnés dans ce travail de thèse ont été d'abord identifiés et caractérisés tout en déterminant leurs propriétés physico-mécaniques, chimiques et minéralogiques qui permettent enfin, de commenter, d'interpréter et de se comparer aux résultats issus du programme expérimental entrepris. Les échantillons ont été préparés selon la nature et le type d'essai tout en respectant les normes ASTM (2000). Les différents effets apportés par

l'utilisation du sulfate monovalent (sulfate de sodium, Na_2SO_4) et divalent (sulfate de calcium, $CaSO_4.2H_2O$) sur le comportement physico-mécanique et minéralogique des deux sols argileux stabilisés par l'addition des additifs minéraux à savoir la chaux et la pouzzolane naturelle ont été étudiés. Les résultats de différents essais réalisés seront présentés, analysés et discutés dans le Chapitre suivant à savoir : les limites d'Atterberg, la résistance à la compression non confinée, la résistance au cisaillement direct non consolidé non drainé (UU), la minéralogie par les diagrammes de DRX et les changements de la microstructure à l'aide des images de MEB.

Chapitre 4

Effet des Sulfates sur les Limites d'Atterberg

4.1. Introduction
4.2. Limites d'Atterberg des sols traités sans sulfates
4.3. Limites d'Atterberg des sols traités avec sulfates
4.4. Conclusion

4.1 Introduction

La nature et la proportion des minéraux, la masse volumique et la teneur en eau ainsi que l'argilosité, sont les paramètres physiques fondamentaux qui influent sur le comportement d'un sol. L'argilosité est une caractéristique exclusive de la fraction fine qui consiste à déterminer les caractéristiques de plasticité à savoir: la limite de liquidité (W_L), la limite de plasticité (W_P) et l'indice de plasticité (I_P). D'autre part, la teneur en eau et la compacité des mélanges sont définies par les essais de compactibilité.

Dans ce chapitre, nous allons analyser, comparer et interpréter les résultats des effets apportés par l'utilisation de différentes teneurs en sulfate monovalent (sulfate de sodium anhydre, Na_2SO_4) et divalent (sulfate de calcium hydraté, $CaSO_4.2H_2O$) sur les limites d'Atterberg des deux sols argileux traités avec l'addition de différentes proportions de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison en fonction du temps de cure.

4.2 Limites d'Atterberg des sols traités sans sulfates

4.2.1 Effet de la chaux (L)

4.2.1.1 Effet de la chaux sur la limite de liquidité

Les résultats de l'effet de la chaux sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés sont illustrés dans la Figure 4.1. La W_L des échantillons des deux sols argileux diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux additionnée mais, elle augmente avec le temps de cure et semble d'être constante pour le cas du sol gris (SG). Par exemple, l'addition de 8% de chaux au SG fait diminuer la W_L de 82.8% jusqu'à 62.1 et 61% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.1a). Manasseh and Olufemi (2008) ont observé que l'addition de 10% de chaux, pour une même classe de sol, fait réduire la W_L de 72% à 62% après 1 jour de cure. La diminution de la W_L peut être attribuée à l'échange de cations qui s'est produit dans le sol par les ions divalents de calcium venant de l'addition de la chaux (Goswami and Singh, 2005). Par ailleurs, Miller and Azad (2000) ont rapporté que la diminution de la W_L avec l'augmentation de la teneur en chaux utilisée est plus prononcée pour les argiles à cations de valence inférieure telle que l'ion Na^+. Cependant, l'addition de 8% de chaux au sol rouge (SR) fait augmenter la W_L de 46.5% jusqu'à 54.9 et 59.6% après des cures de 1 et 30 jours, respectivement (Fig. 4.1b). Pour une même classe de sol traité avec 10% de chaux comme additif, Yong and Ouhadi (2007) ont observé que la W_L a augmenté de 49.6% jusqu'à 56.5 et 75% après 1 et 30 jours de cure, respectivement. Des observations similaires ont été rapportées par Bell (1996) et Asgari et al. (2015). D'autre part, pour un sol de classe similaire,

Afès and Didier (2000) ont constaté que l'utilisation de 6% chaux en tant qu'additif, la W_L diminue de 47.7% jusqu'à 42.7 et 42.4% après 7 et 30 jours de cure, respectivement. Ces résultats nous permettent de conclure que les augmentations et les diminutions dans les limites d'Atterberg dépendent fortement de la composition minéralogique des sols stabilisés. 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.

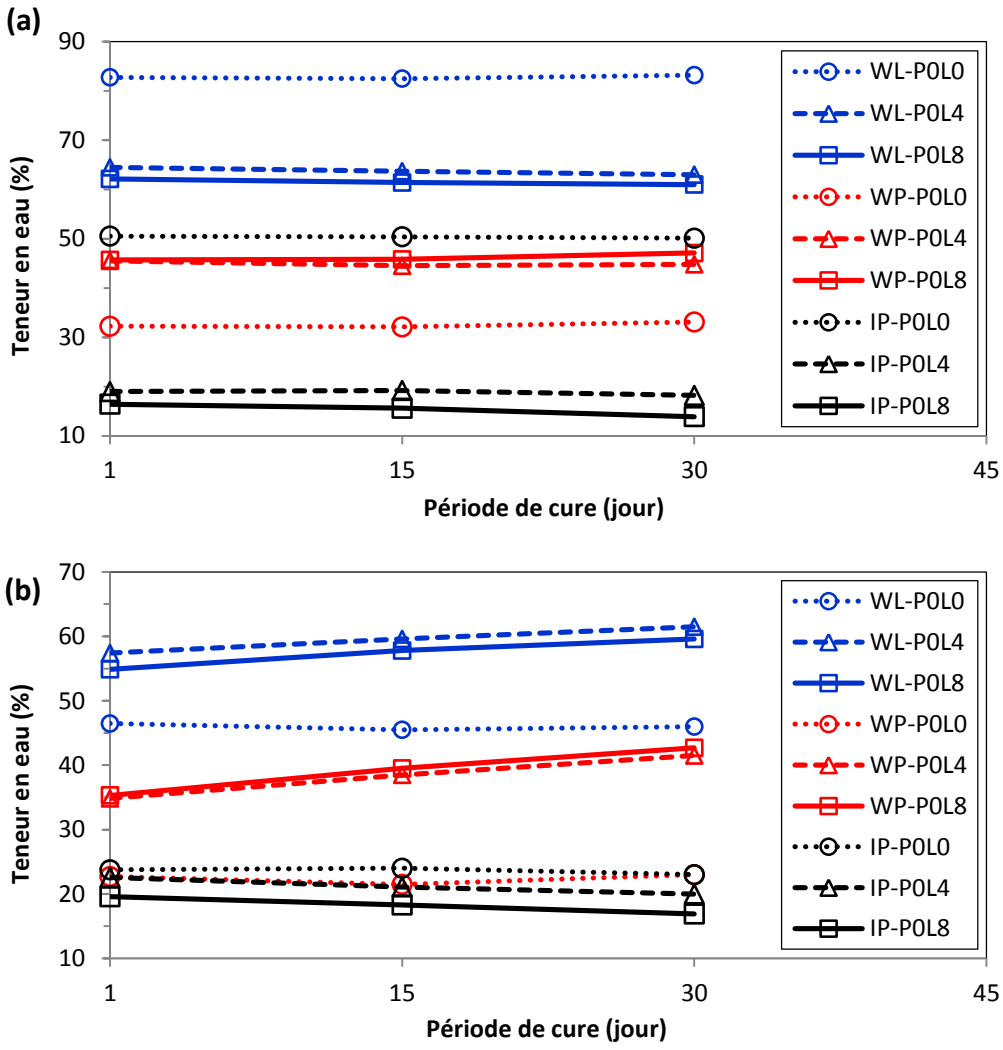


Fig. 4.1 — Effet de différents pourcentages de chaux sur les limites d'Atterberg des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): sol gris, (b): sol rouge.

4.2.1.2 Effet de la chaux sur la limite de plasticité

Les résultats de l'effet de la chaux sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux stabilisés sont présentés dans la Figure 4.1. En général, la W_P des deux sols argileux traités

augmente avec l'augmentation du dosage en chaux additionné et de la période de cure. Par exemple, avec 8% de chaux utilisée en tant qu'additif, la W_P du SG augmente de 32.2% à 43.8 et 44.8% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.1a). Pour une même classe de sol, Nalbantoglu (2006) a observé que la W_P augmente de 22.2% à 37.5% pour l'addition de 7% de chaux. Un comportement similaire a été observé par Rahman (1986). Cependant, l'addition de 8% de chaux au SR fait augmenter la W_P de 22.7% à 35.3 et 42.7% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.1b). Pour un sol de même classe, Afès and Didier (2000) ont trouvé que l'utilisation de 6% de chaux fait augmenter la W_P de 24% jusqu'à 32.4 et 34% après 7 et 30 jours de cure, respectivement. Des observations similaires pour les sols de classes similaires ont été rapportés par plusieurs chercheurs (Bell, 1996; Attoh-Okine, 1995; Okagbue and Yakubu, 2000; Yong and Ouhadi, 2007; Asgari et al., 2015). Il est connu que l'utilisation de la chaux conduit à la floculation des particules d'argiles en provoquant une augmentation immédiate de la W_P. En outre, l'augmentation de la W_P provoque une diminution des propriétés plastiques du sol stabilisé en raison de l'altération du film d'eau entourant les minéraux d'argile dans le sol (Osula, 1991).

4.2.1.3 Effet de la chaux sur l'indice de plasticité

Les résultats des changements observés dans l'indice de plasticité (I_P) des deux sols argileux stabilisés par l'addition de la chaux sont reportés sur la Figure 4.1. Les sols traités ont montré une diminution immédiate de leurs indices de plasticité sous l'effet de l'addition de la chaux. Il est évident que l'addition d'une faible teneur en chaux est suffisante pour améliorer l'ouvrabilité des deux sols stabilisés. Cependant, l'augmentation de la teneur en chaux au-delà de 4% a un effet marginal sur la réduction de l'indice de plasticité. Un comportement similaire a été observé par plusieurs chercheurs pour une même classe de sol (Nalbantoglu, 2006; Harichane et al., 2011a). Cela peut être attribuée à des réactions chimiques entre la chaux et le sol, y compris l'échange d'ions et des réactions de floculation associées (Puppala et al., 2006). Il est très clair que l'indice de plasticité des deux sols argileux stabilisés diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux et de la période de cure à savoir que sa réduction est plus prononcée dans le SG que dans le SR. Il s'avère que l'addition de 8% de chaux est suffisante pour diminuer l'indice de plasticité du SG de 50.5% jusqu'à 15.6 et 13.9% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.1a). Cependant, pour le cas du SR stabilisé avec la même teneur en chaux, l'indice de plasticité diminue de 23.7% jusqu'à 19.6 et 16.9% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.1b). Pour une même classe de sol, Afès and Didier (2000) ont rapporté que l'utilisation de 6% de chaux comme un additif, l'indice de plasticité diminue de 23.7% à 10.3 et 8.4% après 7 et 30 jours, respectivement. Des comportement

similaires ont été observées par plusieurs chercheurs (Ola, 1977; Attoh Okine, 1995; Okagbue and Yakubu, 2000; Bagherpour and Choobbasti, 2003; Ansary et al., 2006) où ils ont utilisé la chaux comme additif de stabilisation.

4.2.2 Effet de la pouzzolane naturelle (PN)

4.2.2.1 Effet de la PN sur la limite de liquidité

Les résultats de l'effet de la pouzzolane naturelle sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés sont reportés sur la Figure 4.2. En général, la W_L des deux sols argileux traités diminue avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle mais elle semble d'être constante avec la cure. Par exemple, l'addition de 20% de pouzzolane naturelle au SG fait diminuer la W_L de 82,8% jusqu'à 67,3 et 66,7% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.2a). Il convient de noter que l'addition de la pouzzolane naturelle aux deux sols argileux a provoqué une légère diminution de la W_L par rapport à l'addition de la chaux toute seule. Cette diminution est probablement liée à la faible teneur en chaux libre qui se présente dans la pouzzolane naturelle utilisée. Une tendance similaire en W_L a été rapportée par Parsons and Kneebone (2005) où ils ont utilisé des cendres volantes en tant qu'additif. Cependant, pour le cas du SR stabilisé avec le même dosage en pouzzolane naturelle (20%PN), la W_L diminue de 46.5% jusqu'à 39.3 et 41.2% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.2b). Pour une même classe de sol, Sivrikaya et al. (2014) ont observé que la W_L du sol traité diminue de 28 à 25% pour l'addition de 20% du laitier de haut fourneau-A (GGBS-A, poudre grossière). D'autre part, pour une même classe de sol, Basha et al. (2003) et Rahman (1986) ont rapporté que l'addition de 20% de cendres de l'écorce de riz, fait augmenter la W_L de 49.8 à 54.3% et de 36.8 à 47%, respectivement.

4.2.2.2 Effet de la PN sur la limite de plasticité

Les résultats de l'effet de la pouzzolane naturelle sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux stabilisés sont illustrés dans la Figure 4.2. Dans tous les cas étudiés, on assiste à des diminutions de l'ordre de 20 et 25% de la W_P des deux sols argileux traités avec l'addition de 10 et 20% de pouzzolane naturelle, respectivement. Par exemple, avec l'addition de 10% de pouzzolane naturelle en tant qu'additif, la W_P du SG diminue de 32.2% jusqu'à 25.5 et 25% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Figure 4.2a).

Selon la littérature, l'addition de 10% de cendres de l'écorce de riz à la même classe de sol fait augmenter légèrement la W_P de 32.3% à 34.3% (Muntohar and Hantoro, 2000). Cependant,

pour le cas du SR, l'addition de 10% de pouzzolane naturelle fait diminuer légèrement sa W_P de 22.7% jusqu'à 20.5 et 21.5% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Figure 4.2b).

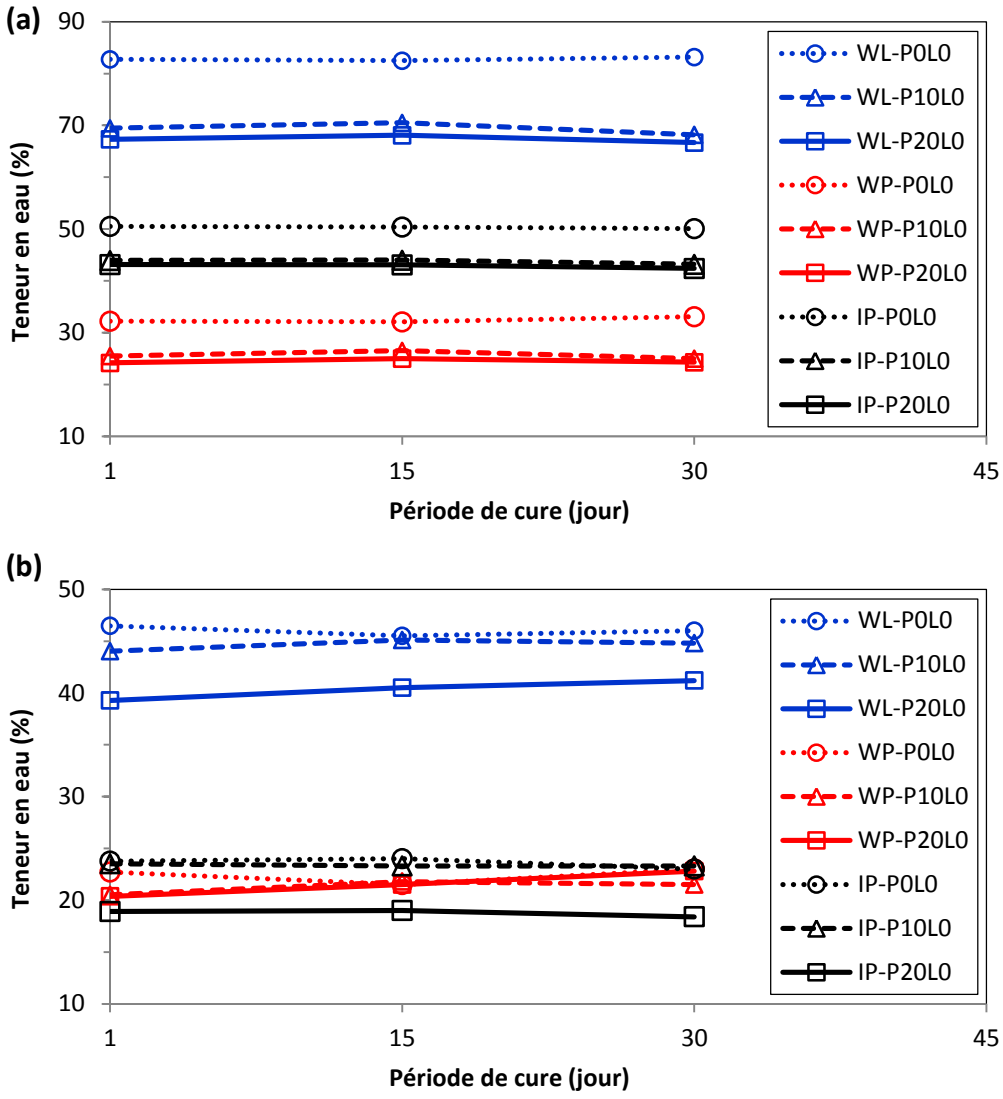


Fig. 4.2 — Effet de différents pourcentages de pouzzolane naturelle sur les limites d'Atterberg des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): sol gris, (b): sol rouge.

Des comportements différents ont été observées par plusieurs chercheurs pour une même classe de sol (Rahman, 1986; Basha et al., 2003). Il est suggéré que la diminution de la W_P des deux sols argileux stabilisés est probablement liée au remplacement des grosses particules du sol traité par des particules fines de la pouzzolane naturelle additionnée.

4.2.2.3 Effet de la PN sur l'indice de plasticité

Les résultats de l'effet de la pouzzolane naturelle sur l'indice de plasticité (I_P) des deux sols argileux stabilisés sont reportés sur la Figure 4.2. L'addition de la pouzzolane naturelle aux

deux sols argileux fait réduire légèrement leurs indices de plasticité par rapport à l'addition de la chaux toute seule. Il est clair de constater que l'addition de 20% de pouzzolane naturelle au SG, l'indice de plasticité diminue de 50.5% à seulement 43.1 et 42.4% après de 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.2a). Cependant, l'utilisation de la même teneur en pouzzolane naturelle en tant qu'additif fait diminuer l'indice de plasticité du SR de 23.8% jusqu'à 18.9 et 18.4% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.2b). Pour une même classe de sol, Yadu and Tripathi (2013) et Sivrikaya et al. (2014) ont trouvé que l'indice de plasticité des deux sols traités avec l'addition de 12% et 20% du laitier de haut fourneau diminue de 17 à 13% et de 9% à 4%, respectivement. Des tendances similaires ont été observées par Rahman (1986), Parsons and Kneebone (2005) et Eberemu (2013) où ils ont utilisé des cendres de l'écorce de riz, des cendres volantes et des cendres volcaniques, respectivement. En revanche, Degirmenci et al. (2007) ont constaté que l'indice de plasticité augmente avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes utilisées. Ce comportement peut être expliqué par la petite taille des particules des cendres volantes qui ont une surface spécifique très élevée que celle de la pouzzolane naturelle.

4.2.3 Effet de la combinaison chaux-pouzzolane naturelle (L-PN)

4.2.3.1 Effet combiné de L-PN sur la limite de liquidité

La Figure 4.3 illustre les résultats de l'effet apporté par la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés. Il convient de noter que la stabilisation des deux sols argileux avec l'utilisation de la combinaison chaux-pouzzolane naturelle montre que les réductions dans la valeur de la W_L sont comparables à celles des sols traités à la chaux toute seule. Pour le cas du SG, la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle fait diminuer considérablement sa W_L et notamment avec la période de cure. Par exemple, l'addition à la fois de 20% de pouzzolane naturelle et de 8% de chaux au SG fait diminuer la W_L de 82.8% jusqu'à 62.2 et 61% après 1 et 30 jours de cure, respectivement, soit une réduction de 30% (Fig. 4.3a). Pour un sol de même classe, al-Swaidani et al., (2016) ont observé un comportement différent à savoir que l'utilisation de la même combinaison de chaux-pouzzolane naturelle (20%PN+8%L) fait diminuer la W_L de 58.8 jusqu'à 44.4% après un jour de cure, soit une réduction de 25%. Cependant, une augmentation considérable de la W_L du SR a été enregistrée lorsque la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est utilisée. Contrairement au SG, la W_L du SR augmente avec la période de cure. Par exemple, la W_L du SR traité avec la combinaison de 10% de pouzzolane naturelle et de 4% de chaux augmente de 46.5% jusqu'à 56.4 et 61.8% après 1 et 30 jours de cure,

respectivement (Fig. 4.3b). D'ailleurs, pour une même classe de sol, Ansary et al. (2006) ont constaté qu'avec la combinaison de 12% de cendres volantes et de 3% de chaux, la W_L du sol-B- diminue de 44% jusqu'à 32.3% après un jour de cure.

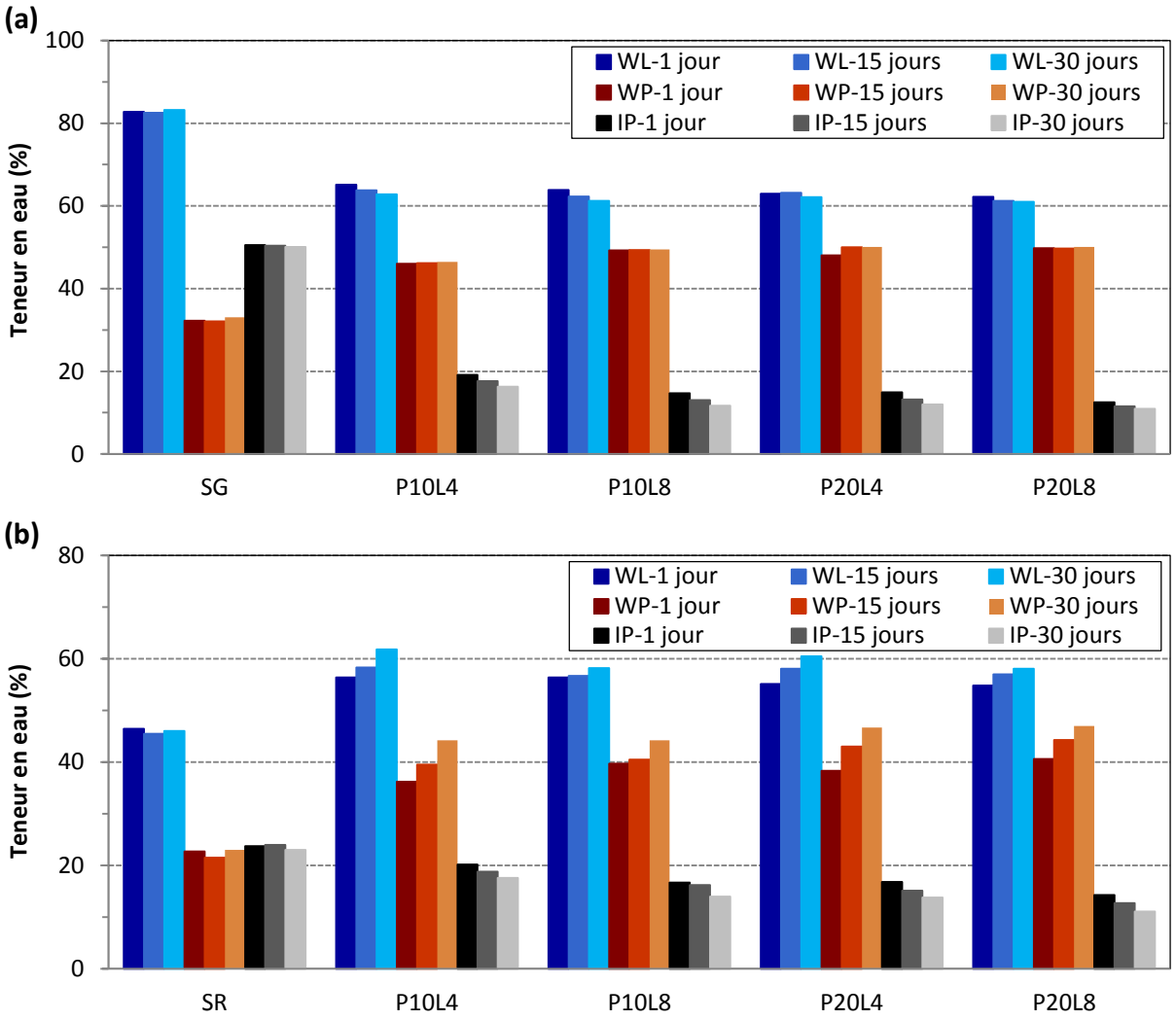


Fig. 4.3 — Effet de différents pourcentages chaux-pouzzolane naturelle sur les limites d'Atterberg des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): sol gris, (b): sol rouge.

4.2.3.2 Effet combiné de L-PN sur la limite de plasticité

La Figure 4.3 illustre les résultats de l'effet engendré par la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux traités. En général, on observe qu'il y a une augmentation considérable de la W_P des deux sols argileux étudiés avec l'augmentation la teneur en chaux-pouzzolane naturelle additionnée et de la période de cure. D'une manière générale, l'utilisation de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle dans la stabilisation des deux sols argileux a conduit au développement des valeurs de W_P bien plus élevées que l'addition de la chaux toute seule. Par exemple, l'addition de 20% de pouzzolane

naturelle et de 8% de chaux au GS fait augmenter la W_P de 32.2% à 49.8 et 50.1% après 1 et 30 jours de cure, respectivement, soit une augmentation de 30% (Fig. 3.4a). Pour une même classe de sol, al-Swaidani et al., (2016) ont trouvé que la même combinaison de chaux-pouzzolane naturelle (20%PN+8%L) fait augmenter considérablement la W_P de 30% jusqu'à 41.5% après 24 heures, soit une augmentation de 25%. Cependant, pour le cas du SR traité avec la même combinaison (20%PN+8%L), la W_P passe de 22.7% à 40.6 et 47% après 1 et 30 jours de cure, respectivement, soit une augmentation de 55% après 30 jours de cure (Fig. 3.4b). Pour une même classe de sol, Ansary et al. (2006) ont observé que l'addition de 18% de cendres volantes et de 3% chaux fait augmenter la W_P de 25% jusqu'à 35.8%. Il est à noter que pour tous les échantillons des deux sols argileux étudiés, la WP devient de plus en plus importante lorsque la teneur en chaux-pouzzolane naturelle augmente. D'autre part, par comparaison, les valeurs de la W_P développées par le SR sont également bien plus élevées que celles développées par le SG. Cela est attribué probablement à la nature du SR où on constate une absence complète de la montmorillonite dans sa composition minéralogique. Il est à signaler que la présence de la montmorillonite dans un sol naturel avec des proportions élevées peut empêcher l'augmentation de sa W_P.

4.2.3.3 Effet combiné de L-PN sur l'indice de plasticité

Les résultats de l'effet de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sur l'indice de plasticité (I_P) des deux sols argileux stabilisés sont reportés sur la Figure 4.3. Les meilleurs résultats de l'indice de plasticité sont obtenus lorsque la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est utilisée. Il est clair donc d'observer que la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle a un effet significatif sur l'indice de plasticité du SG que sur celui du SR. En outre, une diminution significative de l'indice de plasticité avec l'augmentation de la teneur en chaux-pouzzolane naturelle et de la période de cure a été observée. Par exemple, l'indice de plasticité de SG stabilisé avec la combinaison de 20% de pouzzolane naturelle et de 8% de chaux diminue de 50.5% jusqu'à 12.5 et 10.9% après 1 à 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.3a). al-Swaidani et al., (2016) ont observé que l'addition de la même teneur en chaux-pouzzolane naturelle (20%PN+8%L) à la même classe de sol fait diminuer considérablement l'indice de plasticité de 28.8% jusqu'à 2.9%, ce qui est 7 fois plus petit que celui du sol non traité. Cependant, l'indice de plasticité du SR stabilisé avec la même combinaison de chaux-pouzzolane naturelle (20%PN+8%L) diminue de 23.8% jusqu'à 14.8 et 11.1% après 1 et 30 jours de cure, respectivement, soit une réduction de 50% après 30 jours de cure (Fig. 4.3b). Ansary et al. (2006) ont rapporté que pour un sol de classe similaire, l'indice de plasticité diminue de 19% à 2.3% pour un traitement combiné de 6% de cendres volantes et de 3% de

chaux. Dans tous les cas, la forte réduction de l'indice de plasticité est achevée lorsque le traitement combiné de chaux-pouzzolane naturelle est utilisé. Ce comportement peut être expliqué par le rôle complémentaire joué par la chaux et la pouzzolane naturelle où les effets bénéfiques de l'un peuvent compenser les inconvénients qui pourraient présenter l'autre.

4.3 Limites d'Atterberg des sols traités avec sulfates

4.3.1 Traitement à la chaux en présence du $CaSO_4$

4.3.1.1 Effet du $CaSO_4$ sur la limite de liquidité

Les Figures 4.4 et 4.5 présentent les résultats de l'effet du $CaSO_4.2H_2O$ sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux. En général, dans le cas où les échantillons des deux sols argileux non traités sont testés en présence seulement du $CaSO_4.2H_2O$; nous assistons à une diminution remarquable (notamment pour le cas du SG) de la W_L avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ et de la période de cure. Par exemple, après 1 jour de cure, la W_L du SG diminue de 82.8% jusqu'à 73.5, 70.4 et 68.1% avec l'addition de 2, 4 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$, respectivement (Fig. 4.4a). Cependant, après 30 jours de cure et pour le même sol en présence des mêmes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$, la W_L continue à diminuer de plus en plus jusqu'à 62.7, 60.6 et 57.8% (Fig. 4.4c). Pour une même classe de sol (bentonite), Yilmaz and Civelekoglu (2009) ont rapporté que l'utilisation du gypse en tant qu'additif fait diminuer l'indice de plasticité de 186.9% jusqu'à 139.5 et 121.9% pour l'addition de 2.5 et 7.5% de gypse, respectivement.

Cependant, l'addition de la chaux en tant qu'additif a montré que la W_L des échantillons des deux sols argileux contenant du $CaSO_4.2H_2O$ diminue considérablement avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$, de la teneur en chaux et de la période de cure. Par exemple, après un 1 jour de cure, l'addition de 8% de chaux au SG a montré que la W_L diminue de 62.1% jusqu'à 61.4, 60.3 et 59.5% en présence de 2, 4 et 6% de $CaSO_4.2H_2O$, respectivement (Fig. 4.4a). Pour un sol de classe similaire, Kinuthia et al. (1999) ont rapporté que qu'avec 6% de chaux, la W_L décroit de 73% jusqu'à 71, 69 et 67% en présence de 1, 2 et 3% de $CaSO_4.2H_2O$, respectivement. Contrairement, pour un sol de classe traité avec 6% de chaux, Sivapullaiah et al. (2000) ont observé que la W_L augmente de 68% jusqu'à 70, 73 et 76% respectivement avec la présence de 0.5, 1 et 3% de $CaSO_4$. Ils ont constaté que ce comportement est dû à l'interaction chimique entre le sol, la chaux et le CaSO4.

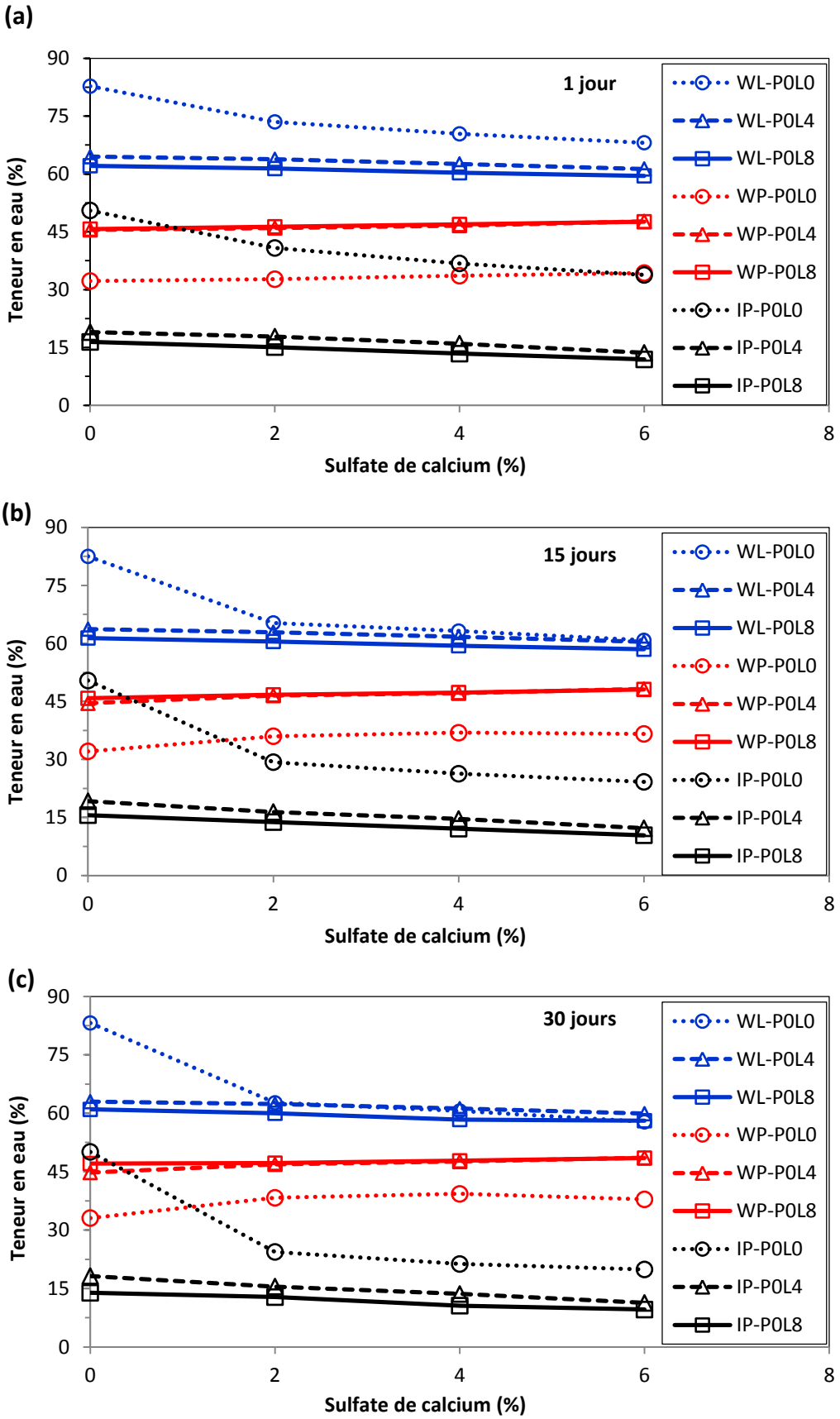


Fig. 4.4 — Effet de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé à la chaux pour différentes périodes de cure.

Cependant, après 1 jour de cure, la W_L du SR stabilisé avec 8% de chaux diminue de 54.9% jusqu'à 54.2, 53.7 et 52% avec l'addition de 2, 4 et 6% $CaSO_4.2H_2O$, respectivement (Fig. 4.5a). Il est important de noter que pour les deux types de sols (notamment le SG), l'effet du $CaSO_4.2H_2O$ est très remarquable sur la W_L des deux sols argileux non traités que sur celle des mêmes sols traités à la chaux.

4.3.1.2 Effet du $CaSO_4$ sur la limite de plasticité

Les résultats de l'effet du $CaSO_4.2H_2O$ sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux stabilisés à la chaux sont présentés dans les Figures 4.4 et 4.5. La W_L des deux sols argileux perturbés avec seulement du $CaSO_4.2H_2O$ augmente avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ et de la période de cure. Cependant, pour le cas des sols traités à la chaux en présence du $CaSO_4.2H_2O$, la W_P augmente avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$, de la teneur en chaux et de la période de cure. Par exemple, avec 8% de chaux, la W_P du GS contenant 6% de $CaSO_4.2H_2O$ augmente de 45.7 à 47.6% et de 47.1 à 48.5% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.4a et b). Pour un sol de classe similaire, Kinuthia et al. (1999) ont constaté que la W_P augmente de 41% jusqu'à 45% pour l'addition de 3% de gypse. Cependant, pour le cas du SR stabilisé avec la même teneur en chaux (8%L), en présence de 6% de $CaSO_4.2H_2O$, la W_P augmente de 35.5% jusqu'à 37.1% après 1 jour de cure puis elle diminue de 42.7% à 39% après une cure de 30 jours (Fig. 4.5a et b). Il est à noter que pour les deux types de sols traités, l'effet du $CaSO_4.2H_2O$ est fortement considérable sur la W_P des deux sols argileux non traités que sur celle des mêmes sols argileux traités à la chaux.

4.3.1.3 Effet du $CaSO_4$ sur l'indice de plasticité

Les Figures 4.4 et 4.5 montrent les changements dans l'indice de plasticité (I_P) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux en présence de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$. En général, une diminution significative de l'indice de plasticité des échantillons des deux sols argileux non traités (notamment pour le cas du SG) a été observée lorsque la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ augmente, particulièrement, avec la période de cure. Par exemple, au bout 1 jour de cure, l'indice de plasticité du SG diminue de 50.5% jusqu'à 40.8, 36.8 et 33.8% en présence de 2, 4 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$, respectivement (Fig. 4.4a). Alors qu'après 30 jours de cure, l'indice de plasticité continue à décroitre petit à petit jusqu'à 24.4, 21.4 et 19.9% respectivement avec les mêmes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ (Fig. 4.4c).

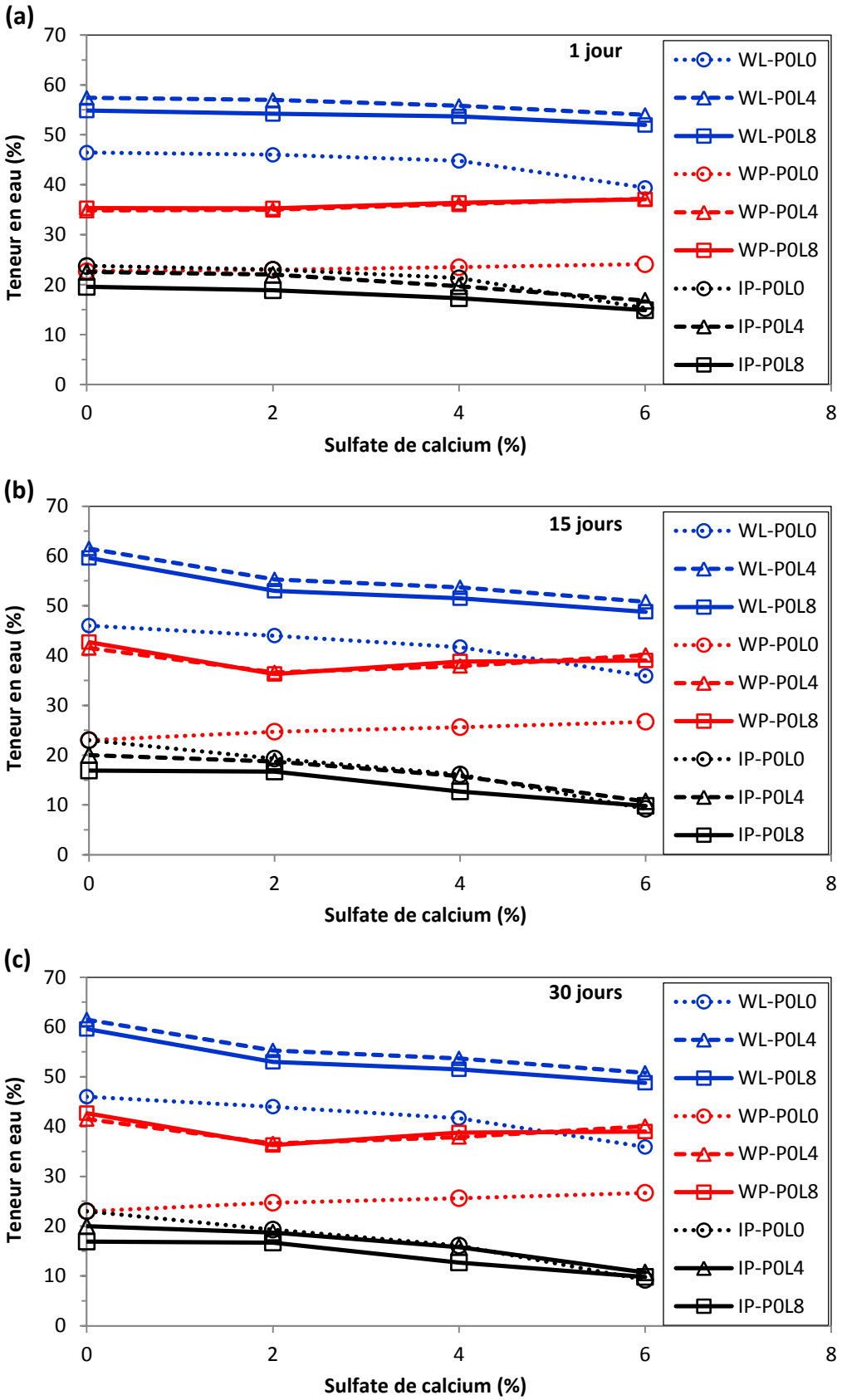


Fig. 4.5 — Effet de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé à la chaux pour différentes périodes de cure.

Cependant, le traitement avec l'addition de la chaux en présence du $CaSO_4.2H_2O$ fait diminuer considérablement l'indice de plasticité des deux sols argileux étudiés. Cette diminution devient importante avec la période de cure, la teneur croissante du $CaSO_4.2H_2O$ et la teneur en chaux additionnée. Par exemple, au bout de 30 jours de cure, l'indice de plasticité du SG stabilisé avec 8% de chaux diminue de 16.4% jusqu'à 12.9, 10.6 et 9.6% en présence de 2, 4 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$, respectivement, soit une réduction de 50% en présence de 6% du $CaSO_4.2H_2O$ (Fig. 4.4c). En revanche, pour la même période de cure et pour la même teneur en chaux, l'indice de plasticité du SR diminue de 19.6% jusqu'à 16.7, 12.7 et 9.8% en présence de 2, 4 et 6% $CaSO_4.2H_2O$, respectivement, soit une réduction de 100% pour un dosage maximal en $CaSO_4.2H_2O$ (Fig. 4.5c). Kinuthia et al. (1999) ont rapporté que l'interaction entre deux particules d'argile est considérablement affectée par le processus d'échange de cations. Cela est dû à l'augmentation de la concentration de cations qui font entraîner l'augmentation de la distance entre ces particules d'argile, tout en favorisant l'augmentation de la taille des particules d'argile et en affectant la distribution des pores en raison de l'agencement des particules qui conduit à la modification de la consistance du sol traité. D'autre part, la modification de l'indice de plasticité est le résultat du processus de l'échange de cations qui affectent la viscosité du mélange argile-eau. Il est très important de noter que pour les deux types de sols, l'effet du $CaSO_4.2H_2O$ est fortement considérable sur l'indice de plasticité des deux sols argileux non traités que sur celle des mêmes sols traités à la chaux.

4.3.2 Traitement à la chaux en présence du Na_2SO_4

4.3.2.1 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de liquidité

Les Figures 4.6 et 4.7 montrent les résultats de l'effet du Na_2SO_4 sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés à la chaux. En général, un effet marginal a été observé pour la W_L lorsque les échantillons des deux sols argileux non traités sont testés en présence seulement du Na_2SO_4. Cependant, avec la chaux en tant qu'additif, la W_L des échantillons des deux sols argileux étudiés augmente de manière significative avec l'augmentation de la teneur en chaux, de la teneur en Na_2SO_4 et de la période de cure. Par exemple, au bout d'un jour de cure, l'addition de 8% de chaux au SG fait augmenter la W_L de 62.1% jusqu'à 106.4, 123.7 et 130.2% respectivement avec l'addition de 2, 4 et 6% du Na_2SO_4 (Fig. 4.6a). Pour une même classe de sol traité à 6% de chaux, Sivapullaiah et al. (2000) ont observé que la W_L augmente de 68% jusqu'à seulement 70, 73 et 76% en présence de 0.5, 1 et 3% Na_2SO_4, respectivement.

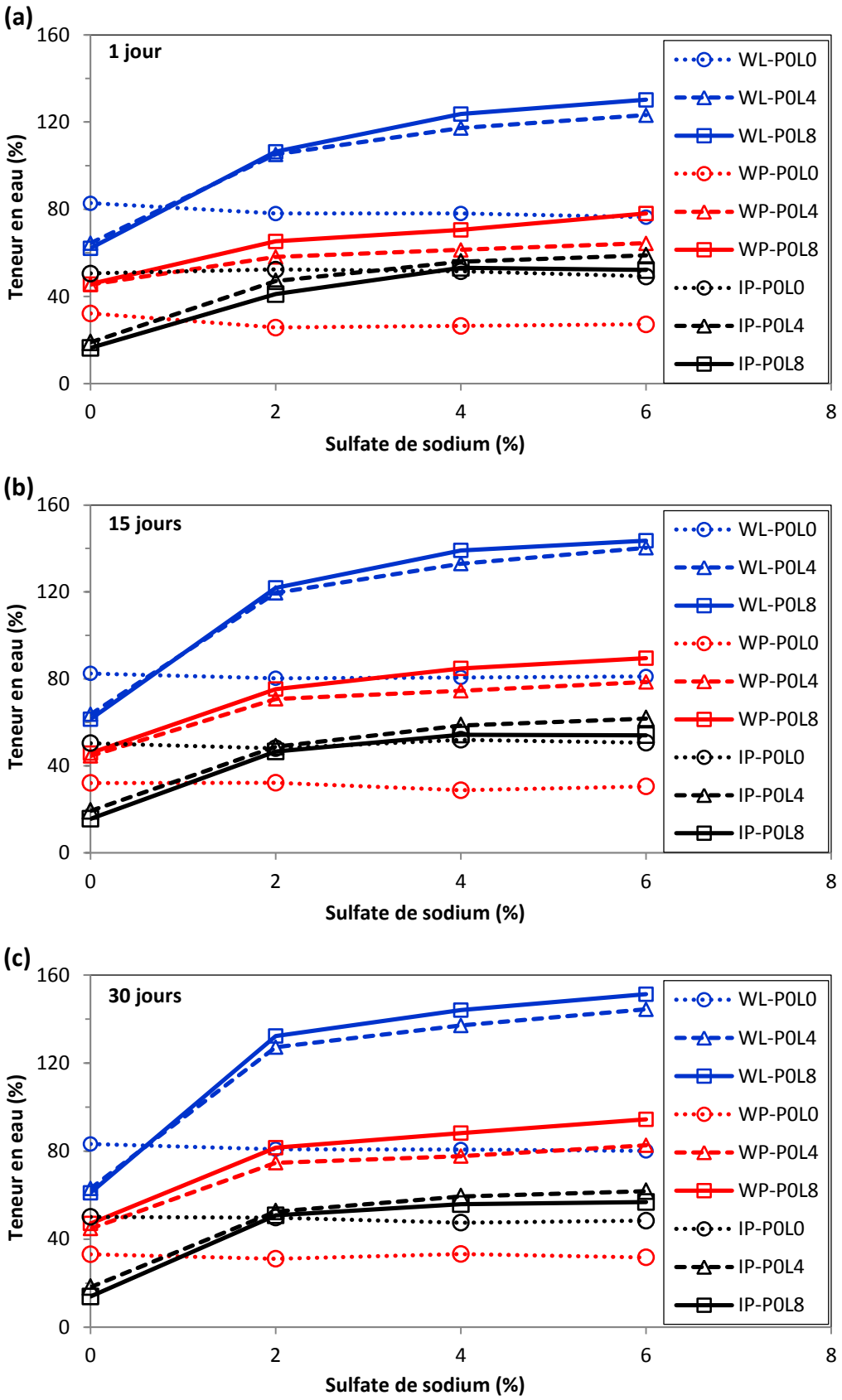


Fig. 4.6 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé à la chaux pour différentes périodes de cure.

Cependant, pour un sol de même classe stabilisé avec 6% de chaux, Kinuthia et al. (1999) ont constaté un comportement inverse où la W_L décroit de 73% jusqu'à 59 et 58% en présence de 1 et 3% de Na_2SO_4, respectivement. D'autre part, pour le cas du SR traité avec 8% de chaux et après un jour de cure, il a été constaté que la W_L augmente de 54.9% jusqu'à 83.3, 85.2 et 87.1% en présence de 2, 4 et 6% du Na_2SO_4, respectivement (Fig. 4.7a). Il est à noter que la W_L des deux sols argileux traités à la chaux a continué à augmenter de plus en plus avec la cure (Figs. 4.6c et 4.7c). Cette augmentation dépend beaucoup plus de la capacité des deux sols argileux traités à absorber de plus de quantité d'ions sulfate (SO_4^{2-}) avec le temps.

4.3.2.2 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de plasticité

Les résultats de l'effet du Na_2SO_4 sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux ont été reportés sur les Figures 4.6 et 4.7. Contrairement à la présence seule du $CaSO_4.2H_2O$, la W_P des deux sols argileux perturbés avec seulement du Na_2SO_4 ne montre qu'une faible variation. On peut conclure que la sensibilité de la W_P à l'effet des sulfates est très prononcée avec le $CaSO_4.2H_2O$ qu'avec le Na_2SO_4. Cela peut être expliqué par l'aptitude des deux sols argileux traités à l'absorption des cations divalents (Ca^{2+}) qu'à l'absorption des cations monovalents (Na^+).

Dans tous les cas, la W_P des échantillons des deux sols argileux traités à la chaux augmente avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4, de la teneur en chaux et de la période de cure. Par exemple, avec 8% de chaux en tant que stabilisant, la W_P du SG des échantillons contenant 6% du Na_2SO_4 augmente de 45.7 à 78.1 et de 47.1 à 94.4% respectivement avec 1 et 30 jours de cure (Fig. 4.6a et c). Pour une même classe de sol traité avec 6% de chaux, Kinuthia et al. (1999) ont constaté que la W_P diminue de 41 jusqu'à 34% en présence de 3% du Na_2SO_4. Cependant, la W_P des échantillons du SR stabilisés avec 8% de chaux, en présence de 6% du Na_2SO_4, augmente de 35.3 à 60% et de 42.7 à 68.1% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.7a et c).

4.3.2.3 Effet du Na_2SO_4 sur l'indice de plasticité

Les changements dans l'indice de plasticité (I_P) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux en présence de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ sont présentés dans les Figures 4.6 et 4.7. On constate que l'indice de plasticité des deux sols argileux non traités n'est pas influencé par la présence du Na_2SO_4. D'autre part, l'indice de plasticité du SG traité avec l'addition de la chaux augmente avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4 et de la période de cure.

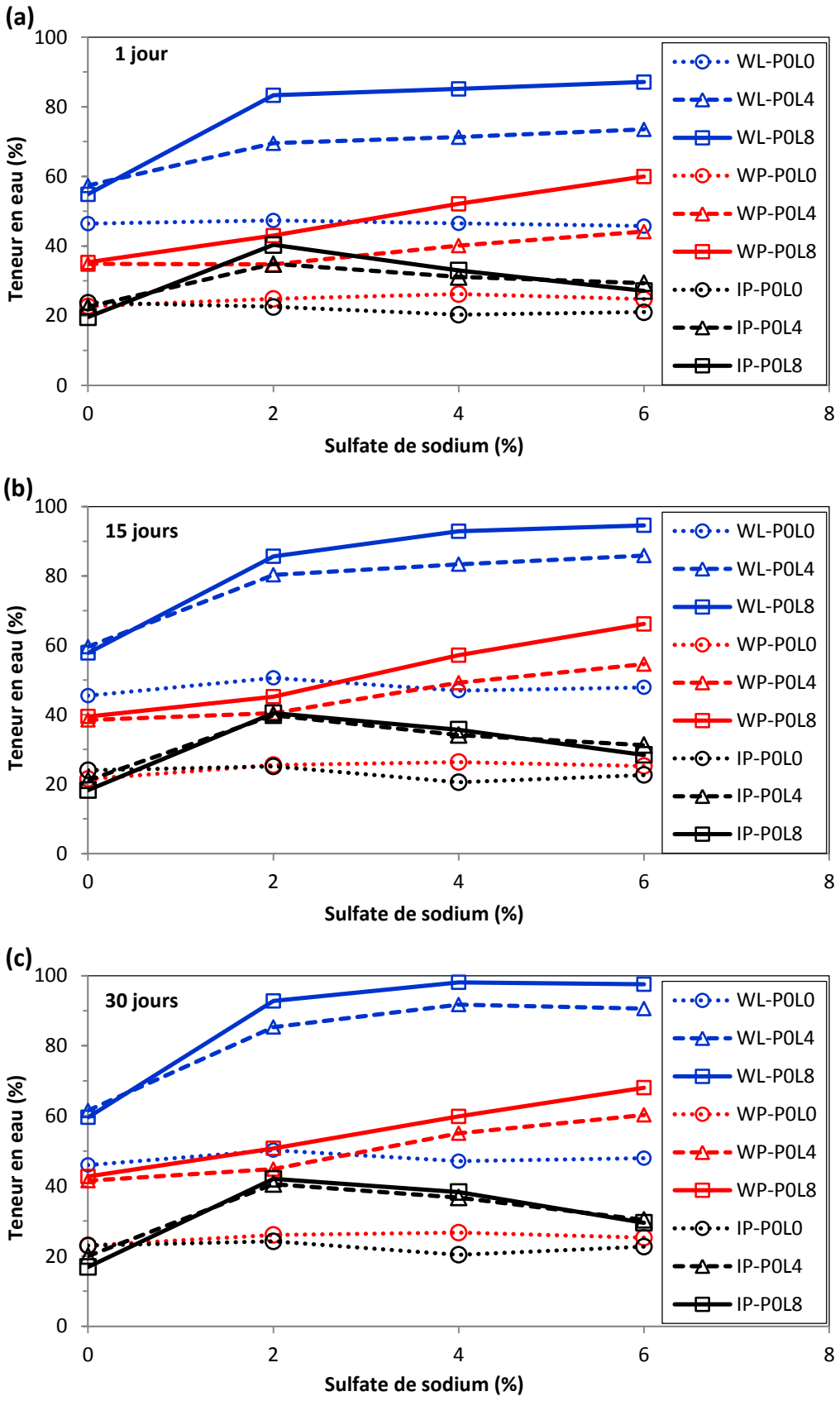


Fig. 4.7 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé à la chaux pour différentes périodes de cure.

Celik et Nalbantoglu (2013) ont rapporté que l'indice de plasticité d'un sol argileux stabilisé avec 5% de chaux diminue de 32 à 15% en présence de 2000 ppm du Na_2SO_4 alors qu'il augmente jusqu'à 34 et 38% en présence de 5000 et 10000 ppm du même sulfate, respectivement. Contrairement au SG, l'indice de plasticité du SR traité à la chaux diminue avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4 tandis qu'il augmente avec la période de cure. Il est à constater qu'en présence du Na_2SO_4 (notamment avec une forte teneur), de grandes valeurs de l'indice de plasticité ont été enregistrées pour les deux types de sols traités. Cela est probablement attribué à la grande surface spécifique des particules d'argile. Cette grande surface a une forte capacité de stockage de l'eau qui est gouvernée probablement par l'échange de cations monovalents tels que les ions sodium venant de l'addition du Na_2SO_4 après dissolution en présence d'eau. Par comparaison, les cations divalents (Ca^{2+}, provenant de la dissolution du $CaSO_4.2H_2O$ et/ou de la chaux) ont l'aptitude de diminuer l'indice de plasticité des deux sols argileux tandis que ceux des monovalents (Na^+, provenant de la dissolution du Na_2SO_4) ont la tendance de le faire augmenter.

4.3.3 Traitement à la PN en présence du $CaSO_4$

4.3.3.1 Effet du $CaSO_4$ sur la limite de liquidité

Les Figures 4.8 et 4.9 illustrent les résultats de l'effet du $CaSO_4.2H_2O$ sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle. Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation de la pouzzolane naturelle en tant que stabilisant, fait diminuer considérablement la W_L des deux sols argileux traités (notamment le cas du SG) notamment avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$, de la teneur en pouzzolane naturelle et de la période de cure. Par exemple, au bout de un jour de cure et avec la présence de 2% du $CaSO_4.2H_2O$, la W_L du SG traité avec 10 et 20% de pouzzolane naturelle diminue de 82.8% jusqu'à 60.6 et 58.4%, respectivement (pour ces mêmes conditions et après 30 jours de cure, ces deux dernières valeurs diminuent encore plus jusqu'à 49.1 et 46.9% respectivement avec l'addition de 10 et 20% de pouzzolane naturelle). Alors qu'après un jour de cure en présence de 6% du $CaSO_4.2H_2O$, la W_L du même sol (SG) diminue encore plus de jusqu'à 57.9 et 54.7% respectivement avec l'addition de 10 et 20% de pouzzolane naturelle (pour ces mêmes conditions et après 30 jours de cure, ces deux dernières valeurs diminuent encore plus jusqu'à 45 et 43.7% respectivement avec l'addition de 10 et 20% de pouzzolane naturelle).

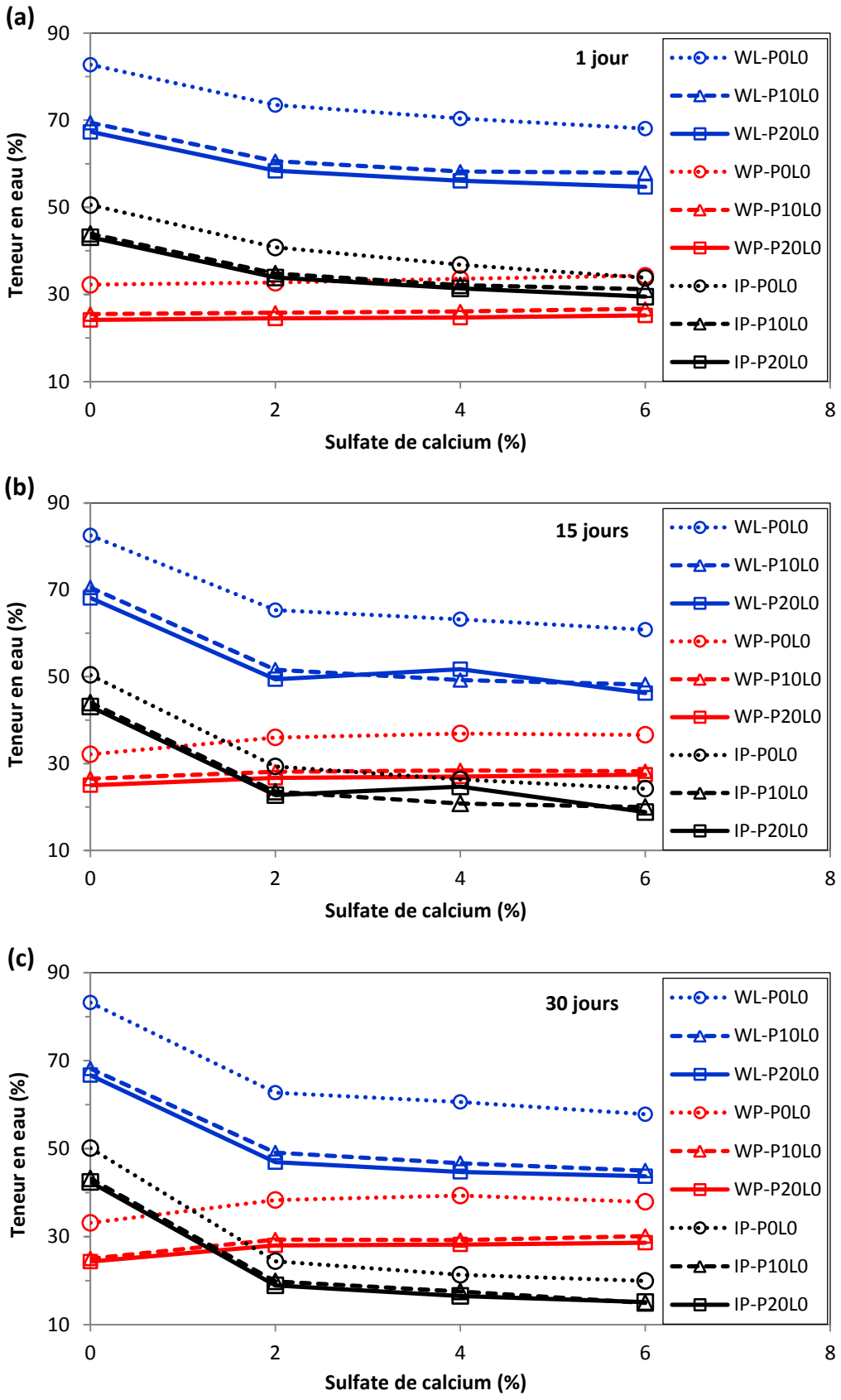


Fig. 4.8 — Effet de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé par l'utilisation de la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

En effet, les valeurs les plus élevées de la W_L sont achevées lorsque la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ additionnée est supérieure à 2%. Cependant, il y a un changement négligeable dans la valeur de la W_L des échantillons du SG contenant 2% du $CaSO_4.2H_2O$ et traités avec la pouzzolane naturelle par rapport aux échantillons du même sol traité sans présence du $CaSO_4.2H_2O$. En général, quelque soit la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ utilisée lors de différentes périodes de cure, la différence dans les valeurs de la W_L entre la chaux et la pouzzolane naturelle est plus prononcée avec le SR qu'avec le SG. Ceci peut être expliqué par le comportement du SR qui a une faible plasticité et une composition minéralogique différente à celle du SG.

4.3.3.2 Effet du $CaSO_4$ sur la limite de plasticité

Les résultats de l'effet du $CaSO_4.2H_2O$ sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle sont présentés dans les Figures 4.8 et 4.9. Quelque soit la teneur en pouzzolane naturelle utilisée, la W_P du SR augmente légèrement avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ additionnée et de la période de cure. Alors que la W_P du GS augmente avec la période de cure mais elle semble d'être constante avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ additionnée. Il convient de signaler que la W_P des deux sols argileux traités avec l'addition de la pouzzolane naturelle n'est pas vraiment influencée par la présence du $CaSO_4.2H_2O$.

4.3.3.3 Effet du $CaSO_4$ sur l'indice de plasticité

Les Figures 4.8 et 4.9 illustrent les changements dans l'indice de plasticité (I_P) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle en présence de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$. L'indice de plasticité des deux sols argileux stabilisés diminue avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$, de la teneur en pouzzolane naturelle et de la période de cure. Par exemple, après 1 jour de cure, l'indice de plasticité du SG stabilisé avec 20% de pouzzolane naturelle diminue de 50.5% jusqu'à 33.9 et 29.5% en présence de 2 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$, respectivement (pour ces mêmes conditions et après 30 jours de cure, ces deux dernières valeurs diminuent encore plus jusqu'à 18.9 et 15.1% respectivement avec 2 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$) (Fig. 4.8a). En revanche, après la même période de cure et pour la même teneur en pouzzolane naturelle, l'indice de plasticité du SR décroit de 23.8% jusqu'à 18.4 et 14.2% en présence de 2 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$, respectivement (pour ces mêmes conditions et après 30 jours de cure, ces deux dernières valeurs diminuent encore plus jusqu'à 16.5 et 6.5% respectivement avec 2 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$) (Fig. 4.9a).

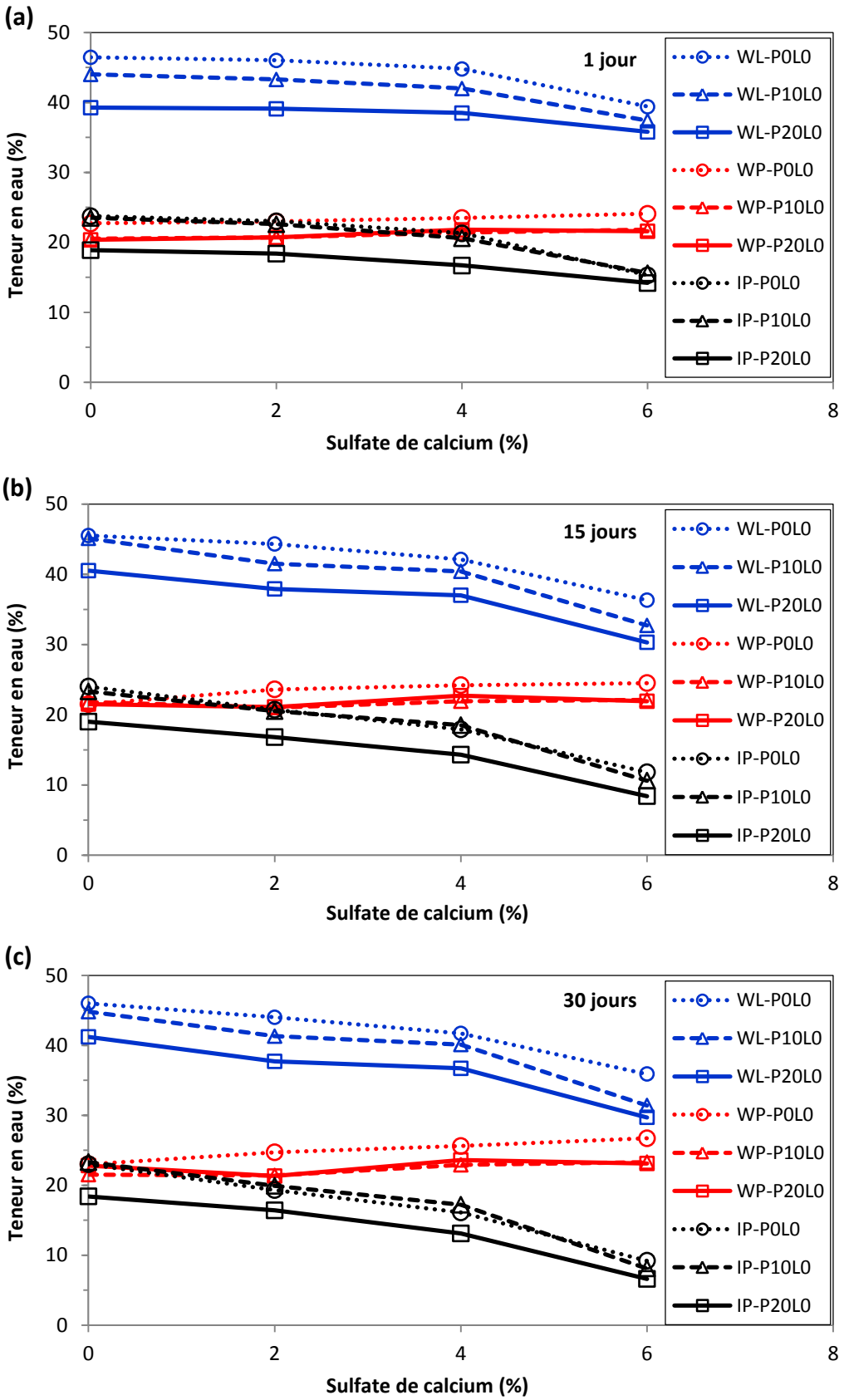


Fig. 4.9 — Effet de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé par l'utilisation de la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

Il convient de noter que l'utilisation du $CaSO_4.2H_2O$ fait réduire considérablement l'indice de plasticité des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle en faisant améliorer leur ouvrabilité. D'après Yilmaz et Civelekoglu (2009), l'indice de plasticité d'une bentonite diminue de 186.9% jusqu'à 139.5 et 120.8% pour l'addition de 2.5 et 10% de gypse, respectivement. Ceci est dû au remplacement des ions monovalents par des ions calcium (venant de l'addition $CaSO_4.2H_2O$) en provoquant une réduction de l'épaisseur de la double couche diffuse et conduisant à la diminution de la W_L, par conséquent, la diminution de l'indice de plasticité. A titre de comparaison, au bout de 30 jours de cure, les échantillons du SR traité avec 20% de pouzzolane naturelle seule ou mélangé avec 6% du $CaSO_4.2H_2O$ développent des valeurs de l'indice de plasticité bien plus élevées que celles développées par les mêmes échantillons du sol stabilisé avec 8% de chaux seule ou en présence de 6% du $CaSO_4.2H_2O$.

4.3.4 Traitement à la PN en présence du Na_2SO_4

4.3.4.1 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de liquidité

Les résultats de l'effet du Na_2SO_4 sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle sont présentés dans les Figures 4.10 et 4.11. L'utilisation de la pouzzolane naturelle en tant que stabilisant fait augmenter considérablement la W_L du SG avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4 et de la période de cure. Cependant, la variation de la W_L du SR semble d'être constante quand la teneur en Na_2SO_4 augmente alors qu'elle diminue légèrement avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle additionnée et augmente avec la période de cure. En général, quelque soit la teneur en Na_2SO_4 lors de différentes périodes de cure, la différence dans les valeurs de la W_L entre la chaux et la pouzzolane naturelle est plus prononcée avec le SG qu'avec le SR.

4.3.4.2 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de plasticité

Les résultats de l'effet du Na_2SO_4 sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle sont présentés dans les Figures 4.10 et 4.11. En général, la présence du Na_2SO_4 fait augmenter la W_P du SR mais fait diminuer celle du SG. Quelque soit la période de cure, les valeurs de la W_P du SG traité avec l'addition de la pouzzolane naturelle en présence de différentes teneurs en Na_2SO_4 sont presque comparables à celles du même sol traité sans présence du Na_2SO_4. Cependant, pour le cas du SR traité avec le même additif (PN), les valeurs de la W_L sont nettement supérieures à celles du même sol traité sans présence du Na_2SO_4. Il est indispensable de signaler que la W_P du SG traité avec l'addition de la pouzzolane naturelle n'a subit qu'une faible influence en présence du Na_2SO_4.

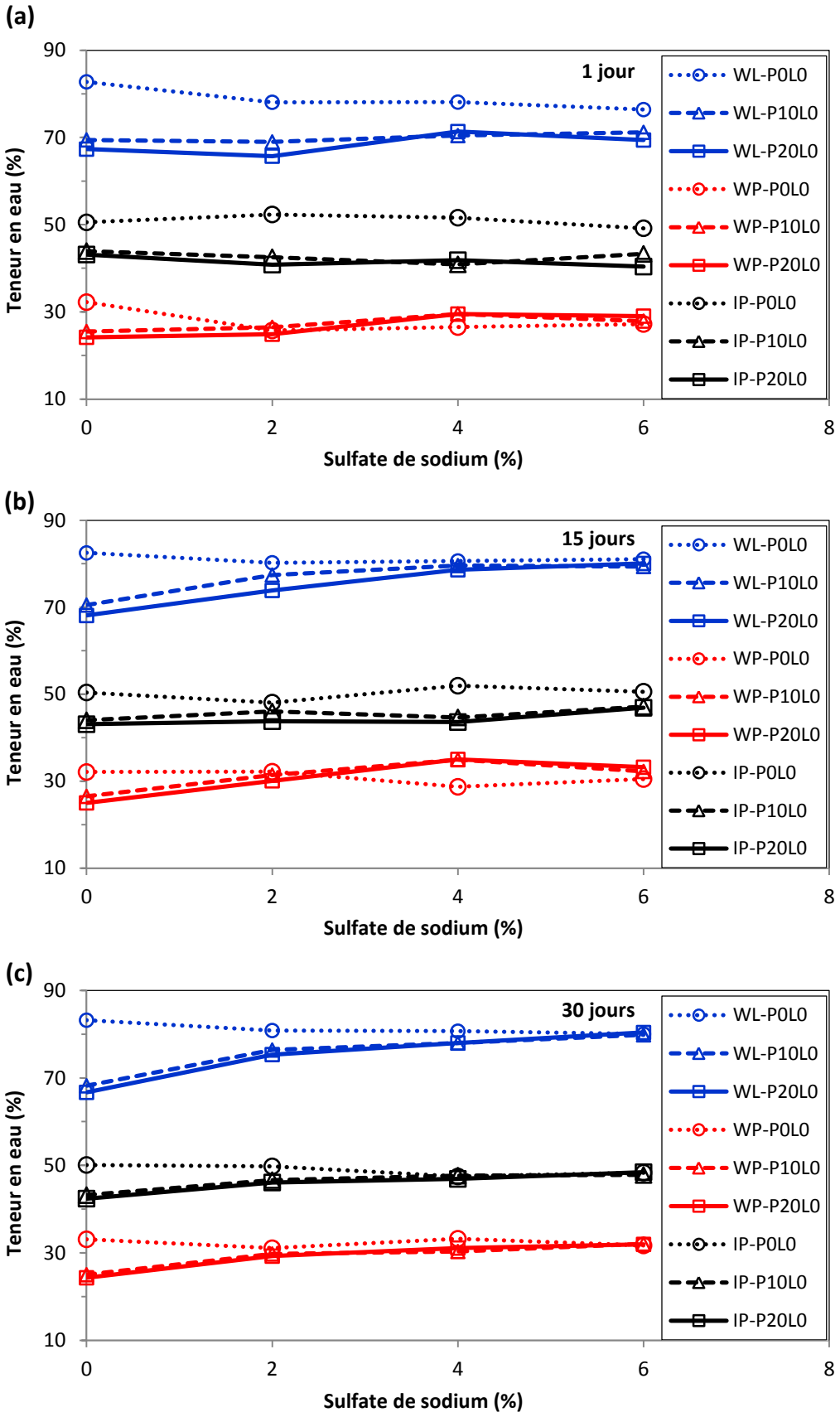


Fig. 4.10 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé par l'utilisation de la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

4.3.4.3 Effet du Na_2SO_4 sur l'indice de plasticité

Les Figures 4.10 et 4.11 illustrent les changements dans l'indice de plasticité (I_P) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle en présence de différentes teneurs en Na_2SO_4. Généralement, il s'avère que l'utilisation de la pouzzolane naturelle en présence de différentes teneurs en Na_2SO_4 fait apporter une légère diminution dans l'indice de plasticité des deux sols argileux stabilisés. Après 1 et 15 jours de cure, les valeurs de l'indice de plasticité du SG traité avec l'addition de la pouzzolane naturelle en présence de différentes teneurs en Na_2SO_4 sont presque comparables à celles du même sol traité sans présence du Na_2SO_4. Tandis qu'après 30 jours de cure, les valeurs de l'indice de plasticité du même sol (SG) traité avec le même additif (PN) en présence de différentes teneurs en Na_2SO_4 sont bien plus grandes par rapport à celles du même sol traité sans présence du Na_2SO_4. Il est à noter que l'indice de plasticité du SG traité avec l'addition de la pouzzolane naturelle n'est pas vraiment influencé par la présence du Na_2SO_4. D'autre part, pour le cas du SR traité avec le même additif (PN), les valeurs de la l'indice de plasticité sont nettement supérieures à celles du même sol traité sans présence du Na_2SO_4.

Il est clair de constater que les sols argileux traités avec l'addition de la pouzzolane naturelle ont la tendance à réagir positivement et aussi bien fortement avec l'addition du $CaSO_4.2H_2O$ qu'avec l'addition du Na_2SO_4 additionné. En outre, la différence dans les valeurs de l'indice de plasticité entre le Na_2SO_4 et $CaSO_4.2H_2O$ sont plus prononcées avec du SG qu'avec du SR.

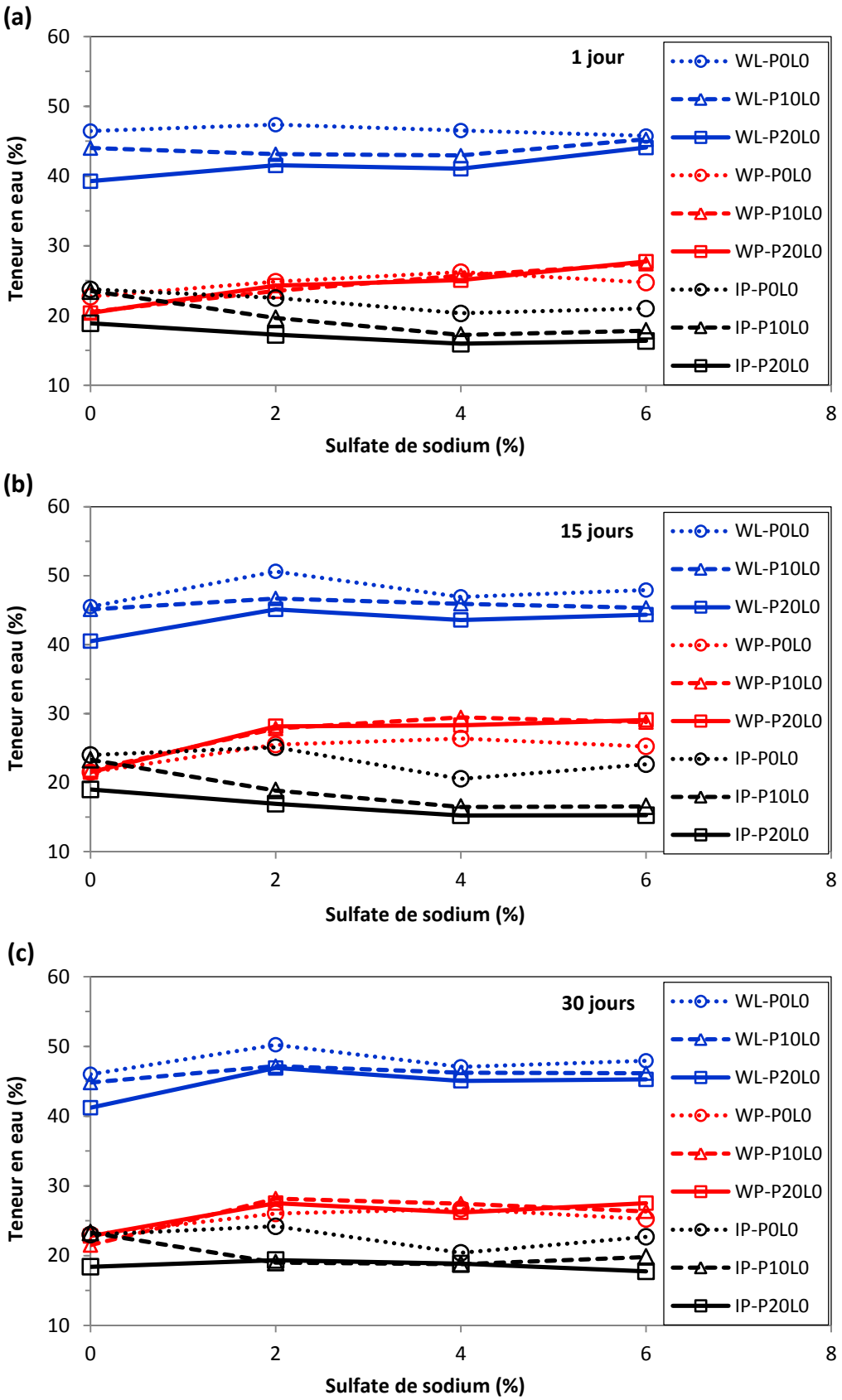


Fig. 4.11 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé par l'utilisation de la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

4.3.5 Traitement combiné de L-PN en présence du $CaSO_4$

4.3.5.1 Effet du $CaSO_4$ sur la limite de liquidité

Les Figures 4.12 et 4.13 illustrent les résultats de l'effet du $CaSO_4.2H_2O$ sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle. En général, la forte diminution des valeurs de la W_L est obtenue lorsque la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées. Cependant, avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle, les échantillons des deux sols argileux stabilisés en présence de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ montrent une légère diminution des valeurs de la W_L par rapport aux échantillons des deux sols traités sans présence du $CaSO_4.2H_2O$. Par exemple, avec la combinaison 20%NP+8%L en tant qu'additif, la W_L des échantillons du SG contenant 6% du $CaSO_4.2H_2O$ diminue de 62.2 jusqu'à 59.6% et de 61 jusqu'à 58.2% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.12a et c). Pour la même combinaison et la même teneur en $CaSO_4.2H_2O$, la W_L du SR diminue de 54.9 jusqu'à 51.7% et de 58.1 jusqu'à 47.8% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.13a et c). Il est à constater que la réduction des valeurs de la W_L avec la teneur croissante du $CaSO_4.2H_2O$ et de la période de cure est plus prononcée avec le SR qu'avec le SG.

4.3.5.2 Effet du $CaSO_4$ sur la limite de plasticité

Les résultats de l'effet du $CaSO_4.2H_2O$ sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sont présentés dans les Figures 4.12 et 4.13. Il est clair de voir que la W_P des échantillons des deux sols argileux traités augmente avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$, de la teneur en chaux-pouzzolane naturelle et de la période de cure. En effet, l'addition de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle aux échantillons du SG contenant du $CaSO_4.2H_2O$ montre une augmentation de la W_P par rapport aux échantillons stabilisés en absence du $CaSO_4.2H_2O$. Considérant que, les valeurs de la W_P des échantillons du SR traités avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sans présence du $CaSO_4.2H_2O$ sont très élevées par rapport aux échantillons contenant du $CaSO_4.2H_2O$. Par ailleurs, l'effet combiné de chaux-pouzzolane naturelle fait augmenter la W_L d'une façon significative par rapport à l'utilisation de la chaux ou de la pouzzolane naturelle seule.

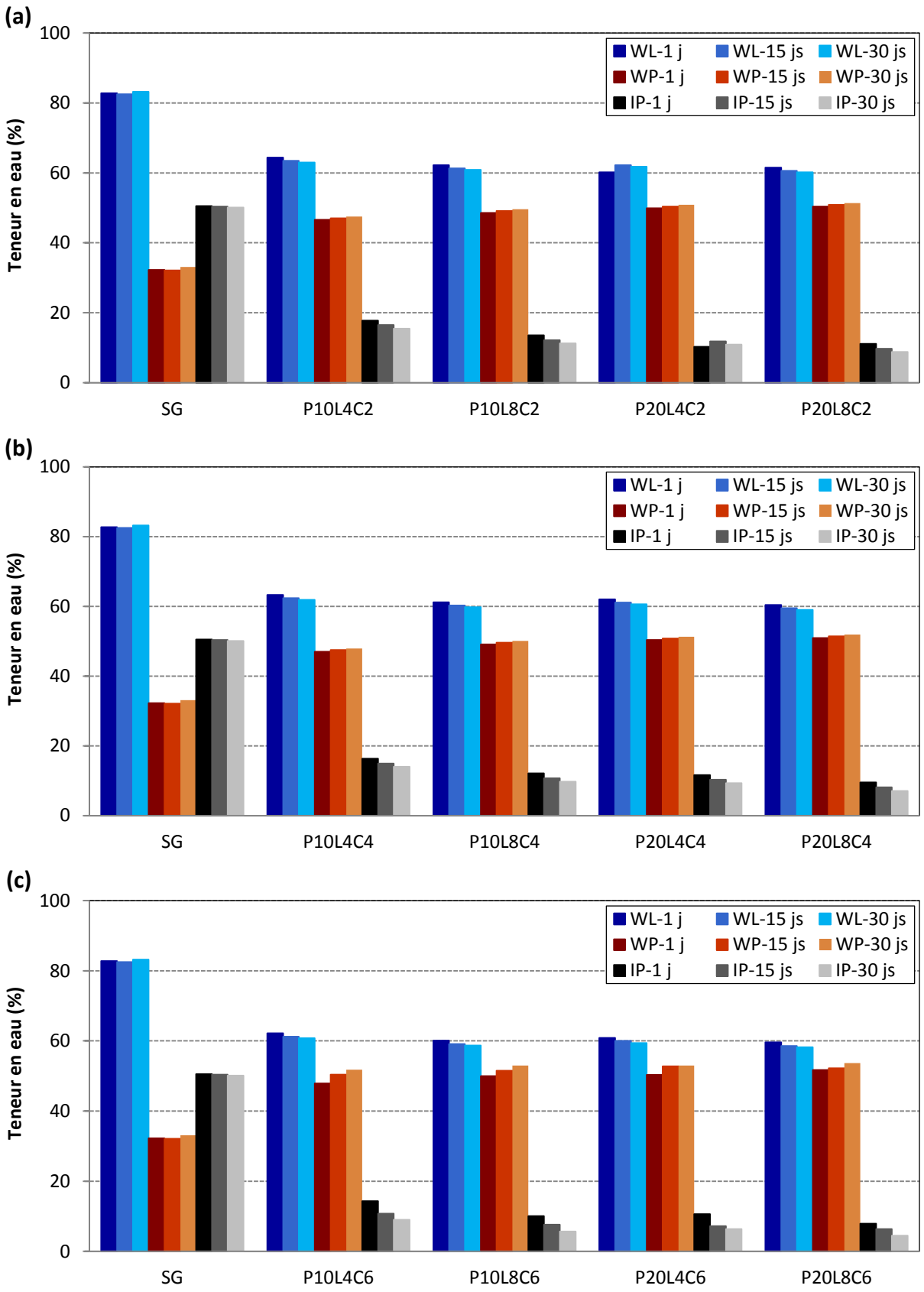


Fig. 4.12 — Effet de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé par l'utilisation la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

4.3.5.3 Effet du $CaSO_4$ sur l'indice de plasticité

Les Figures 4.12 et 4.13 illustrent les changements dans l'indice de plasticité (I_P) des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en présence de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$. Il s'avère que les fortes réductions dans les valeurs de l'indice de plasticité des échantillons des deux sols argileux stabilisées sont obtenues avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle lors de la cure en présence de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$. En outre, une diminution significative de l'indice de plasticité des échantillons des deux sols argileux a été observée avec la cure et notamment avec la teneur croissante du $CaSO_4.2H_2O$. Par exemple, pour le cas du SG stabilisé avec 10% de NP et 4% de chaux et à près 1 jour de cure, l'indice de plasticité diminue de 19.2% jusqu'à 17.9, 16.3 et 14.3% respectivement avec la présence de 2, 4 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$ (Fig. 4.12). En revanche, pour le même sol et après 30 jours de cure, l'indice de plasticité diminue de 16.3% jusqu'à 15.5, 14 et 8.9% en présence de 2, 4 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$, respectivement (Fig. 4.12). En outre, la diminution de l'indice de plasticité des échantillons des deux sols argileux avec la teneur croissante du $CaSO_4.2H_2O$ et de la période de cure est considérablement importante lorsque la teneur en chaux-pouzzolane naturelle augmente. Par exemple, pour le cas du SG stabilisée avec 10% de pouzzolane naturelle et 4% de chaux et après 30 jours de cure, l'indice de plasticité diminue de 16.3% jusqu'à 15.5, 14 et 8.9% avec l'addition de 2, 4 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$, respectivement (Fig. 4.12). En revanche, pour le même sol traité avec la combinaison de 20% de pouzzolane naturelle et 8% de chaux et pour la même période de cure, l'indice de plasticité diminue de 10.9% jusqu'à 8.8, 7.2 et 4.5% respectivement avec la présence de 2, 4 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$ (Fig. 4.12). En général, les valeurs l'indice de plasticité des échantillons des deux sols argileux traités avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en présence du $CaSO_4.2H_2O$ sont très élevées par rapport aux échantillons traités en absence du $CaSO_4.2H_2O$.

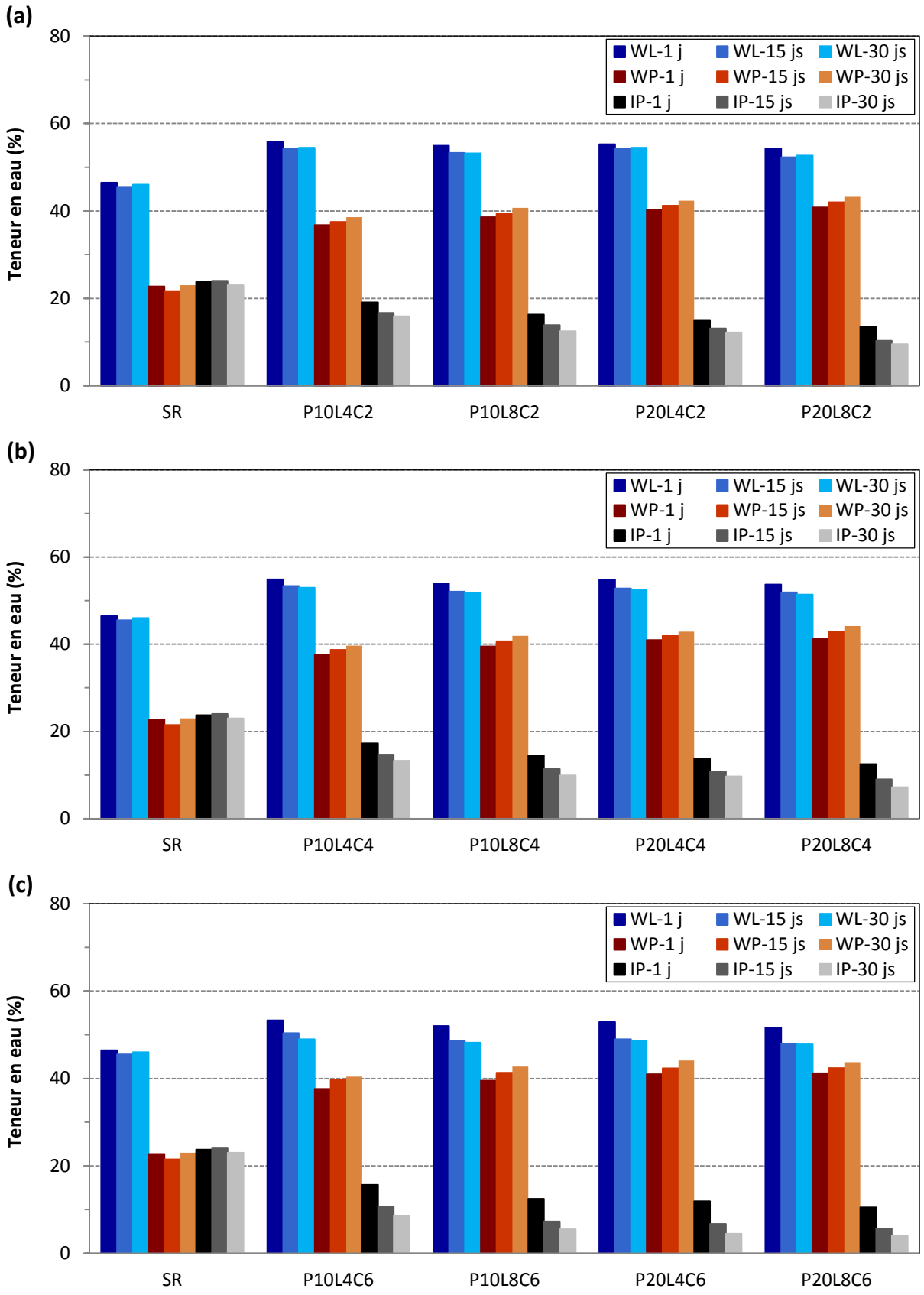


Fig. 4.13 — Effet de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé par l'utilisation la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

4.3.6 Traitement combiné de L-PN en présence du Na_2SO_4

4.3.6.1 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de liquidité

Les résultats de l'effet du Na_2SO_4 sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sont présentés sur les Figures 4.14 et 4.15. En général, la plus forte diminution de la W_L est obtenue lorsque la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées. Cependant, la W_L des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle augmente avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4, la teneur en chaux-pouzzolane naturelle et de la période de cure, à savoir que le SR développe des valeurs bien plus grandes que celles développées par le SG (Figs. 4.14 et 4.15). Il est clair de constater que l'effet du Na_2SO_4 sur la W_L des échantillons des deux sols argileux traités avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est négligeable par rapport aux mêmes échantillons de sols traités à la chaux seule. Par comparaison, le $CaSO_4.2H_2O$ fait réduire la W_L des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle alors que le Na_2SO_4 fait l'augmenter.

4.3.6.2 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de plasticité

Les résultats de l'effet du Na_2SO_4 sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sont présentés dans les Figures 4.14 et 4.15. En présence du Na_2SO_4, la W_P des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle augmente avec la teneur en Na_2SO_4, la teneur en chaux-pouzzolane naturelle, et la période de cure (Figs. 4.14 et 4.15). Par comparaison, il est à observer que l'augmentation de la W_P des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est plus prononcée avec le Na_2SO_4 qu'avec le $CaSO_4.2H_2O$. Par exemple, après 30 jours de cure, la W_P du SG stabilisé avec la combinaison de 20% de pouzzolane naturelle et 8% de chaux augmente de 50.1% jusqu'à 51.4, 51.9 et 53.7% en présence de 2, 4 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$, respectivement. En revanche, pour le même sol stabilisé avec la même combinaison et pour la même période de cure, la W_P augmente de 50.1% jusqu'à 81.3, 89.8 et 93.6% en présence de 2, 4 et 6% du Na_2SO_4, respectivement.

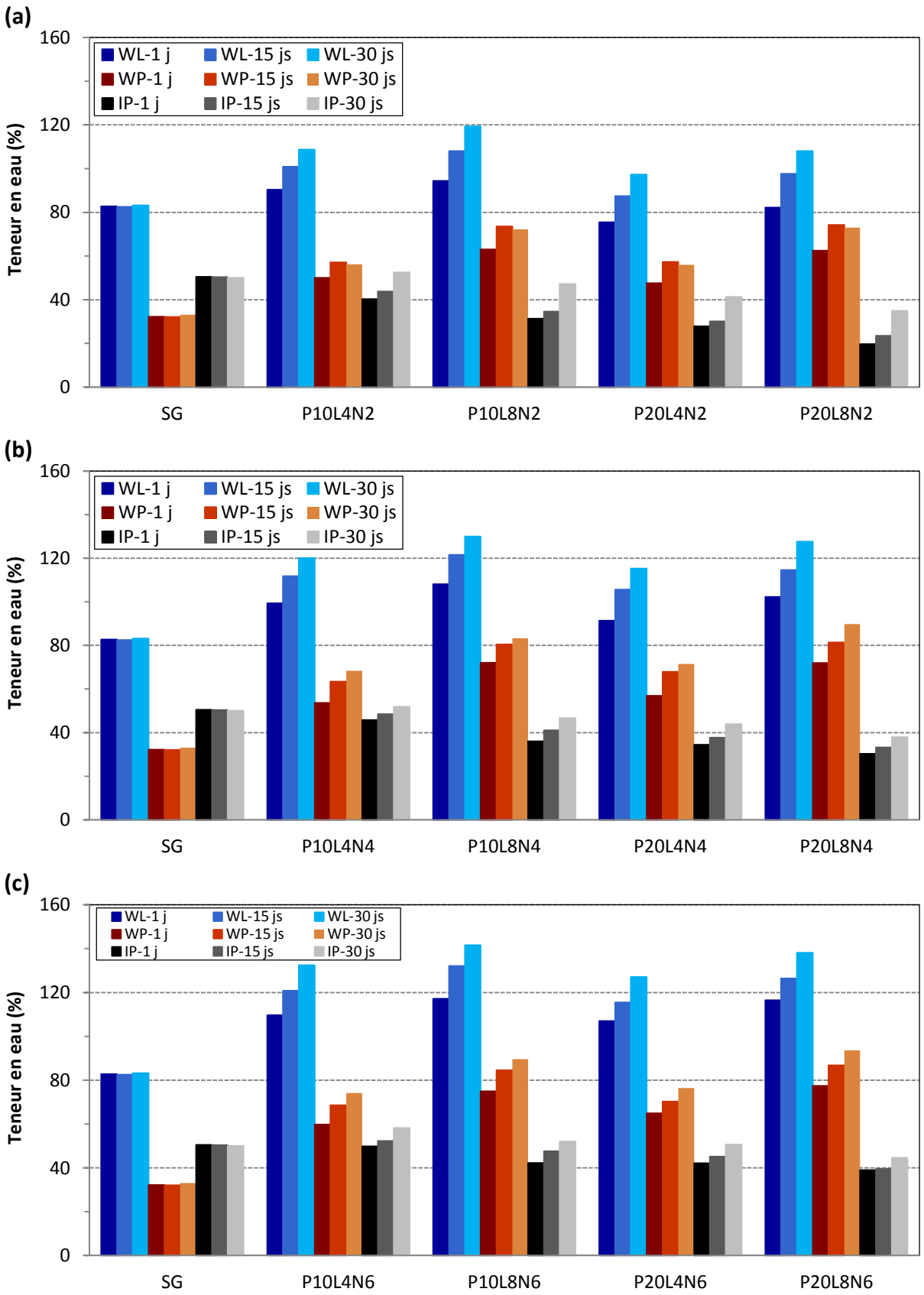


Fig. 4.14 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé par l'utilisation la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

4.3.6.3 Effet du Na_2SO_4 sur l'indice de plasticité

Les Figures 4.14 et 4.15 illustrent les changements dans l'indice de plasticité (I_P) des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en présence de différentes teneurs en Na_2SO_4. L'utilisation de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en tant qu'additif en présence du Na_2SO_4 affecte fortement l'indice de plasticité des deux sols argileux traités. En effet, l'indice de plasticité du SG diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux-pouzzolane naturelle alors qu'il augmente avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4 et de la période de cure. Par exemple, dans le cas du SG et après 30 jours de cure, la combinaison de 10% de pouzzolane naturelle et 4% de chaux fait augmenter de manière significative l'indice de plasticité de 16.3% jusqu'à 48, 51.8 et 58.2% en présence de 2, 4 et 6% du Na_2SO_4, respectivement (Fig. 4.14). Cependant, pour le même sol et pour la même période de cure, la combinaison de 20% de pouzzolane naturelle et 8% de chaux fait augmenter l'indice de plasticité encore plus de 10.9% jusqu'à 26.7, 37.9 et 44.6% en présence de 2, 4 et 6% du Na_2SO_4, respectivement (Fig. 4.14). En revanche, pour le cas du SR, l'indice de plasticité diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux-pouzzolane naturelle et de la teneur en Na_2SO_4 alors qu'il augmente avec la période de cure. Par exemple, dans le cas du SR et après 30 jours de cure, la combinaison de 10% de pouzzolane naturelle et 4% de chaux fait augmenter l'indice de plasticité de 17.6% jusqu'à 32.4, 26.2 et 22.4% en présence de 2, 4 et 6% Na_2SO_4, respectivement (Fig. 4.15). Cependant, pour le même sol et pour la même période de cure, la combinaison de 20% de pouzzolane naturelle et 8% de chaux fait augmenter l'indice de plasticité encore plus de 11.1% jusqu'à 32.9, 28.4 et 22.9% en présence de 2, 4 et 6% du Na_2SO_4, respectivement (Fig. 4.15). Les résultats obtenus montrent que la présence du Na_2SO_4 provoque un effet presque marginal sur l'indice de plasticité du SR alors qu'il engendre un effet indésirable sur l'indice de plasticité du SG. Il est très clair de constater que dans tous les cas de traitement, les différences dans les valeurs de l'indice de plasticité entre le Na_2SO_4 et le $CaSO_4.2H_2O$ sont plus prononcées avec le SG qu'avec le SR. En général, l'amélioration de la consistance des deux sols argileux stabilisés dépend du type et de la teneur en additif ajouté, du type et de la teneur en sulfate utilisé, de la période de cure et enfin de la composition minéralogique du sol stabilisé.

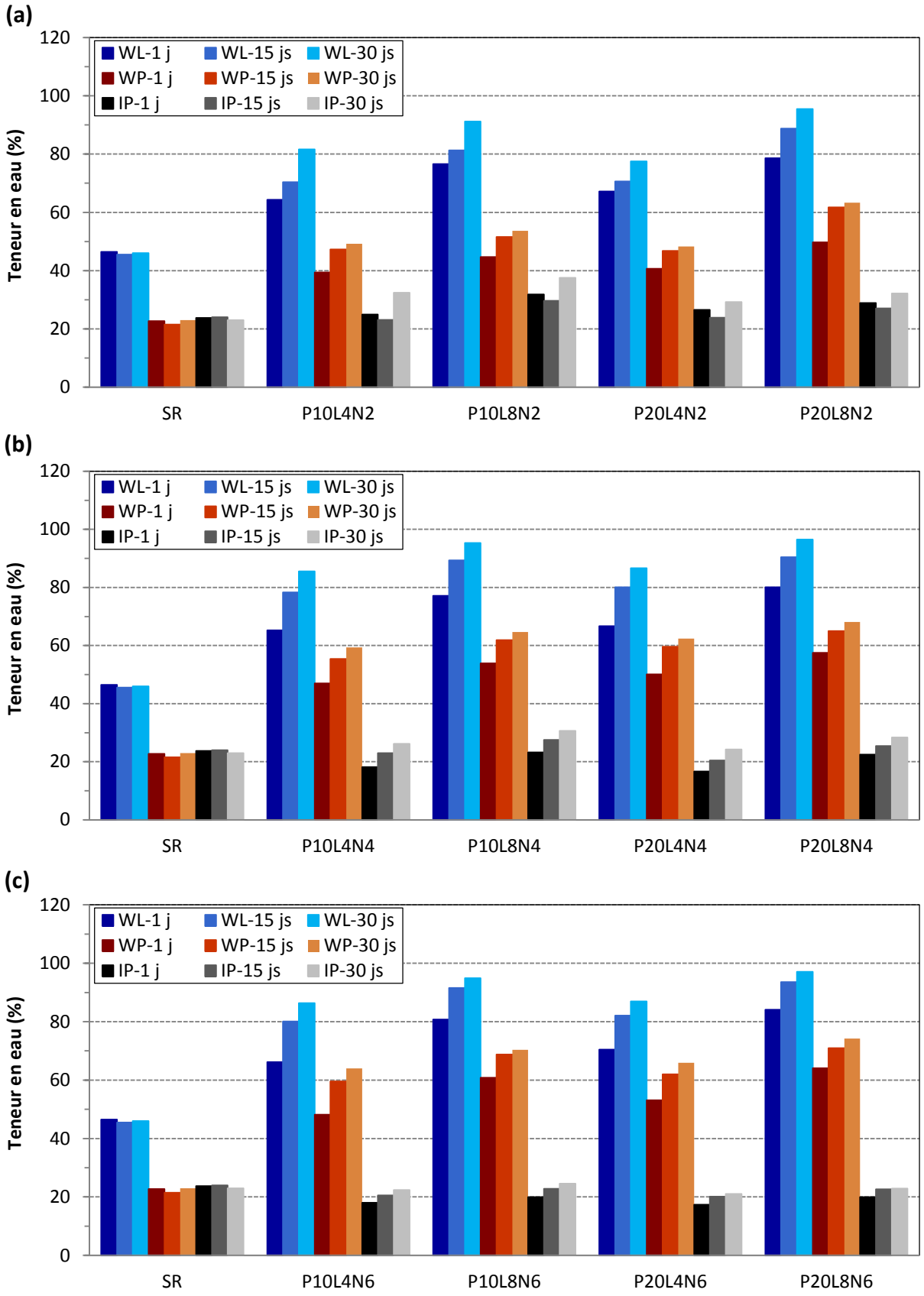


Fig. 4.15 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé par l'utilisation la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

4.4 Conclusion

De nombreux essais ont été entrepris au laboratoire en vue d'étudier les différents effets apportés par la présence des sulfates ($CaSO_4.2H_2O$ et Na_2SO_4) sur les limites d'Atterberg (W_L, W_P et I_P) des deux sols argileux (SG et SR) traités par l'utilisation de la chaux (L), de la pouzzolane naturelle (PN) et de leur combinaison (L-PN). En se basant sur les résultats des tests effectués, les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- La W_L des échantillons des deux sols argileux traités diminue avec la teneur en chaux additionnée alors qu'elle augmente avec la période de cure. De plus, la plus forte diminution des valeurs de la W_L est obtenue lorsque la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées. Cependant, l'addition de la pouzzolane naturelle seule n'importe qu'un effet marginal sur la W_L par rapport à l'addition de la chaux.
- L'addition de la pouzzolane naturelle seule provoque une réduction négligeable dans les valeurs de la W_P. Contrairement à l'utilisation de la pouzzolane naturelle seule, des grandes valeurs de la W_P ont été achevées pour les deux sols argileux étudiés où elle augmente avec la période de cure et également avec l'augmentation de la teneur en chaux ou combinée avec la pouzzolane naturelle.
- L'addition de la pouzzolane naturelle aux sols argileux fait réduire légèrement leur indice de plasticité. Cependant, il existe une diminution significative dans les valeurs de l'indice de plasticité des deux sols argileux étudiés lorsque la chaux est utilisée en tant qu'additif. En outre, une nouvelle baisse des valeurs de l'indice de plasticité est rapportée avec la combinaison des deux.
- La W_L des deux sols argileux non traités diminue considérablement avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ et de la période de cure alors qu'il y a un effet marginal en présence seule du Na_2SO_4.
- Le Na_2SO_4 fait augmenter d'une façon significative la W_L des deux sols argileux traités à la chaux ou avec la chaux-PN alors qu'elle diminue en présence du $CaSO_4.2H_2O$. De plus, la W_L des deux sols argileux traités à la chaux ou avec la chaux-PN en présence du Na_2SO_4 augmente d'une façon considérable avec l'augmentation de la teneur en chaux (ou chaux-PN) additionnée et de la période de cure. Contrairement à la présence du Na_2SO_4, la W_L diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux additionnée et de la période de cure si une fois le $CaSO_4.2H_2O$ est présent.
- Le $CaSO_4.2H_2O$ fait diminuer la W_L des deux sols argileux traités avec l'addition de pouzzolane naturelle notamment avec la période de cure. En revanche, en présence du

Na_2SO_4, la W_L des mêmes sols augmente fortement avec l'augmentation de la période de cure alors qu'elle diminue avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle.

- Quelque soit la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ additionnée pour différentes périodes de cure, les différences dans les valeurs de la W_L entre la chaux et la pouzzolane naturelle sont plus prononcées avec le SR qu'avec le SG alors que les différences dans les valeurs de la même propriété (W_L) entre les deux mêmes additifs (chaux et PN) sont plus prononcées avec le SG qu'avec le SR.
- Quelque soit la teneur et le type du sulfate utilisé, la W_P des deux sols argileux stabilisés augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux ou chaux-PN, de la teneur en sulfate ajouté et de la période de cure.
- L'augmentation de la W_P des deux sols argileux traités à la chaux ou avec la chaux-NP est plus prononcée avec le Na_2SO_4 qu'avec le $CaSO_4.2H_2O$. En outre, les effets causés par ces deux types de sulfates sur la W_P sont négligeables lorsque la pouzzolane naturelle est utilisée toute seule en tant que stabilisant.
- La présence du $CaSO_4.2H_2O$ dans les deux sols argileux traités avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison fait réduire considérablement leur indice de plasticité. Contrairement au $CaSO_4.2H_2O$, la présence du Na_2SO_4 fait augmenter leur indice de plasticité.
- Les augmentations et les diminutions de l'indice de plasticité dépendent de plusieurs facteurs à savoir : la teneur et le type de l'additif utilisé, la teneur et le type du sulfate en présence, la période de cure (la durée d'exposition aux sulfates) et la composition minéralogique des sols 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 (Ca^{2+} venant de l'addition de la chaux ou du $CaSO_4.2H_2O$) produisent des effets bénéfiques alors que les ions sodium (Na^+, venant de l'addition du Na_2SO_4) apportent des effets indésirables sur les limites d'Atterberg des deux sols argileux stabilisés.

Chapitre 5

Effet des Sulfates sur la Résistance à la Compression non Confinée

5.1. Introduction
5.2. Résistance à la compression des sols traités sans sulfates
5.3. Résistance à la compression des sols traités avec sulfates
5.4. Mécanismes de stabilisation et d'altération de la résistance
5.5. Conclusion

5.1 Introduction

L'utilisation des remblais dans le domaine de la construction (routes, plateformes aéroportuaires, plateformes des bâtiments…etc.) nécessite plus souvent une amélioration chimique (par des additifs minéraux) de leur résistance en vue d'augmenter la capacité portante et de minimiser, ou voire éliminer, les tassements et la compressibilité des sols à utiliser en tant que matériau de construction. Cependant, ces sols améliorés soufrent d'un grand problème qui est lié à la formation de nouvelles phases minérales extrêmement expansives comme l'ettringite favorisée par la présence des sulfates. Ce minéral d'ettringite peut intervenir plus souvent à très long terme pour détériorer la résistance des sols améliorés et par conséquent la stabilité de l'ouvrage. Dans ce chapitre, nous allons analyser, interpréter et comparer les résultats des effets apportés par l'utilisation de différentes teneurs en sulfate monovalent (sulfate de sodium anhydre, Na_2SO_4) et divalent (sulfate de calcium hydraté, $CaSO_4.2H_2O$) sur la résistance à la compression non confinée de deux sols argileux traités avec l'addition de différentes proportions de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison en fonction de la période de cure. De plus, des essais de diffraction par des rayons X (DRX) et de microscopie électronique à balayage (MEB) ont été effectués afin de faire une investigation concernant les différents changements apportés par les additifs et les sulfates utilisés sur la minéralogie et la microstructure des deux sols stabilisés.

5.2 Résistance à la compression des sols traités sans sulfates

Les résultats de l'effet apporté par l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sur la résistance à la compression non confinée, la minéralogie et la microstructure des deux sols argileux stabilisés sans présence des sulfates sont présentés dans les Figures 5.1–5.8.

5.2.1 Effet de la chaux

Les résultats de l'effet apporté par l'addition de la chaux sur la résistance à la compression non confinée des deux sols argileux étudiés sont présentés sur la Figure 5.1. L'addition de la chaux en tant qu'additif fait augmenter la résistance à la compression des échantillons de deux sols argileux stabilisés. Ces résultats sont en parfaite concordance avec ceux obtenus par plusieurs chercheurs (Hossain et al., 2007; Ola, 1977; Rahman, 1986; George et al., 1992; Gay and Schad, 2000; Kavak et al., 2007; Manasseh and Olufemi, 2008; Harichane et al., 2012; Ouhadi et al., 2014). L'augmentation dans les valeurs de la résistance à la compression est attribuée à la réaction de la chaux avec les particules du sol argileux qui se traduit par la

formation d'agents cimentaires (C-S-H et C-A-H) dont le rôle est de faire cimenter les particules du sol traité entre elles (Croft, 1964; Harichane et al., 2012).

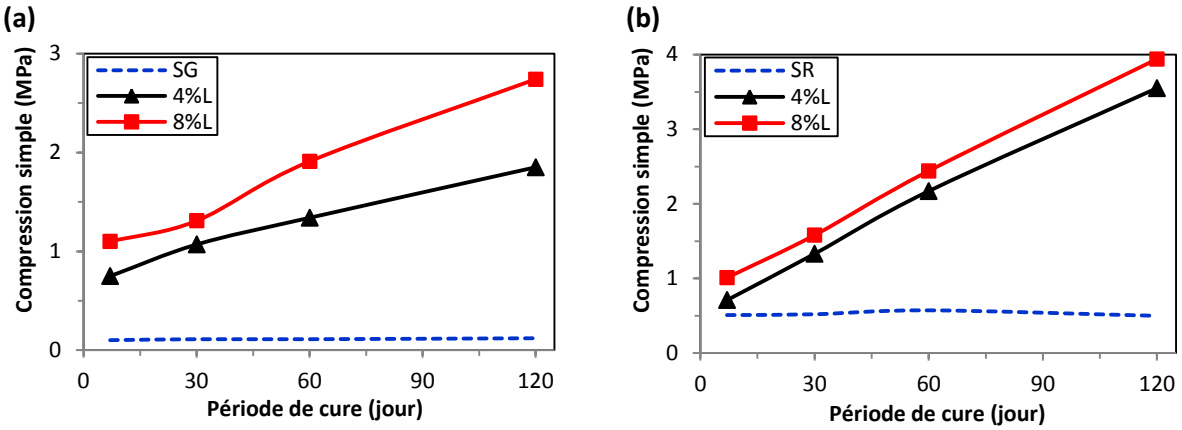


Fig. 5.1 — Effet de différents pourcentages de chaux sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): SG, (b): SR.

D'ailleurs, des essais de diffraction par des rayons X (DRX) et de microscopie électronique à balayage (MEB) ont été effectués sur des échantillons de deux sols argileux stabilisés avec 8% de chaux après 60 jours de cure. De plus, nous avons effectué certains essais sur, seulement, les échantillons des deux sols conservés pour 60 jours de cure parce qu'ils correspondent au temps de cure qui, pour lequel les éprouvettes des deux sols stabilisés sont complètement altérées en présence des sulfates (les échantillons analysés sont seulement ceux qui contiennent 4% du Na_2SO_4 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$). Ces essais (DRX et MEB) permettent de voir l'évolution et de suivre les changements éventuels de la minéralogie ainsi que la macro ou la microstructure apportés par les additifs additionnés aux deux sols traités. Les résultats obtenus relèvent qu'il y a un changement radical dans la minéralogie et de la microstructure des deux sols argileux stabilisés. En effet, des composés de C-S-H et C-A-H ont été observés dans les courbes diffractométriques de DRX (Figs. 5.2(h) et 5.3(h)) et également des modifications microstructurales ont été révélées par des images de MEB (Fig. 5.4).

En général, la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux additionnée et de la période de cure à savoir que les échantillons du SR développent des valeurs de résistance bien plus grandes que celles développées par le SG. Par exemple, le SG traité avec 8% de chaux fait développer une résistance à la compression de l'ordre de 2.7 MPa après 120 jours de cure qui est 27 fois plus grande que celle du sol non traité.

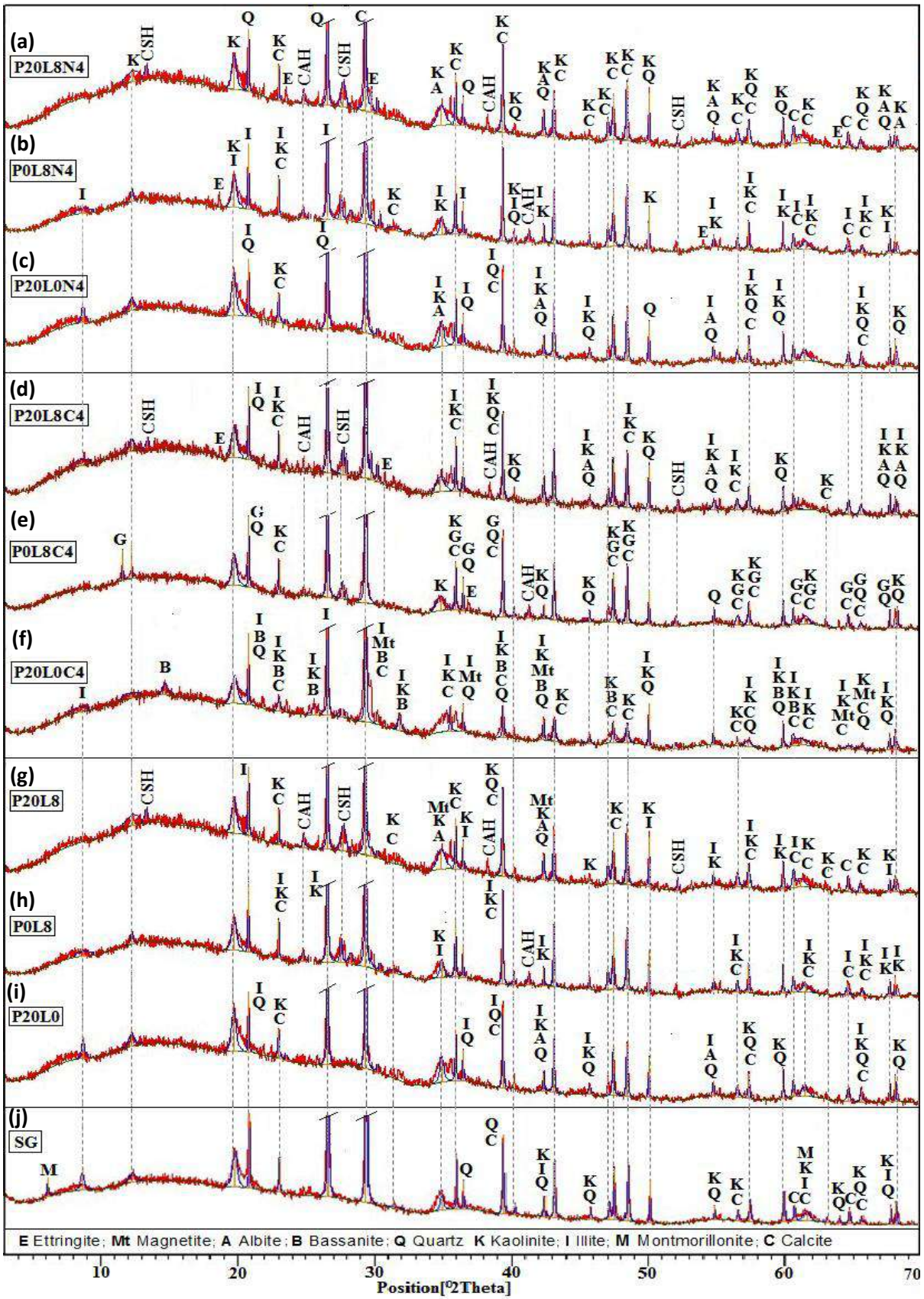


Fig. 5.2 — Courbes diffractométriques issus de diffraction par des rayons X (DRX) montrant les changements dans la minéralogie du SG stabilisé avec 8%L, 20%PN et 20%PN+8%L en présence ou non de 4% du Na_2SO_4 et du $CaSO_4.2H_2O$ après 60 jours de cure.

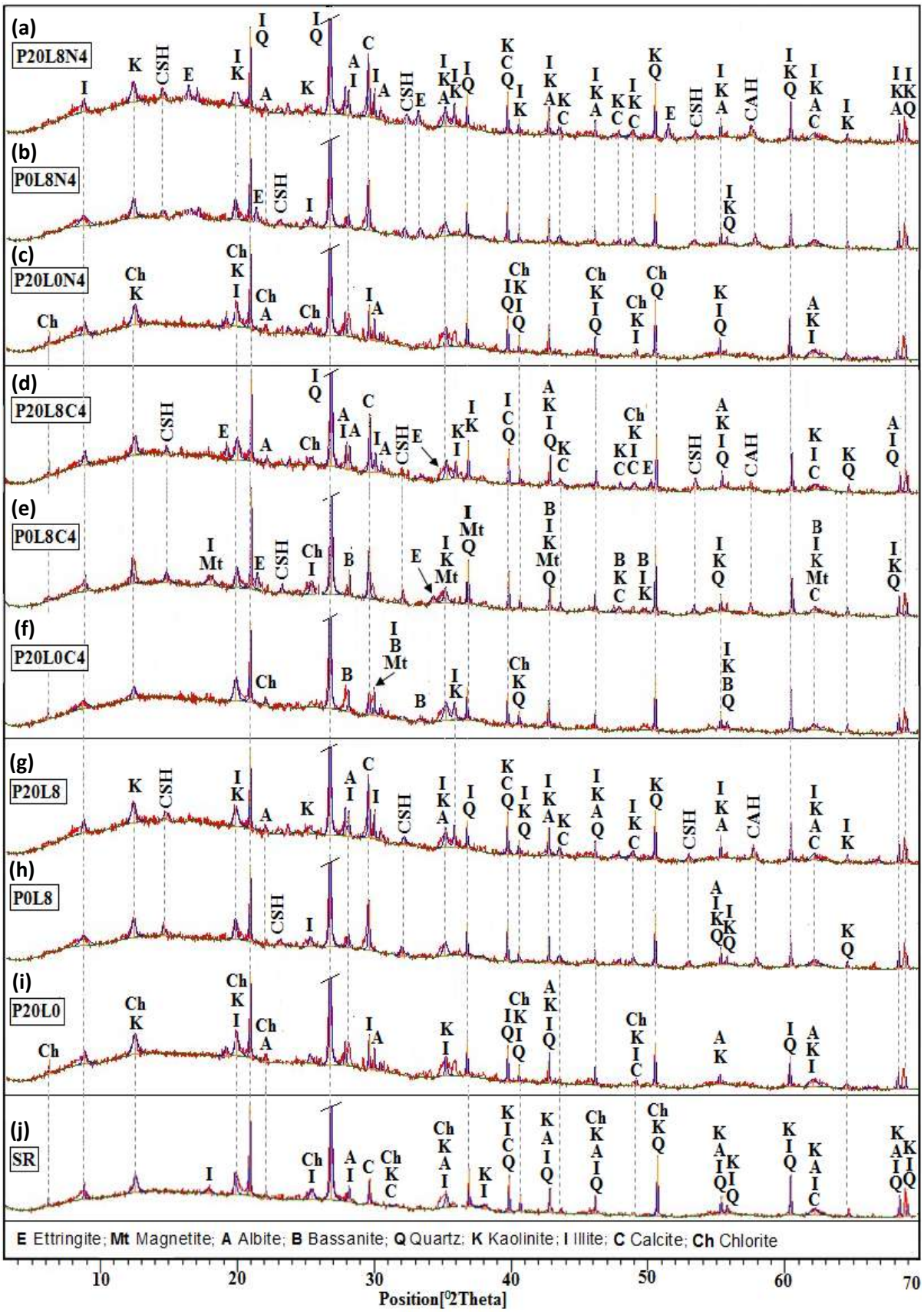


Fig. 5.3 — Courbes diffractométriques issus de diffraction par des rayons X (DRX) montrant les changements dans la minéralogie du SR stabilisé avec 8%L, 20%PN et 20%PN+8%L en présence ou non de 4% du Na_2SO_4 et du $CaSO_4.2H_2O$ après 60 jours de cure.

En revanche, pour la même teneur en chaux et la même période de cure, le SR fait développer une résistance à la compression de l'ordre de 3.9 MPa qui est seulement 8 fois plus grande que celle du sol non traité. En outre, Asgari et al. (2015) ont rapporté que la résistance à la compression du sol obtenu à partir du Nord-Ouest de la ville d'Arak augmente avec la période de cure et de la teneur en chaux jusqu'à 3% alors qu'elle diminue au-delà de cette teneur. De plus, un comportement similaire a été observé par McCarthy et al. (2012).

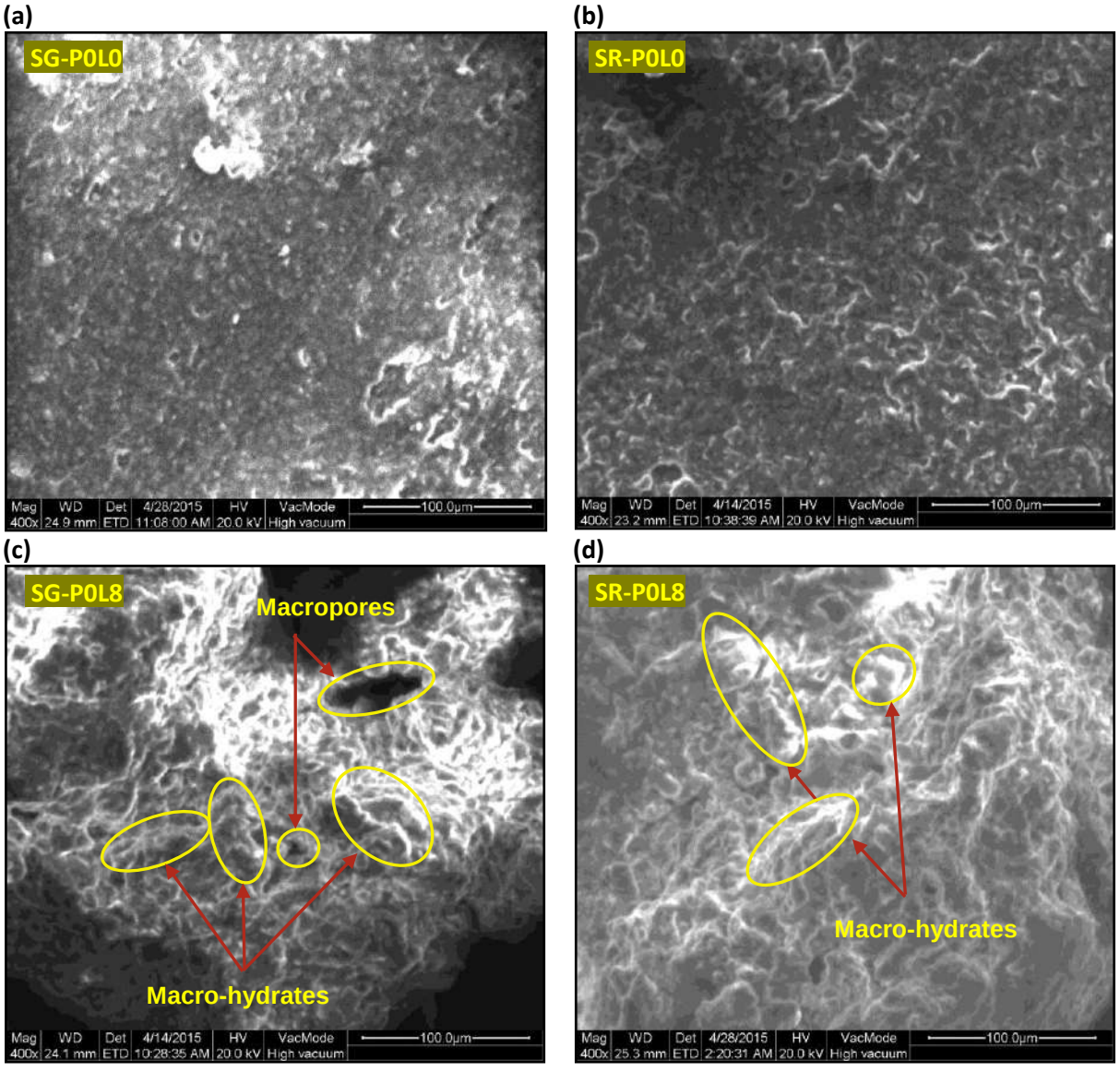


Fig. 5.4 — Images de MEB montrent les changements dans la macrostructure des deux sols argileux non traités et traités avec 8% de chaux en absence des sulfates après 60 jours de cure, (a): SG, (b): SR, (c): SG traité avec 8%L, (d): SR traité avec 8%L.

5.2.2 Effet de la PN

La Figure 5.5 présente 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 des deux sols argileux étudiés. En général, la résistance à la compression des échantillons des deux sols

argileux traités augmente avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle additionnée et de la période de cure où les échantillons du SR développent des valeurs de résistance bien plus grandes que celles développées par le SG. 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.

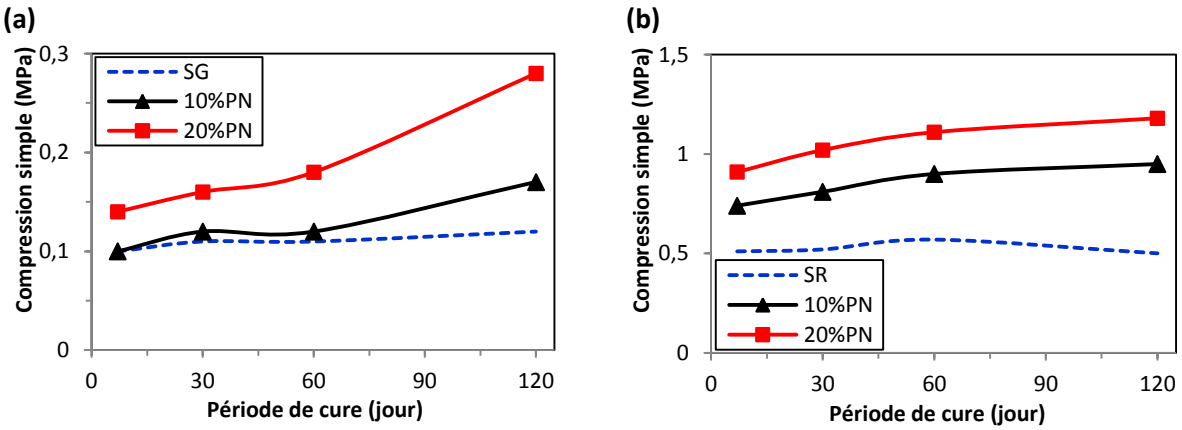


Fig. 5.5 — Effet de différents pourcentages de pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): SG, (b): SR.

D'ailleurs, des essais de diffraction par des rayons X (DRX) et de microscopie électronique à balayage (MEB) ont été effectués sur des échantillons de deux sols 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 (Figs. 5.2(i) et 5.3(i)). 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 50 à 100µm pour le SG et de 10 à 20µm 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 retraits important qui se traduisent par des macropores tout en faisant affaiblir la macrostructure du sol stabilisé et par conséquent sa résistance à la compression (Fig. 5.6).

Par comparaison, les différences dans les valeurs de la résistance à la compression entre la chaux et la pouzzolane naturelle sont plus prononcées avec le SR qu'avec le SG. Ce comportement est probablement due à la différence dans la composition minéralogique et ainsi dans l'indice de plasticité qui existe entre les deux sols argileux étudiés. Ces résultats sont en parfaite concordance avec ceux qui ont été trouvés par Harichane et al. (2012).

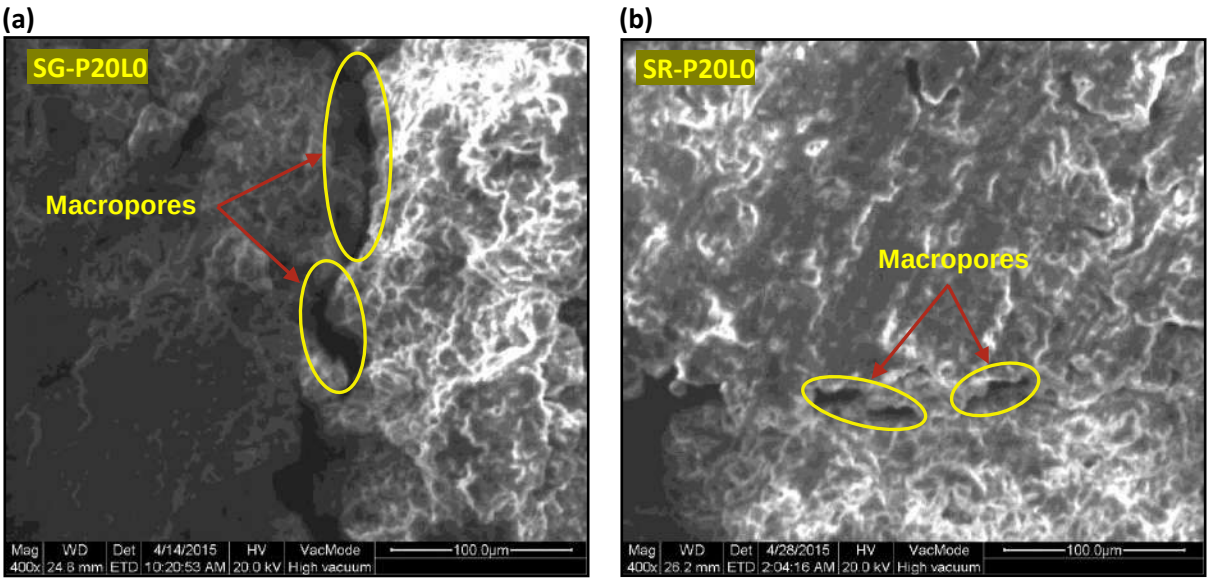


Fig. 5.6 — Images de MEB montrent les changements dans la macrostructure des deux sols argileux traités avec 20% de pouzzolane naturelle en absence des sulfates après 60 jours de cure, (a): SG, (b): SR.

5.2.3 Effet combiné de la Chaux-PN

Les changements dans la résistance à la compression apportés par l'utilisation de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en tant que stabilisant sur les deux sols argileux étudiés sont illustrés dans la Figure 5.7. En général, les meilleurs résultats de la résistance à la compression sont obtenus lorsque la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est utilisée. En effet, pour les deux sols argileux traités, la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux-pouzzolane naturelle et de la période de cure.

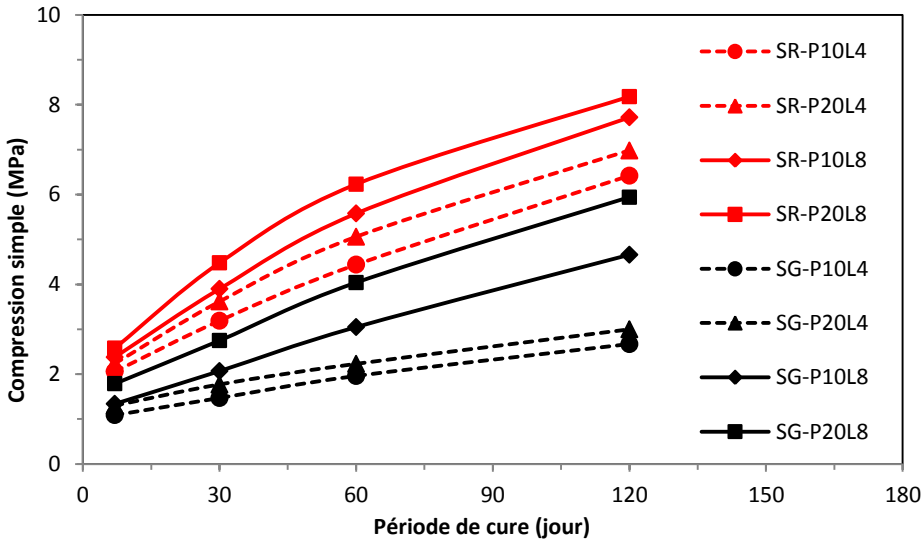


Fig. 5.7 — Effet de différents pourcentages de chaux-pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression non confinée des deux sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure.

Par exemple, la résistance à la compression du SG stabilisé avec la combinaison de 20%PN+4%L passe de 0.1 MPa vers 1.3 et 3 MPa après 7 et 120 jours de cure, respectivement (Fig. 5.7). Pour un sol de classe similaire, McCarthy et al. (2012) ont révélé que la résistance à la compression du sol traité avec la combinaison de 18% de cendres volantes (FA) et de 3% de chaux passe de 0.4 MPa à 1 et 1.8 MPa après 7 et 90 jours de cure, respectivement. De plus, un comportement similaire pour un sol de même classe a été observé par Kumar et al. (2007). En revanche, Pour le cas du SR stabilisé avec la même combinaison 20%PN+4%L, la résistance à la compression augmente de 0.5 MPa jusqu'à 2.2 et 7 MPa après 7 et 120 jours de cure, respectivement (Fig. 5.7). Pour un sol de même classe, McCarthy et al. (2012) ont rapporté que la résistance à la compression du sol traité avec la combinaison de 18%FA+3%L passe de 0.4 MPa à 1.1 et 2.1 MPa au bout de 7 et 90 jours de cure, respectivement.

En effet, les teneurs croissantes de chaux-pouzzolane naturelle font développer des valeurs élevées de résistance à la compression. Il est à observer que pour 120 jours de cure, les échantillons des SG et SR stabilisés avec la combinaison de 20%PN+8%L montrent des augmentations respectives de l'ordre de 59 et 16 fois par rapport aux échantillons des deux sols non traités. D'ailleurs, Hossain et al. (2007) ont observé que les échantillons des sols naturels traités avec la combinaison de 10% de cendres volantes et de 4% de chaux représentent des augmentations respectives de l'ordre de 21 et 10 fois par rapport aux deux sols naturels non traités. Par comparaison, le traitement combiné de chaux-pouzzolane naturelle fait produire des résistances à la compression bien plus élevées que le traitement seul avec la pouzzolane naturelle ou la chaux. Par conséquent, il est déconseillé d'utiliser la pouzzolane naturelle seule en tant que additif dans la stabilisation des sols argileux. Toutefois, la résistance à la compression des deux sols argileux traités à la chaux peut être améliorée considérablement par l'addition entre 10 et 20% de pouzzolane naturelle. Les mêmes observations ont été rapportées par plusieurs chercheurs (Fontaine, 1984; Kolias et al., 2005; Kumar et al., 2007; McCarthy et al., 2014).

En effet, des essais de diffraction par des rayons X (DRX) et de microscopie électronique à balayage (MEB) ont été effectués sur des échantillons de deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de 20%PN+8%L après 60 jours de cure. Les résultats obtenus montrent qu'il y a un changement remarquable dans la minéralogie et la microstructure des deux sols argileux stabilisés. En effet, des composés de C-S-H et C-A-H ont été observés dans les courbes diffractométriques de DRX (Figs. 5.2(g) et 5.3(g)) et également des modifications microstructurales ont été révélées par des images de MEB (Fig. 5.8). Les images de MEB

effectuées sur les échantillons des deux sols traités avec la combinaison de 20%PN+8%L montrent la formation de grandes quantités de macro-hydrates par rapport aux échantillons des mêmes sols traités avec la chaux toute seule. Ceci explique les grandes différences dans les valeurs de la résistance à la compression entre ces deux types de traitement grâce à la grande quantité de silice apportées par l'addition de la pouzzolane naturelle.

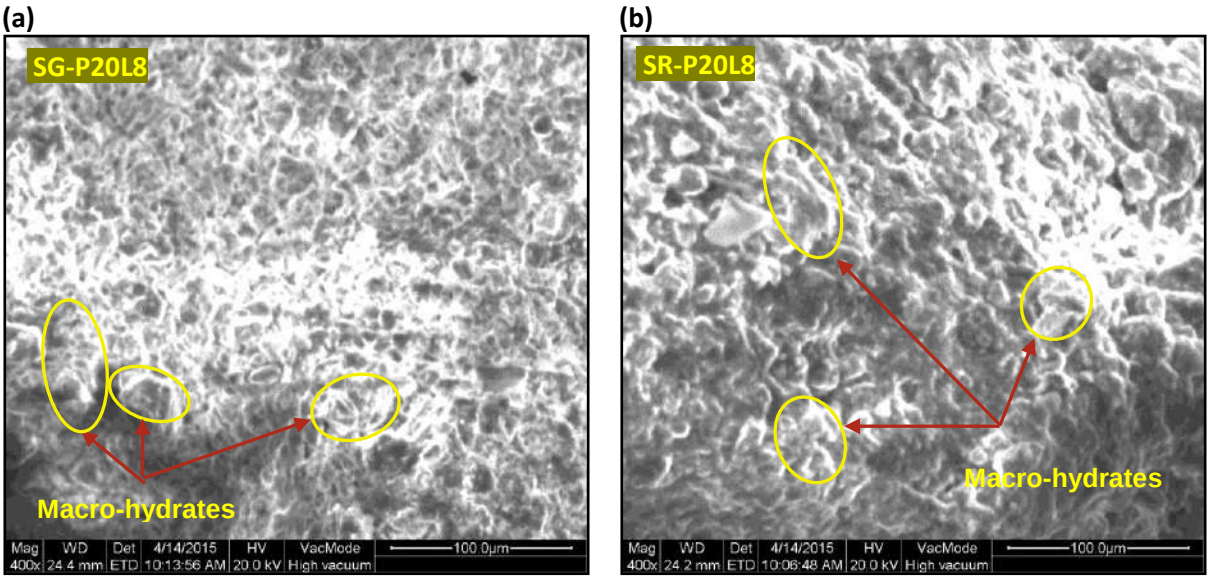


Fig. 5.8 — Images de MEB montrent les changements dans la macrostructure des deux sols argileux traités avec la combinaison de 20%PN+8%L en absence des sulfates après 60 jours de cure, (a): SG, (b): SR.

Le traitement efficace obtenu suite à l'utilisation de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est attribué aux propriétés pouzzolaniques du mélange Sol-Chaux-PN où l'apport de silice apporté par la pouzzolane naturelle contribue dans les réactions pouzzolaniques pour former plus de composés cimentaires responsable sur la cimentation des particules des deux sols les uns aux autres et par conséquent la résistance à la compression (Harichane et al., 2011b). Il est à conclure que les pouzzolanes naturelles riches en silice réactive peuvent être utilisées avec des teneurs de 10 et 20% en tant que substituant pour les sols présentant des faibles teneurs en silice réactive. La pouzzolane naturelle peut être donc considérée comme une source de silice pour les réactions pouzzolaniques.

5.3 Résistance à la compression des sols traités avec sulfates

5.3.1 Effet du $CaSO_4$ sur la compression simple

Les résultats de l'effet apporté par le $CaSO_4.2H_2O$ sur la résistance à la compression non confinée, la minéralogie et la microstructure des deux sols argileux stabilisés avec l'addition

de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sont présentés dans les Figures 5.9–5.13.

5.3.1.1 Cas du traitement à la chaux

Avant de présenter les résultats des deux sols argileux traités à la chaux, il est à noter que la présence seule du $CaSO_4.2H_2O$ fait importer un effet bénéfique sur la résistance à la compression des deux sols argileux étudiés. En effet, les valeurs de la résistance à la compression développées par les échantillons des deux sols argileux perturbés seulement avec du $CaSO_4.2H_2O$ sont bien plus grandes que celles développées par ceux des sols non traités. D'ailleurs, Yilmaz and Civelekoglu (2009) ont observé que la résistance à la compression d'une bentonite stabilisée avec l'addition du gypse augmente de 58,7 KPa jusqu'à 73,1 et 79,6 KPa en présence de 2,5 et 7,5 du gypse, respectivement. L'augmentation des valeurs de la résistance à la compression des échantillons des deux sols argileux non traités avec l'augmentation de la teneur en gypse additionnée est probablement due à l'augmentation de la compacité grâce aux particules plus fine du $CaSO_4.2H_2O$ (Aldaood et al., 2014a). La formation de composés cimentaires dans les échantillons de deux sols argileux conservés pendant 60 jours de cure et perturbés seulement avec 6% du $CaSO_4.2H_2O$ a été clairement observée sur les images de MEB (Fig. 5.9).

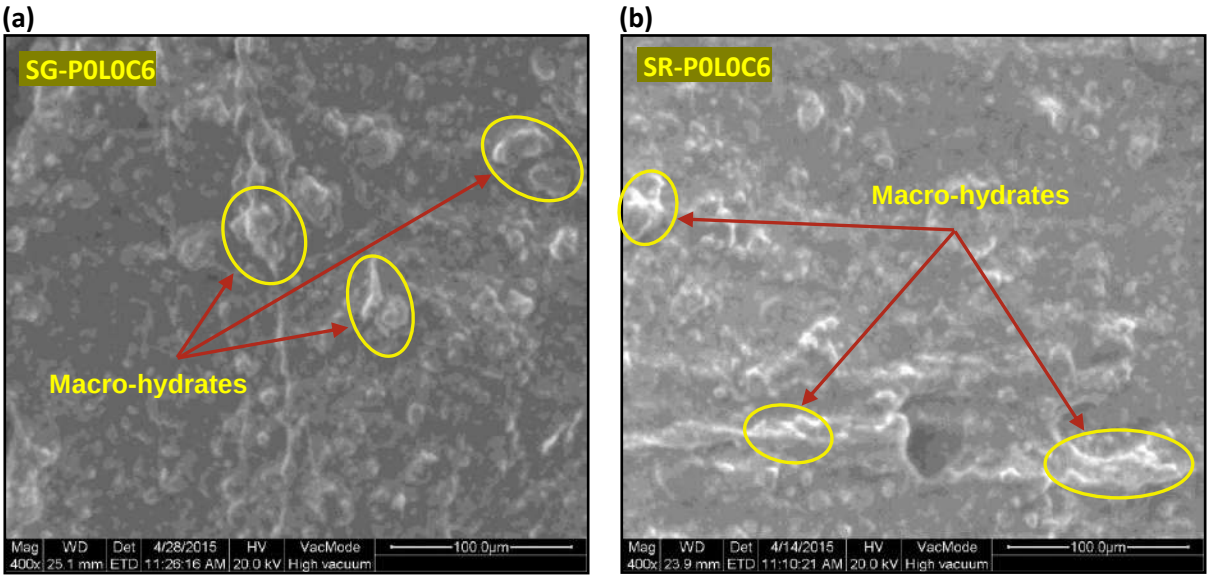


Fig. 5.9 — Images de MEB montrent les changements dans la macrostructure des deux sols argileux perturbé seulement avec 6% du $CaSO_2.2H_2O$ après 60 jours de cure, (a): SG, (b): SR.

Les résultats de l'effet apporté par le $CaSO_4.2H_2O$ sur la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux sont présentés dans la Figure 5.10. L'utilisation de la chaux seule en présence du $CaSO_4.2H_2O$ fait augmenter la résistance à la

compression des échantillons de deux sols argileux stabilisés. Il est admis que la présence du gypse fait accélérer les réactions chimiques entre le sol et la chaux pour former de l'ettringite par la réaction entre les ions sulfate et les composés de cimentation. D'après Segui et al. (2013), avec la combinaison de 2% de chaux avec 6% du liant hydraulique routier, le sol argileux traité a développé des valeurs de la résistance à la compression de 0.7 et 4.6 MPa au bout de 3 et 90 jours de cure, respectivement.

Pour une faible teneur de $CaSO_4.2H_2O$ (2%), les deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux seule présente une augmentation acceptable de la résistance à la compression dont elle augmente aussi bien avec la période de cure (Fig. 10(a, d)).

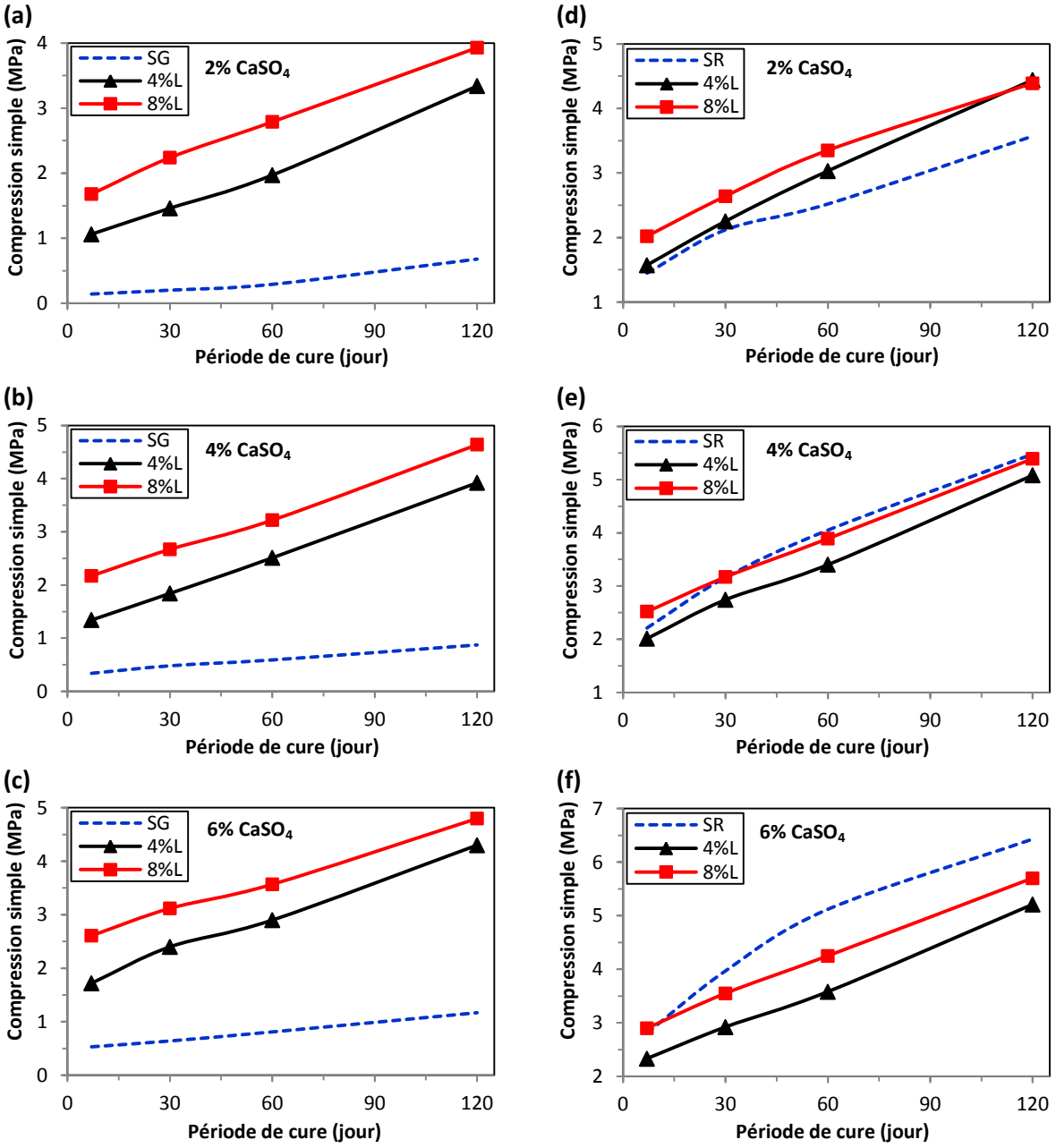


Fig. 5.10 — Effet de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés à la chaux pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.

De plus, la résistance à la compression des mêmes sols argileux stabilisés augmente avec la teneur en $CaSO_4.2H_2O$. Hunter (1988) a indiqué que les ions d'hydroxyle OH^- retenus des réactions d'hydratation se combinent avec la chaux pour former des composés d'aluminium dont ils rentrent en réaction avec les sulfates pour former l'ettringite minérale. Cependant, il y a une légère différence entre les valeurs de la résistance à la compression des échantillons de deux sols argileux stabilisés à la chaux en présence de 4 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$. Ce comportement est attribué à la teneur excessive du $CaSO_4.2H_2O$ dont il n'a pas réagi avec de la chaux ce qui est la cause de la légère augmentation de la résistance à la compression notamment à long terme. Les résultats de la minéralogie issus des essais de DRX effectués sur des échantillons de deux sols traités à la chaux en présence de 4% du $CaSO_4.2H_2O$ après 60 jours de cure sont présentés dans les Figures 5.2(e) et 5.3(e). Les analyses de DRX obtenues montrent la formation de nouveaux composés cimentaires (C-S-H et C-A-H) et de l'ettringite minérale.

5.3.1.2 Cas du traitement avec la PN

Les résultats de l'effet apporté par le $CaSO_4.2H_2O$ sur la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle sont présentés dans la Figure 5.11. L'utilisation de la pouzzolane naturelle seule en présence du $CaSO_4.2H_2O$ fait augmenter considérablement la résistance à la compression des échantillons de deux sols argileux stabilisés à savoir que le SR développe des valeurs bien plus grandes que celles développées par le SG. Par exemple, avec 20% de pouzzolane naturelle et après 7 jours de cure, la résistance à la compression du SG augmente de 0.2 MPa jusqu'à seulement 0.5 et 1.1 MPa en présence de 2 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$, respectivement (Fig. 10 c, g). Cependant, pour la même teneur en pouzzolane naturelle et la même période de cure, la résistance à la compression du SR augmente de 0.9 MPa jusqu'à 1.7 et 4 MPa en présence de 2 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$, respectivement (Fig. 11c, g). En revanche, avec 20% de pouzzolane naturelle en tant qu'additif et au bout de 120 jours de cure, la résistance à la compression du SG augmente de 0.3 MPa jusqu'à 1.2 et 1.9 MPa en présence de 2 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$, respectivement (Fig. 10d, h). Cependant, pour la même teneur en pouzzolane naturelle et la même période de cure, la résistance à la compression du SR augmente de 1.2 MPa jusqu'à 4.8 et 8.6 MPa en présence de 2 et 6% du $CaSO_4.2H_2O$, respectivement (Fig. 11d, h).

Les résultats de la macrostructure issus des essais de MEB effectués sur des échantillons de deux sols traités avec la pouzzolane naturelle en présence de 6% du $CaSO_4.2H_2O$ après 60 jours de cure sont présentés dans les Figure 5.12. Les images de MEB obtenues montrent la formation de nouveaux composés cimentaires (C-S-H et C-A-H). Ces images indiquent que

les nouveaux composés cimentaires formés par les réactions chimiques ont fait produire des liaisons plus fortes entre les particules d'argile et par conséquent des valeurs élevées de la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés. D'une part, l'augmentation des valeurs de la résistance à la compression des échantillons des deux sols argileux traités avec la pouzzolane naturelle en présence du $CaSO_4.2H_2O$ est certainement liée à la formation éventuelle de composés cimentaires.

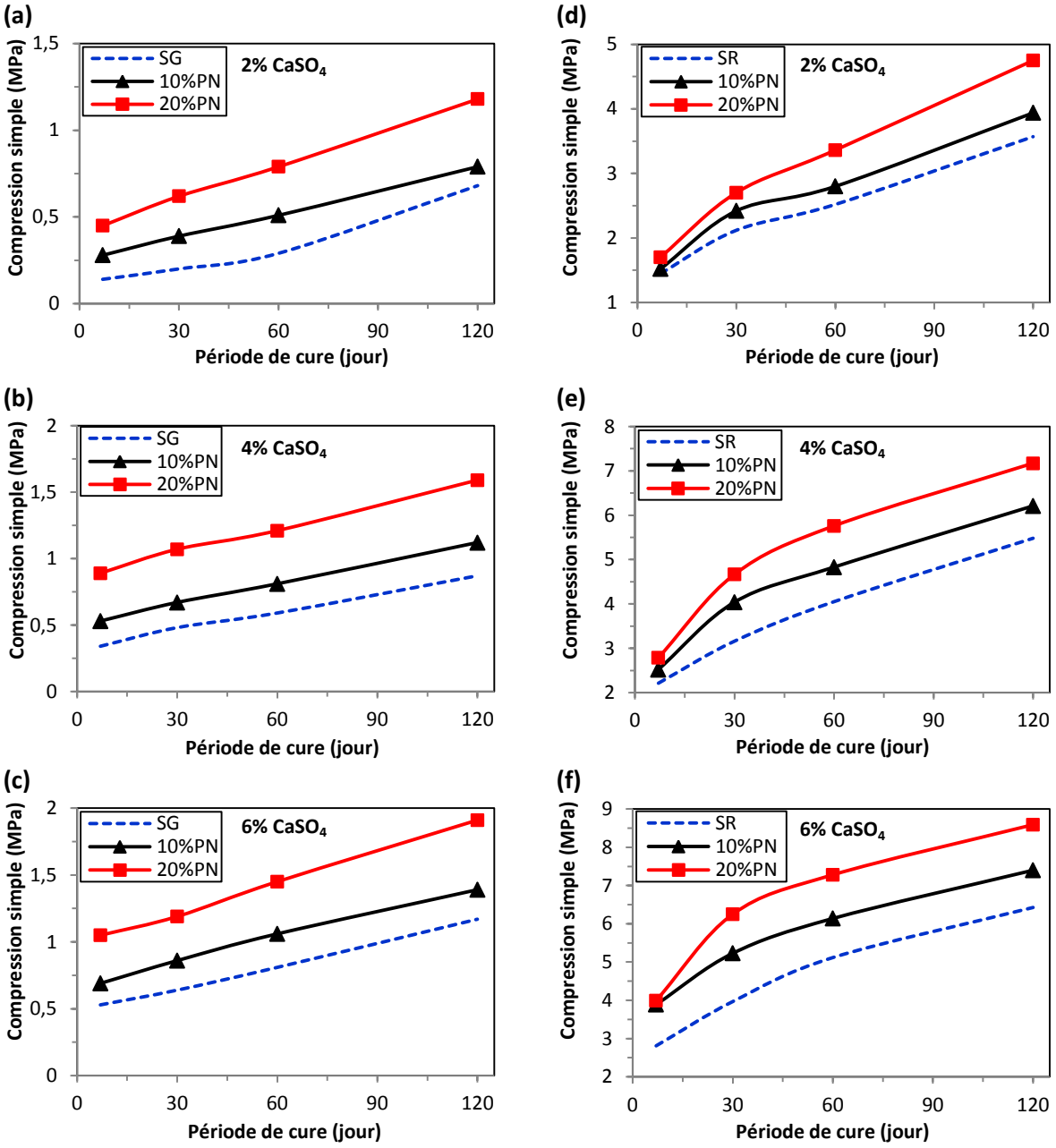


Fig. 5.11 — Effet de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés avec la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.

D'une part, la formation de l'ettringite et/ou des composés cimentaires dans des mêmes échantillons des deux sols argileux stabilisés avec la pouzzolane naturelle en présence du

$CaSO_4.2H_2O$ n'a pas été observée par les analyses de DRX en raison probablement de la faible quantité de ces composées (Figs. 5.2(f) et 5.3(f)). D'autre part, il se peut que ces composés cimentaires aient été endommagés lors de la préparation des échantillons par broyage.

Les composés cimentaires observés dans les images de MEB pour les échantillons des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle en présence de 6% du $CaSO_4.2H_2O$ ont été probablement formés suite à des réactions pouzzolaniques entre l'hydroxyde de chaux (CaO: présent dans le sol et/ou provenant de la pouzzolane naturelle elle-même) et les ions calcium (Ca^{2+}) apportés par l'addition du $CaSO_4.2H_2O$. Il convient de noter que la présence de 6% du $CaSO_4.2H_2O$ fait améliorer considérablement la compacité des échantillons des deux sols argileux traités avec la pouzzolane naturelle au bout de 60 jours de cure. Le même comportement a été observé par Aldaood et al. (2014a) où ils ont rapporté que l'augmentation de la résistance des sols gypseux traités à la chaux est liée à la fraction des particules fines de la poudre du $CaSO_4.2H_2O$ qui font augmenter la compacité de la matrice du sol stabilisé et par conséquent la résistance à la compression.

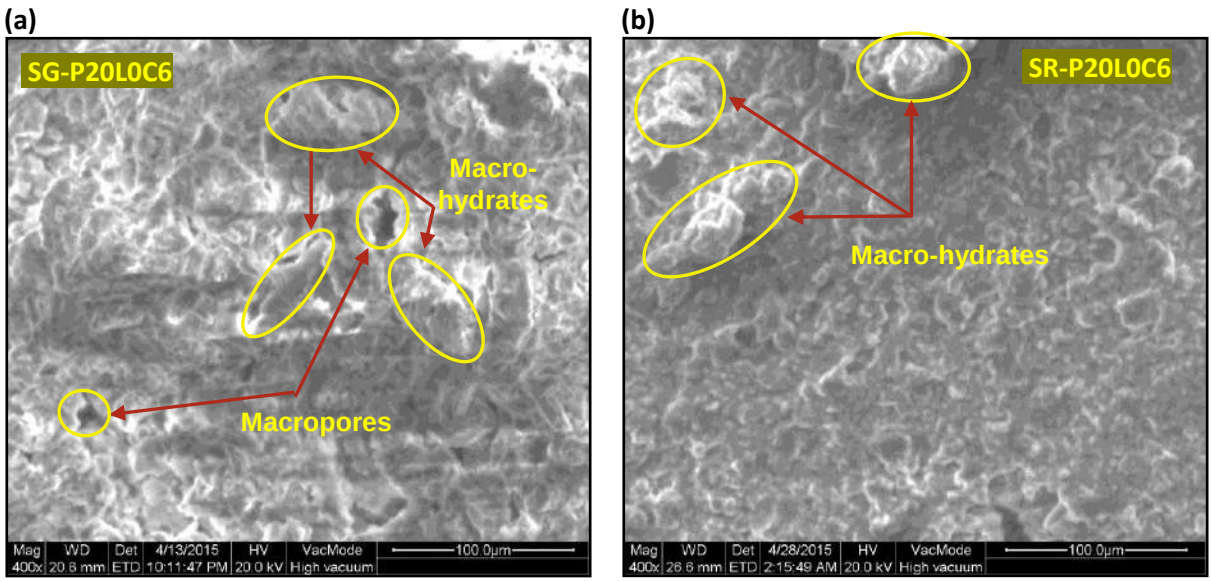


Fig. 5.12 — Images de MEB montrent les changements dans la macrostructure des deux sols argileux traités avec l'addition de 20% de pouzzolane naturelle en présence de 6% du $CaSO_4.2H_2O$ après 60 jours de cure, (a): SG, (b): SR.

Des macropores de dimensions variant de 10 à 20µm ont été observés sur l'échantillon du SG traité avec 20% de pouzzolane naturelle en présence de 6% du $CaSO_4.2H_2O$. Ces macropores sont probablement liés au mauvais compactage lors de la confection des échantillons. Ceci explique pourquoi le SR a développé des valeurs de la résistance à la compression bien plus grandes que celles développées par le SG. Par comparaison, la différence dans les valeurs de

la résistance à la compression des échantillons du SR traités à la chaux et ceux traités avec la pouzzolane naturelle s'explique par le comportement du $CaSO_4.2H_2O$ qui a la capacité de réduire la solubilité de la chaux hydratée (Shi and Day, 2000a).

5.3.1.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN

Les résultats de l'effet apporté par le $CaSO_4.2H_2O$ sur la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sont présentés dans la Figure 5.13. Dans tous les cas, les valeurs de la résistance à la compression des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en présence du $CaSO_4.2H_2O$ sont supérieures à celles des échantillons des deux sols traités sans présence du $CaSO_4.2H_2O$.

En effet, la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle augmente considérablement avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$, de la teneur en chaux-pouzzolane naturelle et de la période de cure où le SR a des meilleurs résultats. Par exemple, avec 2% du $CaSO_4.2H_2O$ et après 120 jours de cure, les SG et SR stabilisées avec la combinaison de 10%PN+4%L développent des valeurs de la résistance à la compression de l'ordre de 3.8 et 7.4 MPa, respectivement (Fig. 5.13(a)). Cependant, avec le même teneur en $CaSO_4.2H_2O$ et pour la même période de cure, les SG et SR stabilisée avec la combinaison de 20%PN+8%L développent des valeurs de la résistance à la compression de l'ordre de 7.1 et 8.8 MPa, respectivement (Fig. 5.13(a)). En revanche, une fois d'ajouter 6% du $CaSO_4.2H_2O$, les SG et SR stabilisés avec la combinaison de 10%PN+4%L développent respectivement des valeurs de la résistance à la compression de 5.8 et 8 MPa au bout de 120 jours de cure (Fig. 5.13(c)). Cependant, pour la même teneur en $CaSO_4.2H_2O$ et pour la même période de cure, les résistances des SG et SR stabilisés avec 20%PN+8%L deviennent 8.7 et 9.9 MPa, respectivement (Fig. 5.13(c)). En général, le traitement combiné de chaux-pouzzolane naturelle en présence du $CaSO_4.2H_2O$ fait apporter un effet significatif sur la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés.

Les résultats des analyses minéralogiques issus des essais de DRX effectués sur des échantillons de deux sols traités avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en présence de 4% du $CaSO_4.2H_2O$ après 60 jours de cure sont présentés dans les Figures 5.2(d) et 5.3(d). Il est à observer que la forte augmentation dans les valeurs de la résistance à la compression des deux sols argileux traités avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en présence de 4% du $CaSO_4.2H_2O$ est certainement liée à la formation des composés de C-S-H, C-A-H et de l'ettringite minérale.

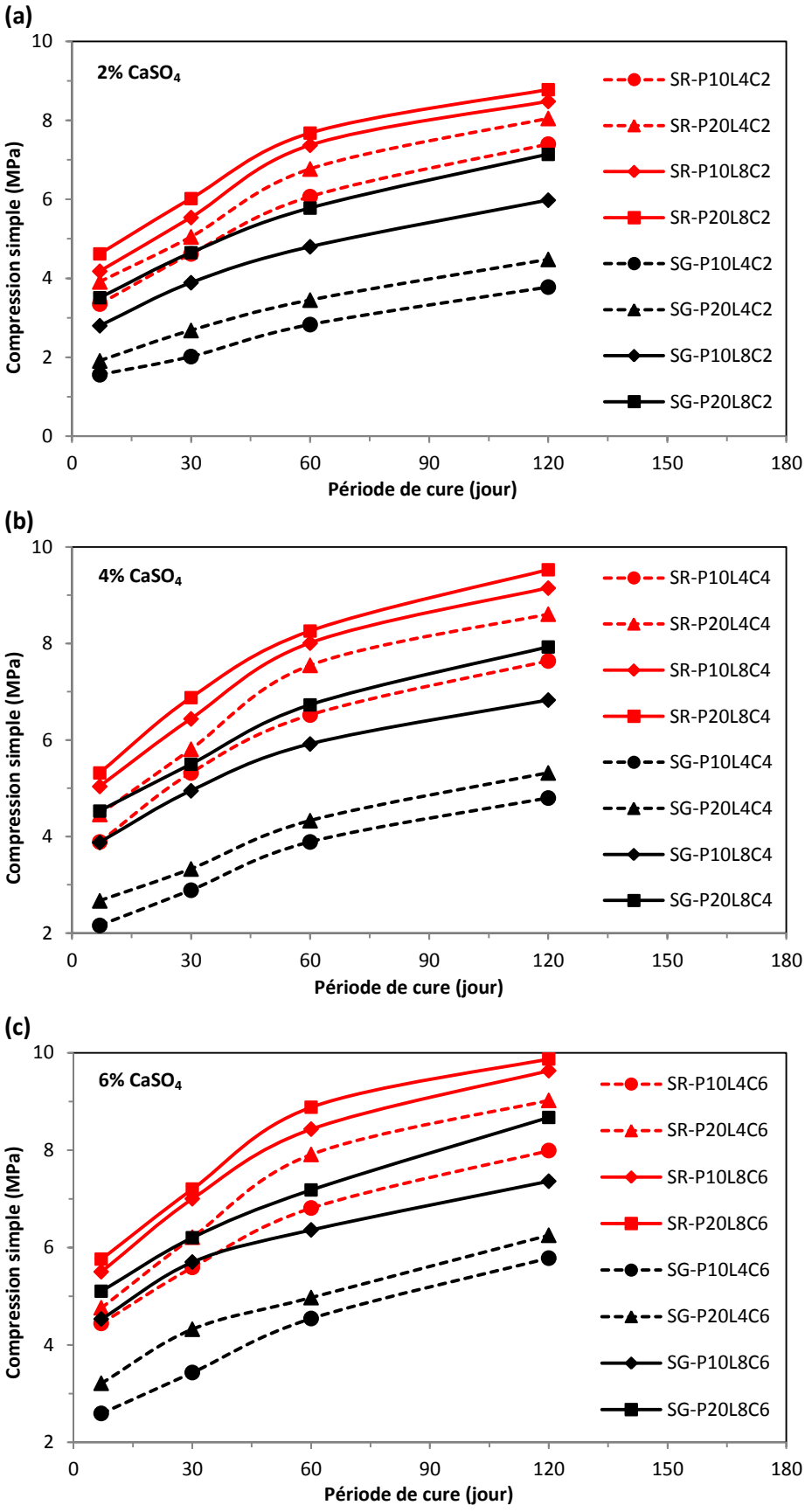


Fig. 5.13 — Effet de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ sur la résistance à la compression non confinée des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

5.3.2 Effet du Na_2SO_4 sur la compression simple

Les résultats de l'effet apporté par le Na_2SO_4 sur la résistance à la compression non confinée et la minéralogie des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sont présentés dans les Figures 5.14–5.18.

5.3.2.1 Cas du traitement à la chaux

Les résultats de l'effet apporté par le Na_2SO_4 sur la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux sont illustrés dans la Figure 5.14. La résistance à la compression des deux sols stabilisés diminue significativement avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4. Pour des faibles teneurs en Na_2SO_4 (2%), les deux sols argileux stabilisés à la chaux seule ont présenté une augmentation considérable de la résistance à la compression notamment avec la période de cure (Figures 3b et 4b). Ce comportement est attribué à l'effet immédiat de l'hydroxyde de sodium dû à la présence du Na_2SO_4 tout en faisant accélérer les réactions pouzzolaniques à court terme (Shi and Day, 2000a). Cependant, pour un traitement seul à la chaux, la présence du Na_2SO_4 avec des fortes teneurs (à partir de 4%) fait perturber la résistance à la compression des échantillons des deux sols stabilisés. D'autre part, les éprouvettes du SR traités avec de différentes teneurs en chaux après 30 et 60 jours de cure en présence de 4 et 6% du Na_2SO_4 sont entièrement altérées (Fig. 5.15). Les résultats des analyses minéralogiques issus des essais de DRX effectués sur des échantillons de deux sols traités avec l'addition de la chaux en présence de 4% du Na_2SO_4 après 60 jours de cure sont présentés dans les Figures 5.2(b) et 5.3(b). Il est à observer que la forte augmentation dans les valeurs de la résistance à la compression ainsi que l'altération des éprouvettes du SR traité avec l'addition de la chaux en présence de 4% du Na_2SO_4 est certainement liée à la formation des composés de C-S-H, C-A-H et de l'ettringite minérale fortement expansive. D'après Mitchell (1986), la diminution remarquable de la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés et aussi bien l'altération des éprouvettes du SR stabilisées à la chaux est attribuée à la présence du Na_2SO_4 dans le sol conduisant à la formation d'ettringite qui se traduit par la diminution du pH due à l'épuisement de la chaux additionnée au sol. De plus, Hunter (1988) a indiqué que l'hydroxyle OH^- provenant de l'hydratation de la chaux se combine avec la montmorillonite, $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2^-$, pour former l'hydroxyde d'aluminium $[2Al(OH)_4]$. Ce dernier $[2Al(OH)_4]$ réagit ensuite avec les sulfates pour former le minéral d'ettringite responsable de l'altération des éprouvettes. D'ailleurs, Mehta (1983) a rapporté que l'adsorption du sulfate sur des surfaces de C-S-H provoque la réduction de la résistance due à la diminution de la capacité de cimentation.

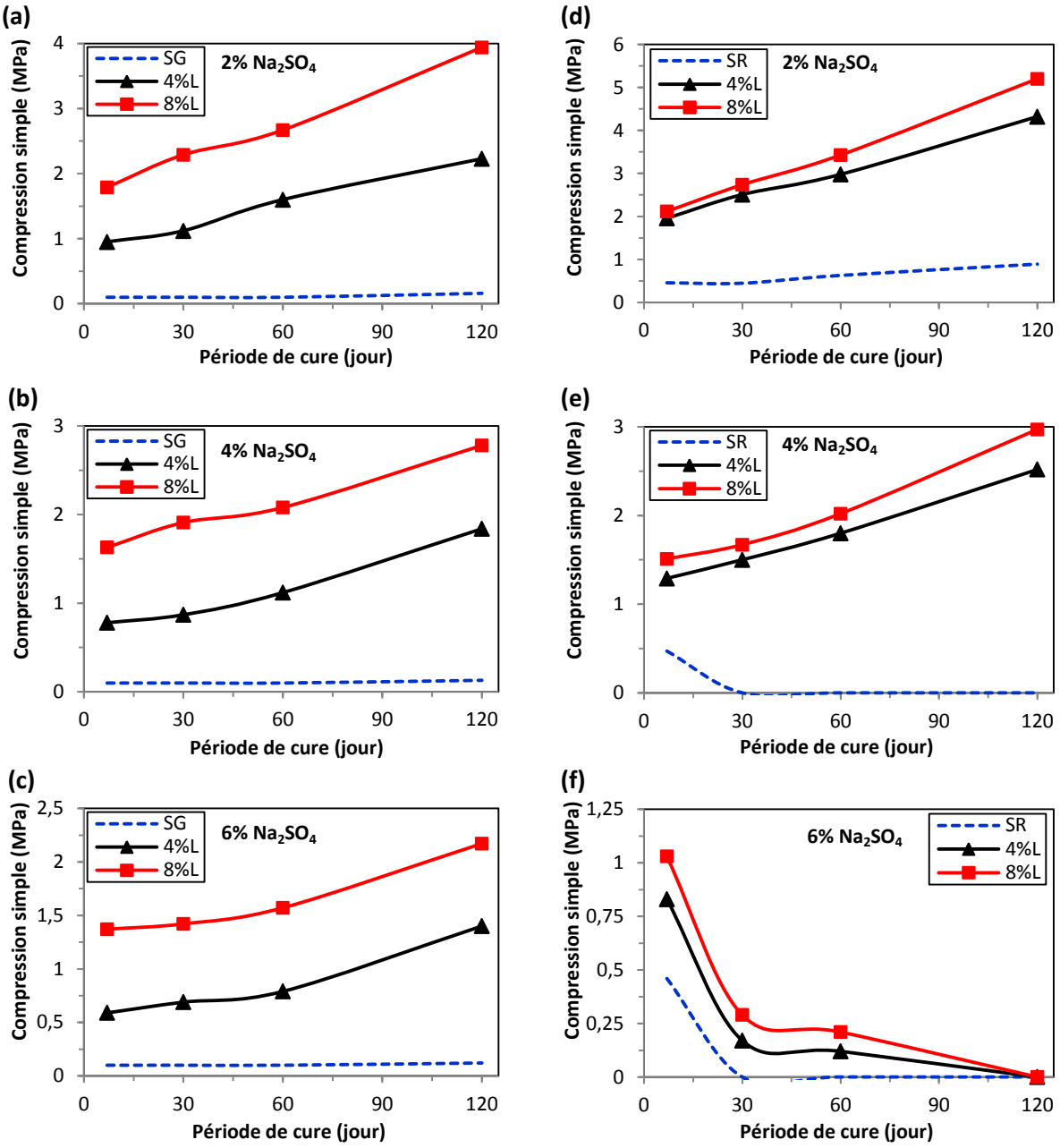


Fig. 5.14 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés à la chaux pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.

Il est à constater que quelle que soit la période de cure, la résistance à la compression du SG traité à la chaux en présence de différentes teneurs en Na_2SO_4 augmente considérablement avec la teneur en chaux additionnée par rapport aux échantillons du SR traité avec le même additif. Donc, la sensibilité de la résistance à la compression à l'effet de la chaux est plus prononcée avec le SG qu'avec le SR. En revanche, la sensibilité de la résistance à la compression à l'effet du Na_2SO_4 est plus prononcée avec le SR qu'avec le SG. Ce comportement est probablement attribué à la nature du sol traité qui est conditionné par son indice de plasticité et de sa composition minéralogique.

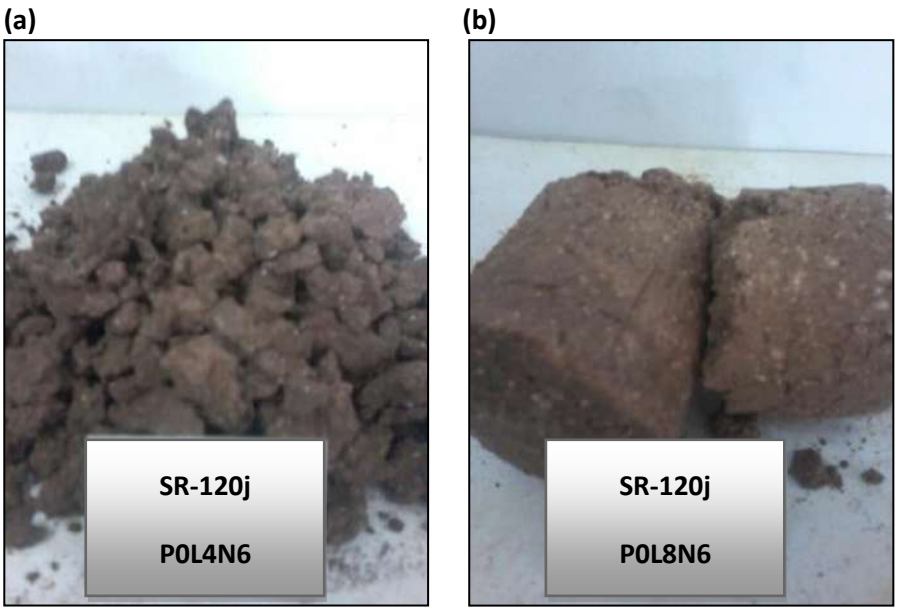


Fig. 5.15 — Eprouvettes du SR altérées après traitement avec l'addition de la chaux en présence de 6% du Na_2SO_4 pendant 120 jours de cure, (a): P0L4N6, (b): P0L8N6.

5.3.2.2 Cas du traitement avec la PN

Les résultats de l'effet apporté par le Na_2SO_4 sur la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle sont reportés dans la Figure 5.16. En général, l'influence de la pouzzolane naturelle reste presque marginale même en présence du Na_2SO_4. Cependant, le cas des éprouvettes du SR traité avec différentes teneurs en pouzzolane naturelle durant 30, 60 et 120 jours de cure en présence de 4 et 6% du Na_2SO_4 sont entièrement altérées (Fig. 5.17). D'ailleurs, la formation de l'ettringite et/ou des composés cimentaires dans les échantillons des deux sols argileux stabilisés avec la pouzzolane naturelle en présence du Na_2SO_4 n'a pas été observée par les analyses de DRX (Figs. 5.2(c) et 5.3(c)). Donc, la dégradation des éprouvettes du SR stabilisé avec la pouzzolane naturelle en présence de fortes teneurs en Na_2SO_4 est attribuée au comportement du SR du fait que les éprouvettes du SG ont pu résister à l'altération.

Par comparaison, les valeurs de la résistance à la compression développées par des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle en présence de 2% du $CaSO_4.2H_2O$ sont bien plus grandes que celles développées en présence de 2% du Na_2SO_4. De plus, l'augmentation marginale dans la résistance à la compression du SR traité à la chaux par rapport au même sol traité avec la pouzzolane naturelle est attribuée au fait que le gypse secondaire ($CaSO_4.2H_2O$) issu de l'addition du Na_2SO_4 possède la capacité de réduire la solubilité de la chaux hydratée (Shi and Day, 2000a).

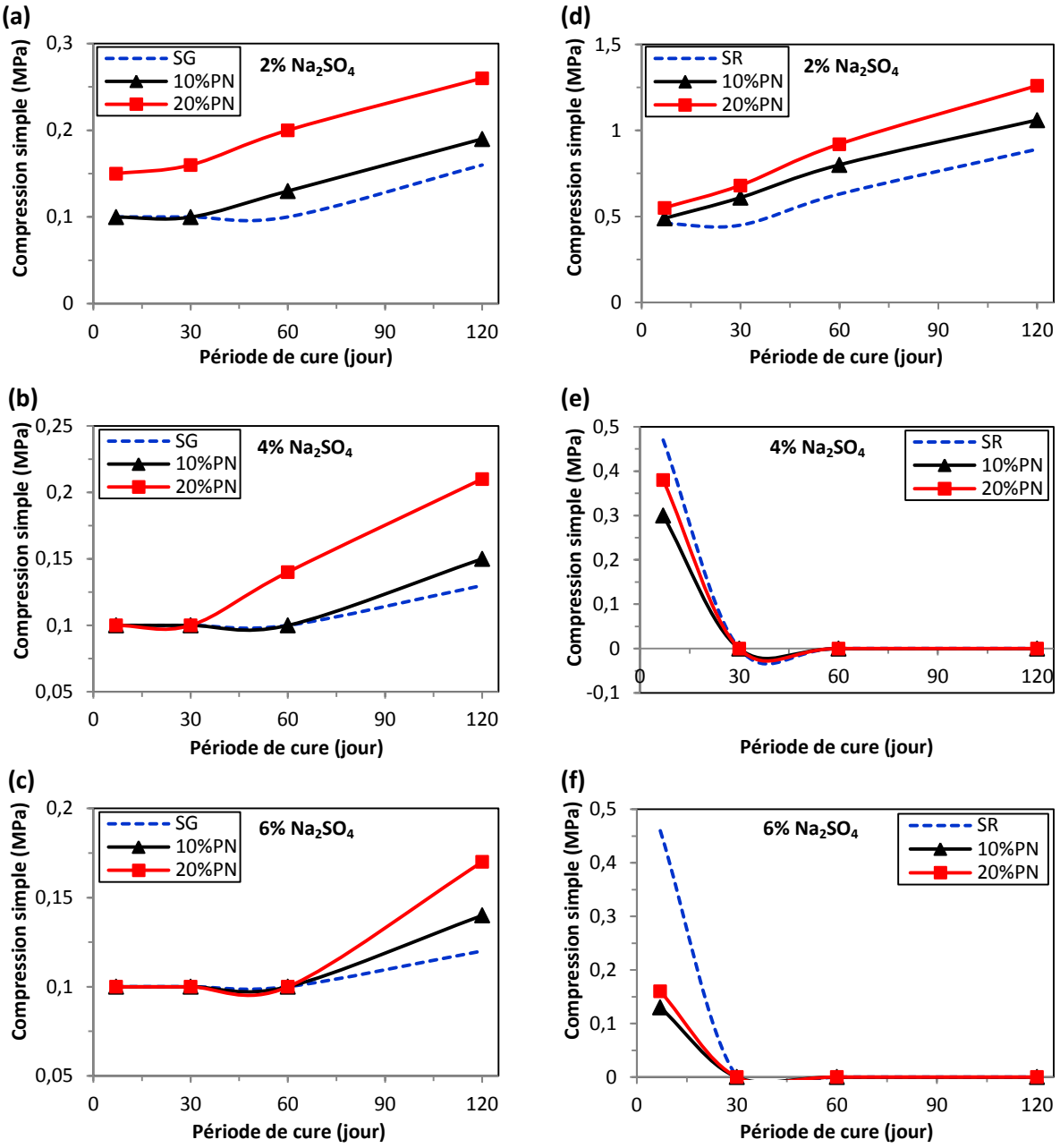


Fig. 5.16 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés avec la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.

A partir des résultats obtenus, il est donc important de classer le Na_2SO_4 comme étant un perturbateur de prise pour la stabilisation des deux sols lorsque sa teneur est supérieure à 2% en poids sec de sol. En général, quelque que soit la teneur en Na_2SO_4, les différences dans les valeurs de la résistance à la compression entre la chaux et la pouzzolane naturelle sont plus prononcées avec le SG qu'avec le SR. Par comparaison, le $CaSO_4.2H_2O$ apporte un effet bénéfique aux deux sols traités avec l'addition de la pouzzolane naturelle alors que le Na_2SO_4 apporte un effet indésirable.

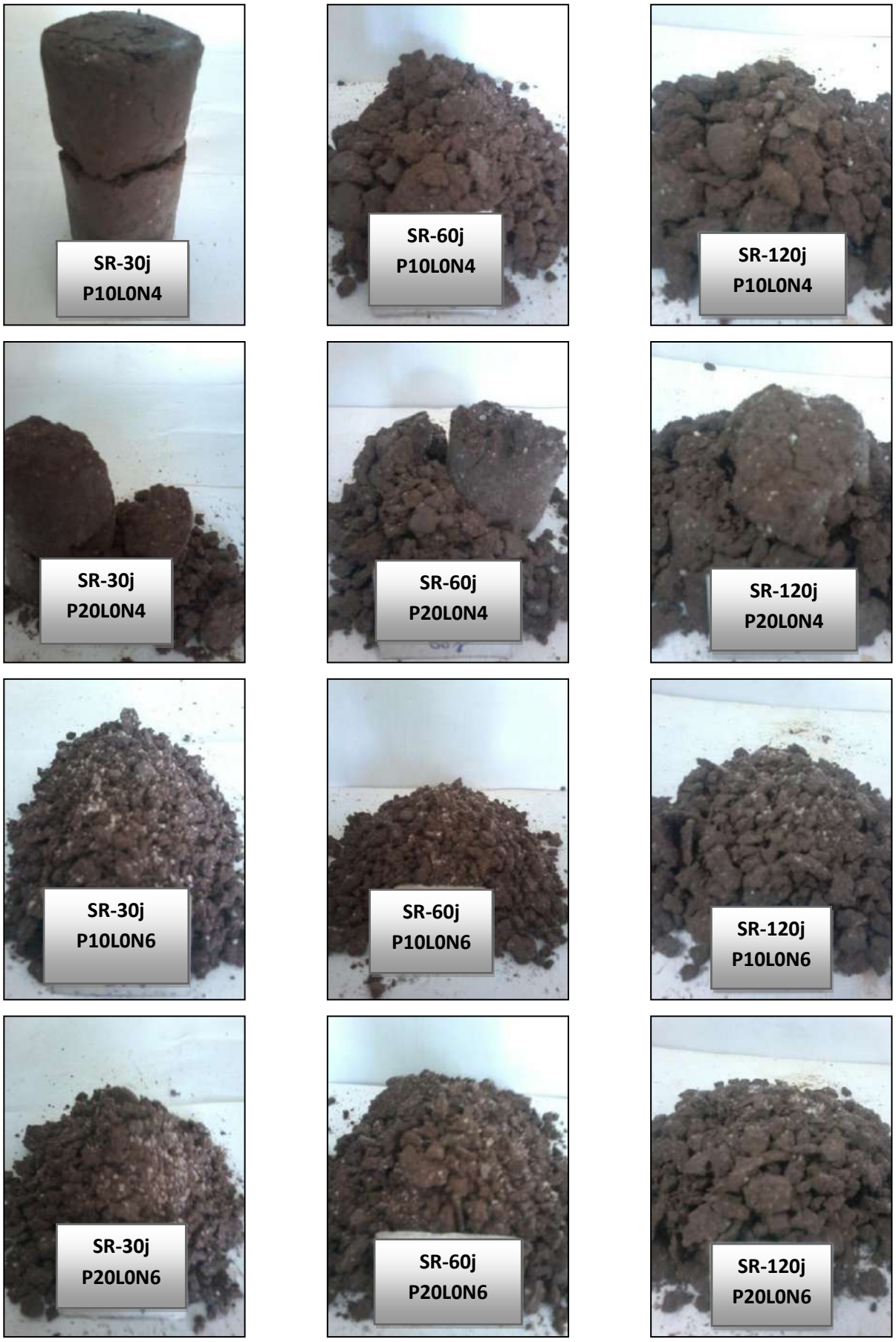


Fig. 5.17 — Eprouvettes du SR complètement altérées après traitement avec l'addition de la pouzzolane naturelle en présence de 4 et 6% du Na_2SO_4 pendant 30, 60 et 120 jours de cure.

5.3.2.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN

Les résultats de l'effet apporté par le Na_2SO_4 sur la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sont reportés dans la Figure 5.18. En général, la présence du Na_2SO_4 dans un traitement combiné avec la chaux et de la pouzzolane naturelle fait perturber la résistance à la compression des échantillons des deux sols argileux stabilisés. Dans le cas du SG, on assiste à une diminution progressive de la résistance à la compression lorsque la teneur en Na_2SO_4 augmente. Par exemple, pour un traitement combiné de 20%PN+8%L durant 120 jours de cure, la résistance à la compression du SG décroit de 5.9 MPa jusqu'à 5.2, 4.8 et 4.4 MPa en présence de 2, 4 et 6% du Na_2SO_4, respectivement. Cependant, après 7 jours de cure et pour le même type de sol traité avec la même combinaison, la résistance à la compression présente des augmentations de l'ordre de 25.1 et 54.2% en présence de 2 et 4% du Na_2SO_4, respectivement. Le même comportement à été observé avec les combinaisons 10%PN+4%L, 20%PN+4%L, 10%PN+8%L.

D'ailleurs, pour le même type de traitement (20%PN+8%L) en présence de 2% du Na_2SO_4, la résistance à la compression du SR stabilisé avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle présente des augmentations de l'ordre de 74.4 et 6.1% après 7 et 120 jours de cure, respectivement. Il est à noter qu'en présence de 2 et 4% du Na_2SO_4, les valeurs de la résistance à la compression des échantillons du SR traité avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle durant 7 et 30 jours sont bien plus grandes que celles des échantillons du sol non traité. D'après Sridharan et al., 1995, la présence du Na_2SO_4 dans un système de sol stabilisé à la chaux fait transformer la chaux additionnée en gypse insoluble et en hydroxyde de sodium tout en réduisant ainsi la quantité de chaux disponible pour les réactions avec le sol. Par conséquent, la présence d'hydroxyde de sodium fait augmenter le pH du sol en provoquant la dissolution d'une grande quantité de l'alumine et de la silice qui rentrent en réaction avec la chaux restante pour former des produits cimentaires. Ceci explique clairement l'augmentation significative de la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés à court terme.

Par comparaison, quelque soit la période de cure, la sensibilité de la résistance à la compression des échantillons de deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle à l'effet des sulfates est très prononcée avec la présence du $CaSO_4.2H_2O$ qu'avec présence du Na_2SO_4. En effet, les ions calcium (Ca^{2+}) nécessaires à l'échange de cations au niveau du sol sont fournis par des ions calcium libérés par le $CaSO_4.2H_2O$ alors qu'avec le Na_2SO_4 les échanges de cations doivent être assurés par l'addition de la chaux.

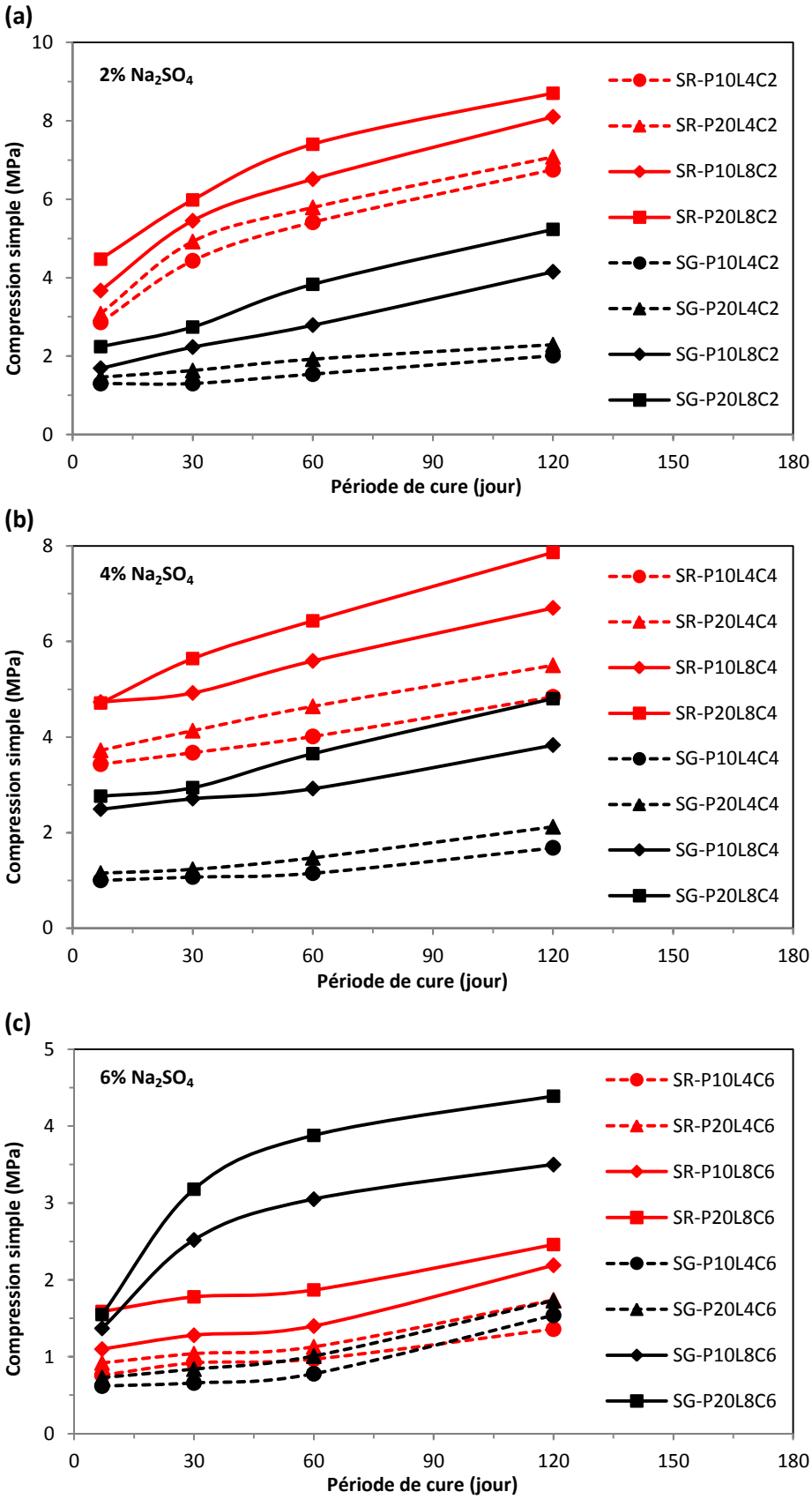


Fig. 5.18 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur la résistance à la compression non confinée des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

Il y a donc une réduction de la teneur en chaux disponible pour les réactions pouzzolaniques dans le sol en présence du Na_2SO_4 par rapport à ceux qui sont disponibles dans le sol en présence du $CaSO_4.2H_2O$ (Mitchell, 1986). De plus, il est à constater que pour une forte teneur en Na_2SO_4 (6%) et avec un traitement de 20%PN+8%L, la résistance à la compression des échantillons du SR obtenue durant 120 jours de cure est presque 4 fois plus petite (soit une chute de 69.9%) que celle des échantillons du même sol traité en absence du Na_2SO_4. Ce qui est très important de signaler que le traitement avec l'utilisation de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle a pu résister à l'altération des éprouvettes du SR malgré la présence de fortes teneurs en Na_2SO_4. Ainsi, plus la teneur en pouzzolane naturelle mélangée avec la chaux est importante plus la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés avec ou sans sulfate est importante.

5.4 Mécanismes de stabilisation et d'altération de la résistance

5.4.1 Mécanisme de stabilisation du mélange Sol-Chaux-PN

Il est connu qu'en absence du sulfate de sodium (Na_2SO_4), lorsque la chaux vive (CaO) se met au contact de l'eau ($2H_2O$), la chaux s'hydrate (ou s'hydrolyse) en premier pour former l'hydroxyde de chaux [$Ca(OH)_2$] (Eq. 1) et puis elle s'ionise pour libérer des ions de calcium (Ca^{2+}) et d'hydroxyles (OH^-) en faisant augmenter la valeur du pH de la solution très rapidement (Eq. 2):

$$CaO + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \quad (1)$$

$$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2OH^- \quad (2)$$

D'après Shi and Day (2000b), en absence du Na_2SO_4, la dissolution de la SiO_2 amorphe est très forte pour un pH égal à 12.5. Généralement, les pouzzolanes naturelles sont constituées de silice ou d'aluminosilicate. Selon leur structure, le pH aura un effet similaire sur la dissolution de la pouzzolane naturelle que celle de la SiO_2 amorphe. De plus, l'accélération de la réaction pouzzolanique est contrôlée par l'accélération de la dissolution de la pouzzolane naturelle. Par conséquent, les espèces de monosilicates et d'aluminates dépolymérisés pénètrent dans la solution en formant deux principaux composés à savoir l'hydroxyde de silicium (ou les monosilicates, $[SiO(OH)_3]^-$) et l'hydroxyde d'aluminium (ou les aluminates $[Al(OH)_4]^-$). Lorsque les ions de calcium (Ca^{2+}) contactent ces espèces dissoutes de monosilicates et d'aluminates, les composés de C-S-H et C_4AH_{13} se forment (Eqs. 3 et 4).

$$Y[SiO(OH)_3]^- + XCa^{2+} + (Z-X-Y)H_2O + (2X-Y)OH^- \rightarrow C_X\text{-}S_Y\text{-}H_Z \quad (3)$$

$$2[Al(OH)_4]^- + 4Ca^{2+} + 6H_2O + 6OH^- \rightarrow C_4AH_{13} \quad (4)$$

D'autre part, Hu et al. (2016) ont rapporté qu'il y a quatre équations de réactions physiques et chimiques (échange d'ions, la cristallisation, réactions pouzzolaniques et la carbonatation) survenus dans les mélanges de Sol-Chaux-cendres volantes sous les conditions de cure standard (Eqs. 5-8).

$$Ca(OH)_2 + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2.nH_2O \quad (5)$$

$$xCa(OH)_2 + SiO_2 + nH_2O \rightarrow xCaO.SiO_2(n+1)H_2O \quad (6)$$

$$xCa(OH)_2 + Al_2O_3 + nH_2O \rightarrow xCaO.Al_2O_3(n+1)H_2O \quad (7)$$

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (8)$$

Les composés chimiques C_X-S_Y-H_Z, C_4AH_{13}, $Ca(OH)_2.nH_2O$, $xCaO.SiO_2(n+1)H_2O$ et $xCaO.Al_2O_3(n+1)H_2O$ sont les résultats des réactions chimiques (Eqs. 3-7). Le rôle de ces composés dans les mélanges de Sol-Chaux-cendres volantes et par conséquent les mélanges de Sol-Chaux-pouzzolane naturelle est de:

- produire une couche stable de film protecteur qui enveloppe les particules de sol;
- cimenter les particules du sol;
- remplir les vides pour diminuer l'indice de vide et par conséquent la perméabilité;
- améliorer la compacité et par conséquent la résistance à la compression non confinée.

Cependant, le cristal de $CaCO_3$ (Eq. 8) a la capacité de cimenter les particules du sol et d'améliorer la résistance à la compression des deux sols traités avec les mélanges de chaux-cendres volantes ou de chaux-pouzzolane naturelle.

5.4.2 Mécanisme d'altération de la résistance du mélange Sol-Chaux-PN-Na_2SO_4

En présence du Na_2SO_4, la réaction entre le $Ca(OH)_2$ et le Na_2SO_4 en présence de l'eau a été donnée par Roy (1986) comme suit (Eq. 9):

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O + 2NaOH \quad (8)$$

D'une part, Sridharan et al. (1995) ont rapporté que la réaction entre la chaux et Na_2SO_4 en présence de l'eau fait produire un hydroxyde de sodium (NaOH), qui développe une solution alcaline plus élevée (pH élevé) par rapport à la porlandite $Ca(OH)_2$. Le pH élevé qui a été développé par le NaOH conduit à la dissolution d'une grande quantité d'alumine (Al_2O_3) et de

silice (SiO_2) qui réagissent avec le reste de la chaux pour former une quantité élevée de produits cimentaires responsables de l'augmentation considérable des valeurs de résistance à la compression notamment à très court terme (7 et 30 jours). D'autre part, la présence du Na_2SO_4 augmente la concentration des ions sulfate (SO_4^{2-}) tout en conduisant à la formation d'ettringite minérale ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$), comme suit (Eq. 10):

$$6Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + 3Na_2SO_4(sol.) + 29H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O + 6NaOH\ (sol.) \quad (10)$$

En outre, les réactions chimiques entre le Na_2SO_4 et le mélange chaux-cendres volantes ont été donné par Hu et al. (2016) come suit (Eqs.11-13):

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4.10H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O + 2NaOH + 8H_2O \quad (11)$$

$$3CaO.Al_2O_3.6H_2O + 3CaSO_4 + 25H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O \quad (12)$$

$$2(3CaO.Al_2O_3) + 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O + 4H_2O \rightarrow 3(3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.12H_2O) \quad (13)$$

Les trois nouvelles phases minérales insolubles citées ci-dessus $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$, $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$ et $3(3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.12H_2O)$ sont les résultats des réactions chimiques entre les ions SO_4^{2-} et C_X-S_Y-H_Z, C_4AH_{13}, $Ca(OH)_2.nH_2O$, xCaO.SiO_2(n+1)H_2O et xCaO.Al_2O_3(n+1)H_2O (Eqs. 10, 12 et 13). L'effet de ces minéraux insolubles sur les mélanges de chaux-cendres volantes ou de chaux-pouzzolane naturelle est de:

- absorber une grande quantité de molécules d'eau qui produisent un fort gonflement;
- combler les vides tout en réduisant le volume des vides;
- améliorer la résistance à la compression à très court terme;
- densifier la structure, réduire la résistance à la compression et détériorer les sols améliorés à très long terme.

Il est à signaler que Shi and Day (2000a) ont rapporté dans leur étude que l'ettringite peut augmenter le volume solide jusqu'à 164% alors que les composés de C-S-H font l'augmenter seulement jusqu'à 17,5 %. Dans le cas de cette étude, il convient de noter que les résistances initiales qui sont fortement élevées peuvent être expliquées par l'accélération des réactions pouzzolaniques au jeune âge et ainsi de la formation d'ettringite à long terme due à la présence du Na_2SO_4.

5.5 Conclusion

De nombreux tests ont été effectués au niveau du laboratoire en vue d'étudier les différents effets apportés par la présence des sulfates ($CaSO_4.2H_2O$ et Na_2SO_4) sur la résistance à la compression non confinée des deux sols argileux (SG et SR) traités avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison. A partir des résultats des essais effectués, les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- La stabilisation avec l'addition de la chaux seule sans présence des sulfates fait augmenter considérablement la résistance à la compression des échantillons de deux sols argileux étudiés. Cette augmentation dépend de la teneur en chaux additionnée et de la période de cure.
- L'utilisation de la pouzzolane naturelle seule a une influence marginale sur la résistance à la compression des deux sols argileux.
- Néanmoins, lorsque la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées, la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés devient très élevée et elle augmente avec l'augmentation de la teneur de chaux-pouzzolane naturelle et de la période de cure.
- Avec la pouzzolane naturelle en tant qu'additif, une augmentation significative de la résistance à la compression a été observée sur les échantillons des deux sols argileux traités en présence du $CaSO_4.2H_2O$ en comparaison avec les échantillons traités sans présence du $CaSO_4.2H_2O$ à savoir que le SR a des meilleurs résultats. Ceci est probablement attribué aux particules fines du $CaSO_4.2H_2O$ qui font augmenter la compacité des échantillons des deux sols argileux traités.
- Les échantillons des deux sols traités avec l'addition de la chaux en présence du $CaSO_4.2H_2O$ ne montrent qu'une légère augmentation de la résistance à la compression par rapport aux échantillons des deux sols traités en absence du $CaSO_4.2H_2O$. Ceci est attribué au fait que le $CaSO_4.2H_2O$ a une aptitude de réduire la solubilité de la chaux hydratée dans les échantillons des deux sols argileux en tant que stabilisant.
- Une augmentation considérable de la résistance à la compression des échantillons des deux sols argileux contenant du $CaSO_4.2H_2O$ a été observée lorsque la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est utilisée, particulièrement, avec la période de cure.
- L'augmentation progressive dans la résistance à la compression des deux sols argileux étudiés notamment le SR peut être expliqué par la formation d'ettringite minérale favorisée par la présence du $CaSO_4.2H_2O$ dans les mélanges de Sol-Chaux-PN. En effet,

l'augmentation de la résistance à la compression est particulièrement importante lorsque la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ augmente.

- Les grandes valeurs de la résistance à la compression des échantillons des deux sols argileux stabilisés sont attribuées à la présence du $CaSO_4.2H_2O$ qui fait accélérer la réaction chimique entre le sol, la chaux et la pouzzolane naturelle.
- L'augmentation de la cohésion des deux sols argileux stabilisés avec l'âge de cure peut être expliquée par la formation d'ettringite en raison de la présence du $CaSO_4.2H_2O$ notamment avec des fortes teneurs.
- La composition minéralogique du sol a une importance capitale et joue un rôle très important dans le succès du processus de la stabilisation particulièrement en présence du $CaSO_4.2H_2O$.
- L'augmentation précoce de la résistance à la compression des deux sols argileux peut être attribuée à l'accélération des réactions pouzzolaniques causées par l'hydroxyde de sodium provenant de l'addition du Na_2SO_4.
- La diminution progressive de la résistance à la compression du SG et la dégradation totale des éprouvettes du SR pendant la cure peut s'expliquer par la formation d'ettringite minérale favorisée par la présence du Na_2SO_4 dans les mélanges de Sol-Chaux-PN. L'influence est particulièrement potentielle lorsque la teneur en Na_2SO_4 utilisée est importante.
- La pouzzolane naturelle est un bon additif quand elle est combinée avec de la chaux puisqu'elle résiste à la dégradation des éprouvettes lorsque le Na_2SO_4 se présente avec des fortes teneurs.
- La nature minéralogique du sol présente une importance capitale et joue un rôle très important dans la réussite ou l'échec d'un traitement en dominant les effets eux-mêmes apportés par le Na_2SO_4 sur les sols stabilisés.

Chapitre 6

Effet des Sulfates sur la Résistance au Cisaillement Direct

6.1. Introduction
6.2. Résistance au cisaillement des sols traités sans sulfates
6.3. Résistance au cisaillement des sols traités avec sulfates
6.4. Conclusion

6.1 Introduction

En général, l'étude de la stabilité des fondations, des remblais, des ouvrages de soutènement, des talus naturels ou artificiels…etc., nécessite de connaître la résistance au cisaillement du sol. La résistance au cisaillement est définie comme étant la contrainte de cisaillement au moment de la rupture. Les résultats de la résistance au cisaillement issus des essais de laboratoire ou in situ permettent de tracer la droite intrinsèque et de déduire les paramètres de cisaillement des deux sols à savoir la cohésion et l'angle de frottement interne. Cependant, les sols fins constituent un vrai handicap pour les ingénieurs ce qui leur conduit à les améliorer en vue de répondre aux exigences normatives de construction. Le traitement chimique des sols par l'utilisation des additifs minéraux permet d'améliorer la résistance et les paramètres de cisaillement, par conséquent, la stabilité des ouvrages en question.

Néanmoins, un autre problème majeur est lié à la présence des sulfates lors de la stabilisation chimique des sols en favorisant la formation de nouvelles phases minérales fortement expansives (ex: ettringite). L'ettringite peut intervenir plus souvent à très long terme pour dégrader et altérer la cohérence des particules du sol, par conséquent, la stabilité de l'ouvrage. Dans ce chapitre, nous allons analyser, comparer et interpréter les résultats des effets apportés par l'utilisation de différentes teneurs en sulfate monovalent (sulfate de sodium anhydre, Na_2SO_4) et divalent (sulfate de calcium hydraté, $CaSO_4.2H_2O$) sur la résistance au cisaillement de deux sols argileux traités avec l'addition de différentes proportions de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison en fonction de la période de cure.

6.2 Résistance au cisaillement des sols traités sans sulfates

6.2.1 Effet des additifs sur la résistance au cisaillement

Les résultats de l'effet de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leurs combinaisons sur la variation temporelle de la résistance au cisaillement maximale des deux sols argileux étudiés en absence des sulfates sont montrés dans les Figures 6.1 et 6.2.

6.2.1.1 Effet de la chaux

Les Figures 6.1 et 6.2 montrent que la résistance au cisaillement des deux sols argileux stabilisés augmente avec la période de cure. L'utilisation de la chaux seule comme stabilisant fait cimenter les particules des sols argileux en augmentant significativement leur résistance au cisaillement, particulièrement, au delà de 30 jours de cure. En outre, La résistance au cisaillement augmente également avec l'augmentation de la teneur en chaux additionnée à savoir que cette augmentation est très prononcée avec le SR qu'avec le SG où la différence

devient presque comparable au bout de 120 jours de cure. Par exemple, avec une charge normale de 300 KPa, la résistance au cisaillement développée par le SG traité avec 8% de chaux est de 301, 416.9, 495.5 et 670.2 KPa après 7, 30, 60 et 120 jours de cure, respectivement. Cependant, avec la même charge normale, la résistance au cisaillement développée par le SR traité avec la même teneur en chaux est de 372, 481.3, 584.1 et 687 KPa après 7, 30, 60 et 120 jours de cure, respectivement.

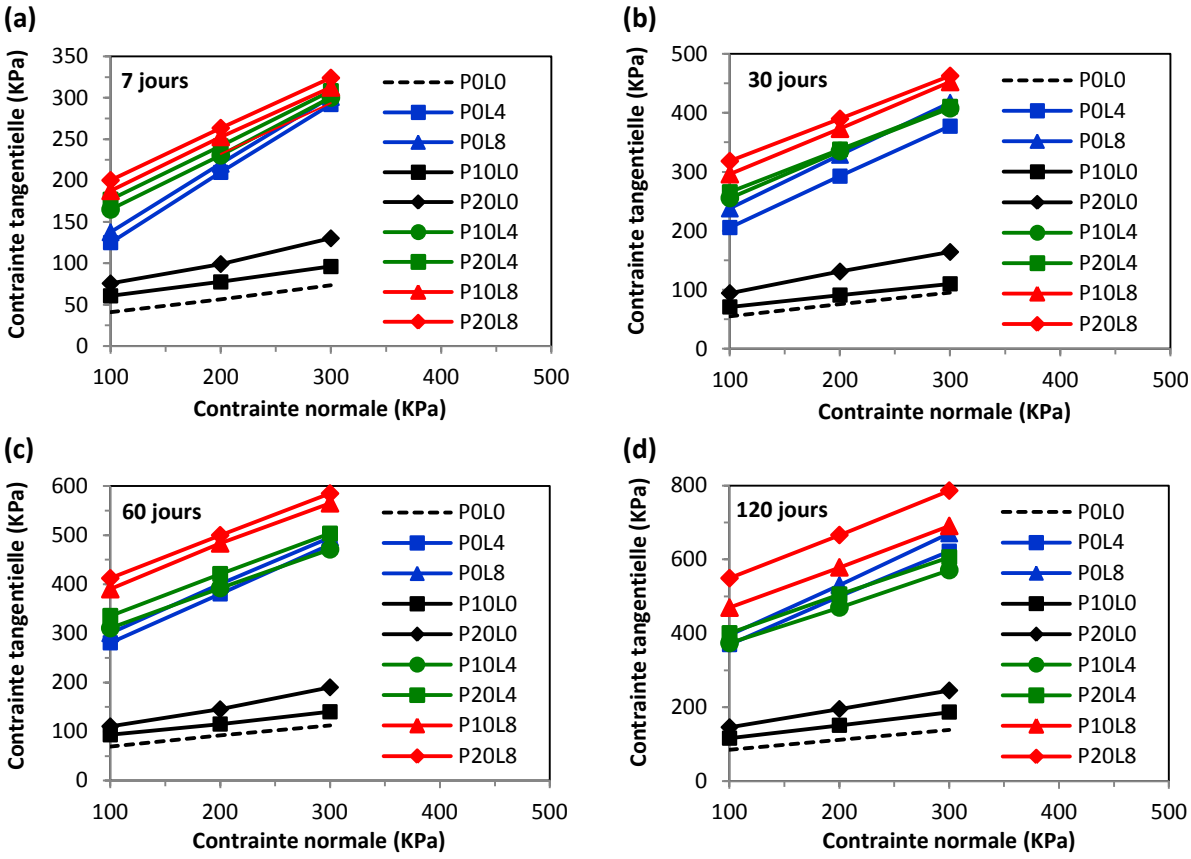


Fig. 6.1 — Effet de différents pourcentages de chaux, de PN et de L-PN sur la résistance au cisaillement du SG stabilisé en absence des sulfates pour différentes périodes de cure.

6.2.1.2 Effet de la PN

Concernant l'utilisation de la pouzzolane naturelle en tant qu'additif (Fig. 6.1 et 6.2), il semble que l'effet de la variation temporelle de la résistance au cisaillement pour les deux sols 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. Dans cette étude, la chaux a été choisie pour jouer le rôle d'un catalyseur (activateur chimique) en vue de réactiver la silice amorphe (SiO_2) qui se présente dans la pouzzolane naturelle pour le cas d'un traitement combiné.

6.2.1.3 Effet combiné de chaux-PN

La combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle fait apporter un effet significatif sur la résistance au cisaillement des deux sols argileux par rapport à l'utilisation de la chaux ou de la pouzzolane naturelle toutes seules. En effet, une augmentation considérable de la résistance au cisaillement des deux sols argileux stabilisés a été obtenue à très long terme à savoir que cette augmentation est très importante quand la teneur en chaux-pouzzolane naturelle utilisée est importante (ex: 20%PN+8%L) (Fig. 6.1 et 6.2).

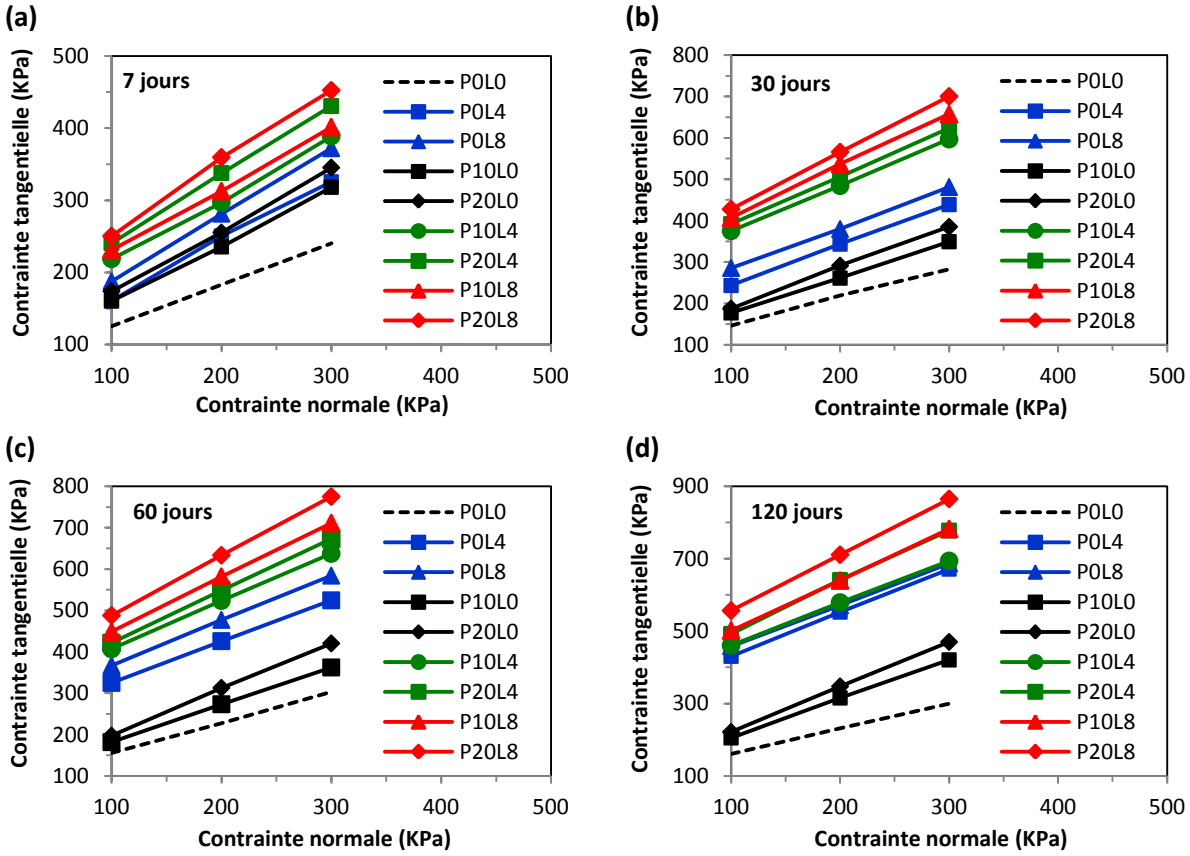


Fig. 6.2 — Effet de différents pourcentages de chaux, de PN et de L-PN sur la résistance au cisaillement du SR stabilisé en absence des sulfates pour différentes périodes de cure.

6.2.2 Effet des additifs sur la cohésion

Les résultats de l'effet de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leurs combinaisons sur la variation temporelle de la cohésion des deux sols argileux traités en absence des sulfates sont illustrés dans la Figure 6.3. Dans cette étude, seuls les paramètres de cisaillement (en utilisant les résistances maximales de cisaillement) ont été calculés ici, parce que dans l'analyse de la stabilité des pentes ou d'autres projets nécessitant de faire une analyse de stabilité, la résistance au cisaillement maximale est généralement adoptée comme un paramètre essentiel pour ce genre d'étude.

6.2.2.1 Effet de la chaux

La stabilisation avec l'addition de la chaux seule des deux sols argileux en absence du Na_2SO_4 fait apporter un effet bénéfique sur la variation temporelle de la cohésion. D'autre part, la cohésion augmente considérablement avec l'augmentation de la teneur en chaux et de la période de cure, notamment, à long terme. Cette augmentation est plus prononcée pour le SR que pour le SG. Par exemple, la cohésion développée par le SG traité avec 8% de chaux est de 56.1 KPa au bout de 7 jours de cure puis, elle augmente jusqu'à 148.5 et 256.9 KPa après 30 et 120 jours de cure, respectivement (Fig. 6.3a). Cependant, pour la même teneur en chaux, la cohésion produite par le SR est de 95.8 KPa après 7 jours de cure puis, elle augmente jusqu'à 166.7 et 343.4 KPa au bout de 30 et 120 jours de cure, respectivement (Fig. 6.3b). Un comportement similaire a été observé par Gay and Schad. (2000) et Harichane et al. (2011a). L'augmentation de la cohésion avec la teneur en chaux additionnée est attribuée à l'adhésion des particules argileuses entre elles tout en formant des agrégats plus gros et fortement liés (Ola, 1978). Harichane et al. (2011a) ont rapporté que ce comportement est probablement dû à l'effet d'auto-durcissement lié à la chaux, ça d'une part. D'autre part, ceci peut être attribué à la cimentation et aux réactions pouzzolaniques qui se produisent au fil du temps (Lees et al., 1982; Bell, 1989).

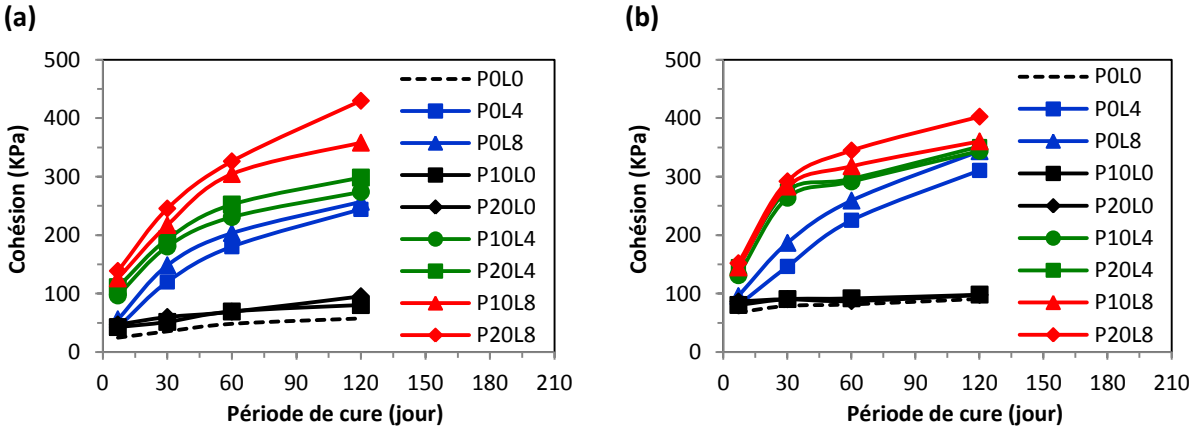


Fig. 6.3 — Effet de différents pourcentages de chaux, de PN et de L-PN sur la cohésion des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): SG, (b): SR.

6.2.2.2 Effet de la PN

Il est à observer que l'effet de la pouzzolane naturelle sur la cohésion des deux sols argileux étudiés est marginal même avec la période de cure. La pouzzolane naturelle se comporte comme un sol naturel en absence d'un élément activateur des réactions pouzzolaniques. En concluant que la pouzzolane naturelle n'est pas recommandée d'être utilisée toute seule en tant que stabilisant (Fig. 6.3a et b).

6.2.2.3 Effet combiné de chaux-PN

Dans le cas où la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées, l'effet provoqué se multiplie par rapport à l'utilisation de la chaux seule, en particulier, à long terme. Par exemple, la cohésion du SG traité avec la combinaison de 10% de pouzzolane naturelle et 4% de chaux était de 96.8 KPa après 7 jours de cure mais, elle augmente jusqu'à 274 KPa au bout de 120 jours de cure (Fig. 6.3a). Cependant, pour un traitement avec la même combinaison (10%PN+4%L), la cohésion du SR était de 131.4 KPa pour 7 jours de cure puis, elle devient 344.1 KPa après 120 jours de cure (Fig. 6.3b). De plus, la cohésion des deux sols argileux augmente lorsque la quantité de chaux-pouzzolane naturelle additionnée augmente à savoir que cette augmentation est plus prononcée pour le SR que pour le SG.

6.2.3 Effet des additifs sur l'angle de frottement interne

Les résultats de l'effet de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leurs combinaisons sur la variation temporelle de l'angle de frottement interne des deux sols argileux traités en absence des sulfates sont illustrés dans la Figure 6.4.

6.2.3.1 Effet de la chaux

Pour les deux sols argileux, l'angle de frottement interne augmente avec la période de cure et la teneur en chaux additionnée. Cependant, des augmentations assez faibles dans les valeurs de l'angle de frottement interne des deux sols argileux ont été enregistrées après 7 et 30 jours de cure. Par contre, des augmentations significatives ont été observées à partir de 60 jours de cure à savoir que cette augmentation est plus prononcée pour le SG que pour le SR, particulièrement, à long terme. Cependant, Sezer et al. (2006) ont utilisé une forte teneur de chaux-cendres volantes en tant que stabilisant dont ils ont conclu que l'augmentation de l'angle de frottement interne est probablement due au fait que les cendres volantes ont un angle de frottement interne bien plus élevé que celui du sol non traité.

6.2.3.2 Effet de la PN

En général, pour les deux sols argileux étudiés, la stabilisation avec l'utilisation de la pouzzolane naturelle seule fait provoquer un effet marginal sur l'angle de frottement interne même pour un traitement à très long terme.

6.2.3.3 Effet combiné de chaux-PN

Pour les échantillons du SR stabilisé avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle, nous constatons qu'il y a une augmentation significative de l'angle de frottement interne après

7 et 30 jours de cure. Cependant, un effet marginal a été observé au-delà de 30 jours de cure. Par exemple, l'angle de frottement interne développé par le SG traité avec la combinaison de 20%PN+8%L est de 31.7° et 35.8° respectivement avec 7 et 30 jours de cure mais, il augmente jusqu'à 40.8 et 49.8° après 60 et 120 jours de cure, respectivement (Fig. 6.4a).

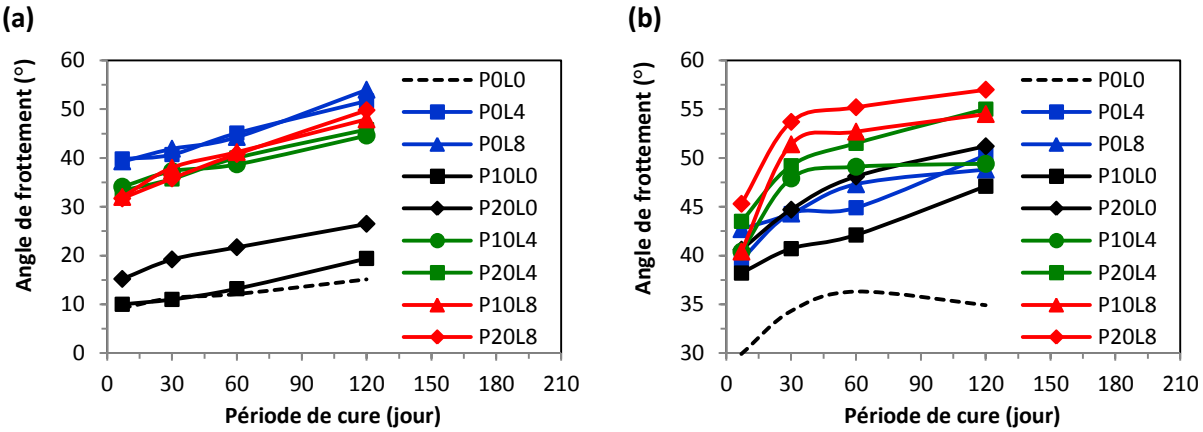


Fig. 6.4 — Effet de différents pourcentages de chaux, de PN et de L-PN sur l'angle de frottement interne des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): SG, (b): SR.

Cependant, pour un traitement avec la même combinaison, la cohésion produite par le SR est de 45.3° et 53.7° respectivement avec 7 et 30 jours de cure mais, il augmente jusqu'à 55.2 et 57° après 60 et 120 jours de cure, respectivement (Fig. 6.4b). D'autre part, pour le cas du SG, l'angle de frottement interne augmente avec la période de cure et en particulier à très long terme. Harichane et al. (2011a) ont indiqué que l'amélioration de la cohésion et de l'angle de frottement interne peut être due à l'activité pouzzolanique et à la propriété de l'auto-cimentation du mélange chaux-pouzzolane naturelle. Il est donc clair de constater que la floculation des particules augmente la valeur de l'angle de frottement interne alors que la cimentation de particules augmente la valeur de la cohésion.

6.3 Résistance au cisaillement des sols traités avec sulfates

6.3.1 Effet du $CaSO_4$ sur la résistance au cisaillement

Les résultats de l'effet du $CaSO_4.2H_2O$ sur la variation temporelle de la résistance au cisaillement maximale des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sont montrés dans les Figures 6.5–6.7.

6.3.1.1 Cas du traitement à la chaux

Lorsque le $CaSO_4.2H_2O$ se présente avec une faible teneur, l'addition de la chaux seule fait augmenter considérablement la résistance au cisaillement des deux sols argileux étudiés

notamment avec la période de la cure. Le même comportement a été observé à court terme lorsque le $CaSO_4.2H_2O$ se présente avec une forte teneur où la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation du $CaSO_4.2H_2O$. Ainsi, pour les deux sols argileux, la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ et de la période de cure à savoir que cette augmentation est très prononcée avec le SR qu'avec le SG.

6.3.1.2 Cas du traitement avec la PN

Pour une faible teneur en $CaSO_4.2H_2O$, 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 $CaSO_4.2H_2O$.

6.3.1.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN

Les meilleurs résultats de la résistance au cisaillement ont été achevés lorsque la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées. Avec une faible teneur en $CaSO_4.2H_2O$, l'utilisation de la chaux seule en tant que stabilisant fait augmenter significativement la résistance au cisaillement des deux sols argileux étudiés particulièrement avec la période de la cure. Un comportement similaire a été observé à très court terme lorsque le $CaSO_4.2H_2O$ se présente avec une forte teneur où la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation du $CaSO_4.2H_2O$. Ainsi, pour les deux sols argileux traités, la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ et de la période de cure à savoir que cette augmentation est très prononcée avec le SR qu'avec le SG. D'après Aldaood et al. (2014a), l'augmentation significative de la résistance au cisaillement des deux sols argileux stabilisés avec la chaux seule ou combinée avec la pouzzolane naturelle est due à la présence du $CaSO_4.2H_2O$ qui fait accélérer la réaction chimique entre le sol et la chaux. De plus, l'augmentation de la résistance au cisaillement des deux sols argileux en présence du $CaSO_4.2H_2O$ peut être expliquée par la formation de l'ettringite expansive.

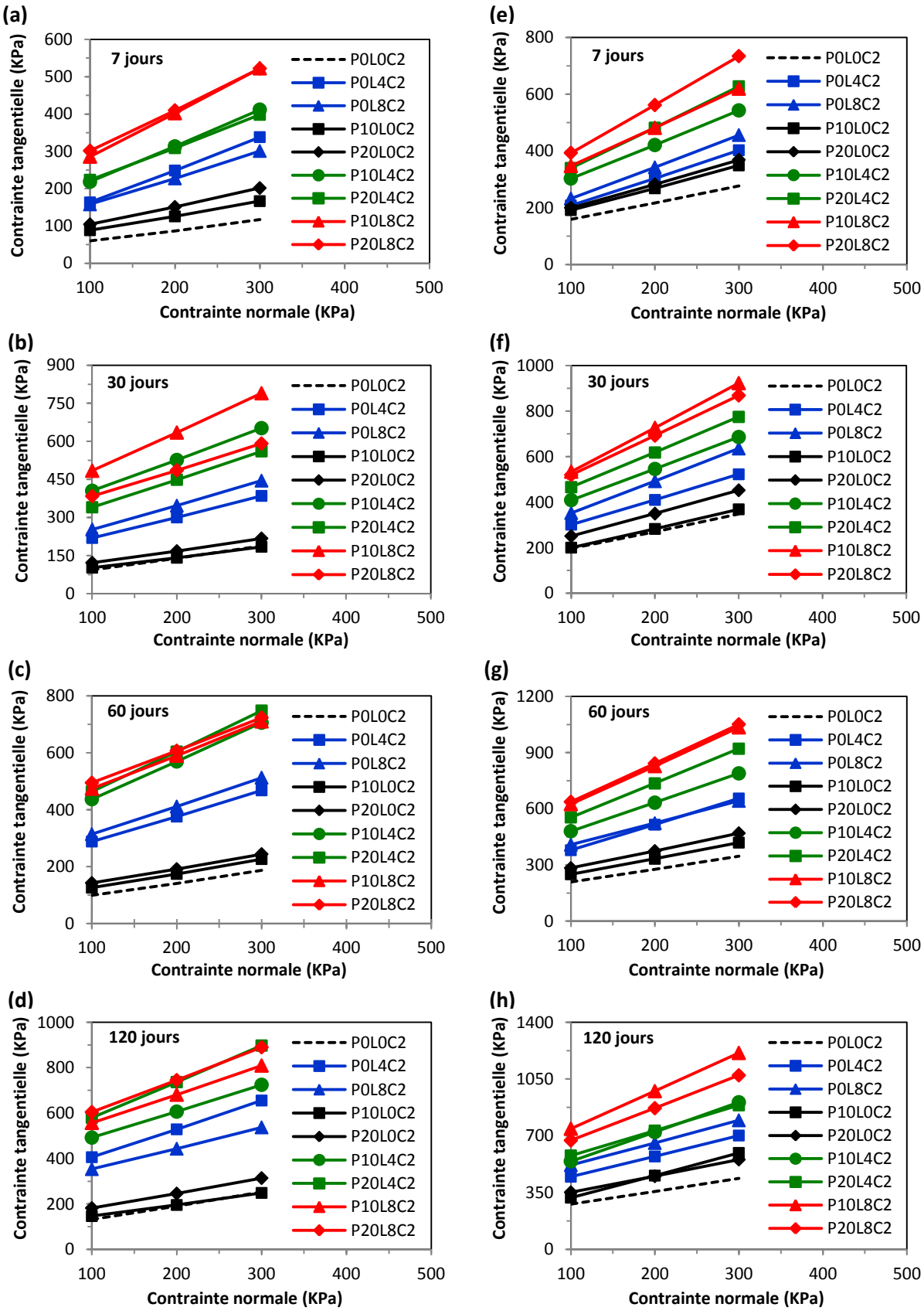


Fig. 6.5 — Effet de 2% du $CaSO_4.2H_2O$ sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.

.

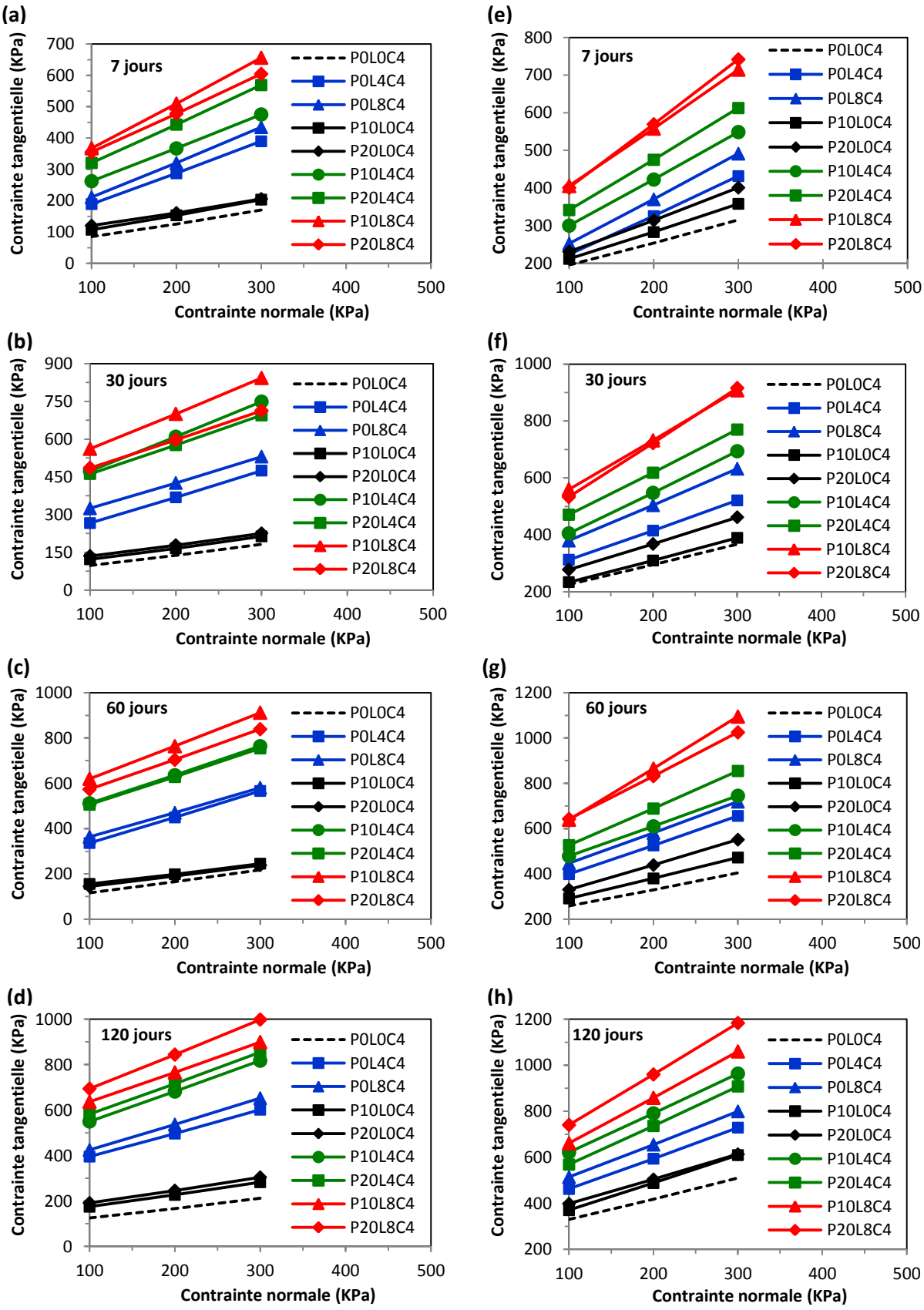


Fig. 6.6 — Effet de 4% du $CaSO_4.2H_2O$ sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.

.

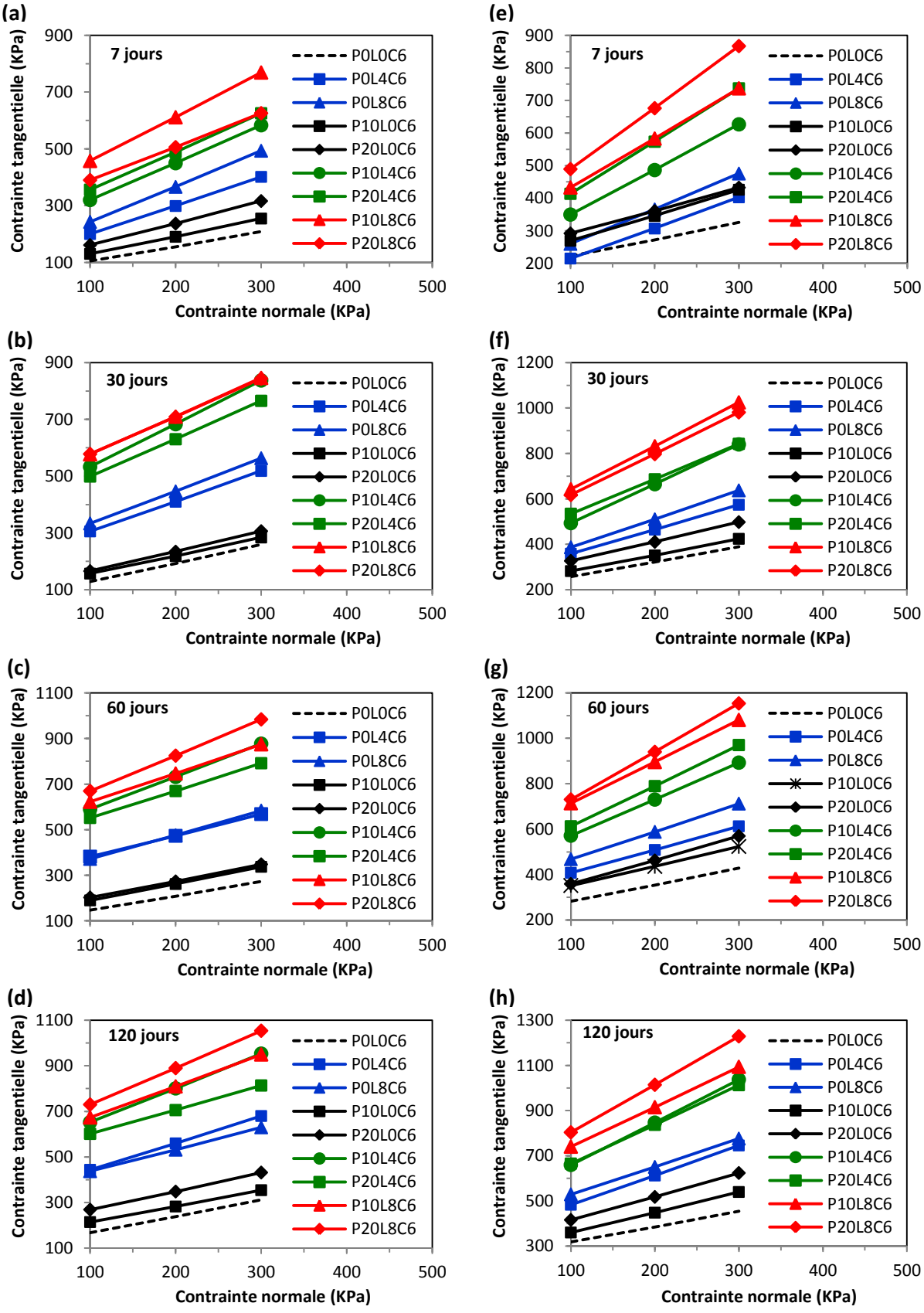


Fig. 6.7 — Effet de 6% du $CaSO_4.2H_2O$ sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.

6.3.2 Effet du Na_2SO_4 sur la résistance au cisaillement

Les résultats de l'effet de différents dosages du Na2SO4 sur la variation temporelle de la résistance au cisaillement maximale des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sont reportés sur les Figures 6.8–6.10.

6.3.2.1 Cas du traitement à la chaux

Dans le cas où le Na_2SO_4 se présente avec une faible teneur (2%) dans les échantillons des deux sols argileux étudiés, l'addition de chaux seule dans les deux sols fait augmenter considérablement la résistance au cisaillement et notamment avec la période de cure. Le même comportement a été observé à court terme (7 à 30 jours) pour des teneurs supérieures à 2% en Na_2SO_4 où la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4. Cela est lié à la présence du Na_2SO_4 dans le sol stabilisé tout en faisant transformer la chaux additionnée en forme de gypse insoluble et de l'hydroxyde de sodium et ainsi de réduire la quantité de chaux disponible pour les réactions avec le sol. Cependant, la présence d'hydroxyde de sodium augmente le pH et en provoquant la dissolution d'une grande quantité d'alumine et de silice qui rentrent en réaction avec la chaux restante pour former des produits cimentaires. Ce processus chimique explique clairement l'augmentation significative de la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés à court terme (Sridharan et al., 1995). Ainsi, pour les deux sols argileux et après 30 jours de cure, la résistance au cisaillement décroit avec la période de cure et la teneur en Na_2SO_4 à l'exception des échantillons traités en présence de 2% du Na_2SO_4. En revanche, pour le cas du SR traité à la chaux seule, les échantillons sont entièrement altérés après 30 et 60 jours de cure en présence de 6 et 4% du Na_2SO_4, respectivement.

6.3.2.2 Cas du traitement avec la PN

Pour une faible teneur en Na_2SO_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 Na_2SO_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 Na_2SO_4, respectivement.

6.3.2.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN

D'ailleurs, l'augmentation de la résistance au cisaillement est significativement importante lorsque la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées. Les échantillons stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle ont pu résister à la dégradation causée par l'ettringite par rapport aux échantillons traités avec l'addition de chaux ou de la pouzzolane naturelle toute seule. Par comparaison, quelque soit le type du traitement, les valeurs de la résistance au cisaillement développées par le $CaSO_4.2H_2O$ sont bien plus élevées que celles développées par le Na_2SO_4.

L'augmentation précoce de la résistance au cisaillement en présence du Na_2SO_4 peut s'expliquer par la formation de l'ettringite qui fait diminuer la résistance du SG et détruire les éprouvettes du SR stabilisé. En effet, Shi and Day. (2000b) ont confirmé qu'en présence du Na_2SO_4, la réaction augmente la valeur du pH dans le sol à savoir que la dissolution du SiO_2 amorphe est très forte pour un pH supérieur à 12.5. Généralement, les pouzzolanes naturelles sont constituées de silice ou d'aluminosilicate. Selon leur structure, le pH aura un effet similaire sur la dissolution de la pouzzolane naturelle que celle de la SiO_2 amorphe du sol. De plus, l'accélération de la dissolution de la pouzzolane naturelle est contrôlée par l'accélération des réactions pouzzolaniques. Par conséquent, les espèces de monosilicates et d'aluminates dépolymérisés pénètrent dans la solution en formant deux principaux composés à savoir l'hydroxyde de silicium ($[SiO(OH)_3]^-$) et l'hydroxyde d'aluminium ($[Al(OH)_4]^-$). Lorsque les ions de calcium contactent ces espèces dissoutes de monosilicates et d'aluminates, les composés de C-S-H et C_4AH_{13} se forment. Dans le même temps, l'introduction du Na_2SO_4 fait augmenter la concentration des ions du SO_4^{2-} et conduire à la formation d'ettringite tout en densifiant la structure et en augmentant, ou voire détruire, la résistance du sol stabilisé. Ils ont rapporté dans leur étude que l'ettringite peut augmenter le volume solide de 164% alors que les composés de C-S-H font l'augmenter seulement de 17,5 %. Les mécanismes de stabilisation et de perturbation du processus de stabilisation qui peuvent se produire dans le système Sol-Chaux-PN-Na_2SO_4 sont présentés dans le chapitre 5 précédent.

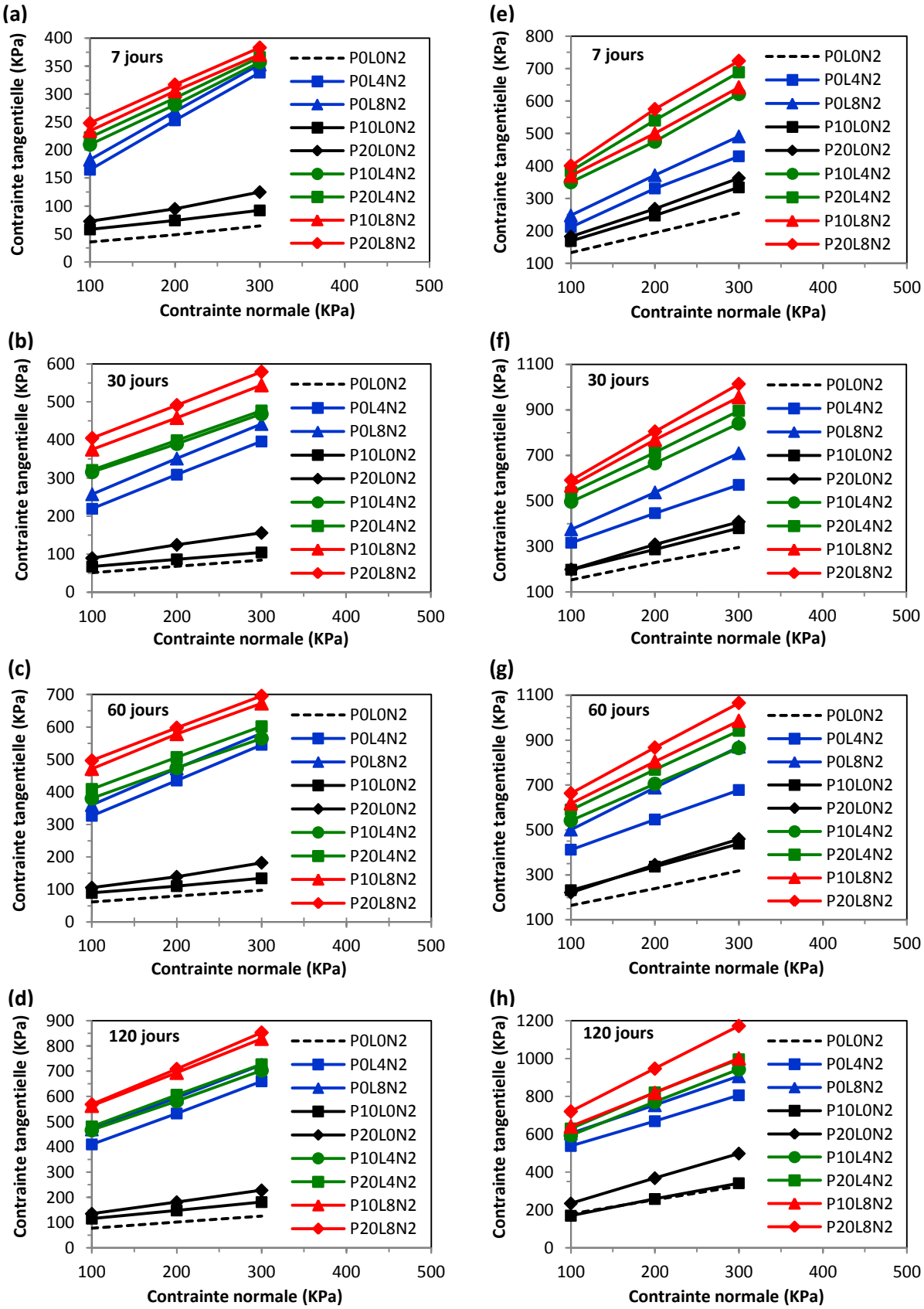


Fig. 6.8 — Effet de 4% du Na_2SO_4 sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.

.

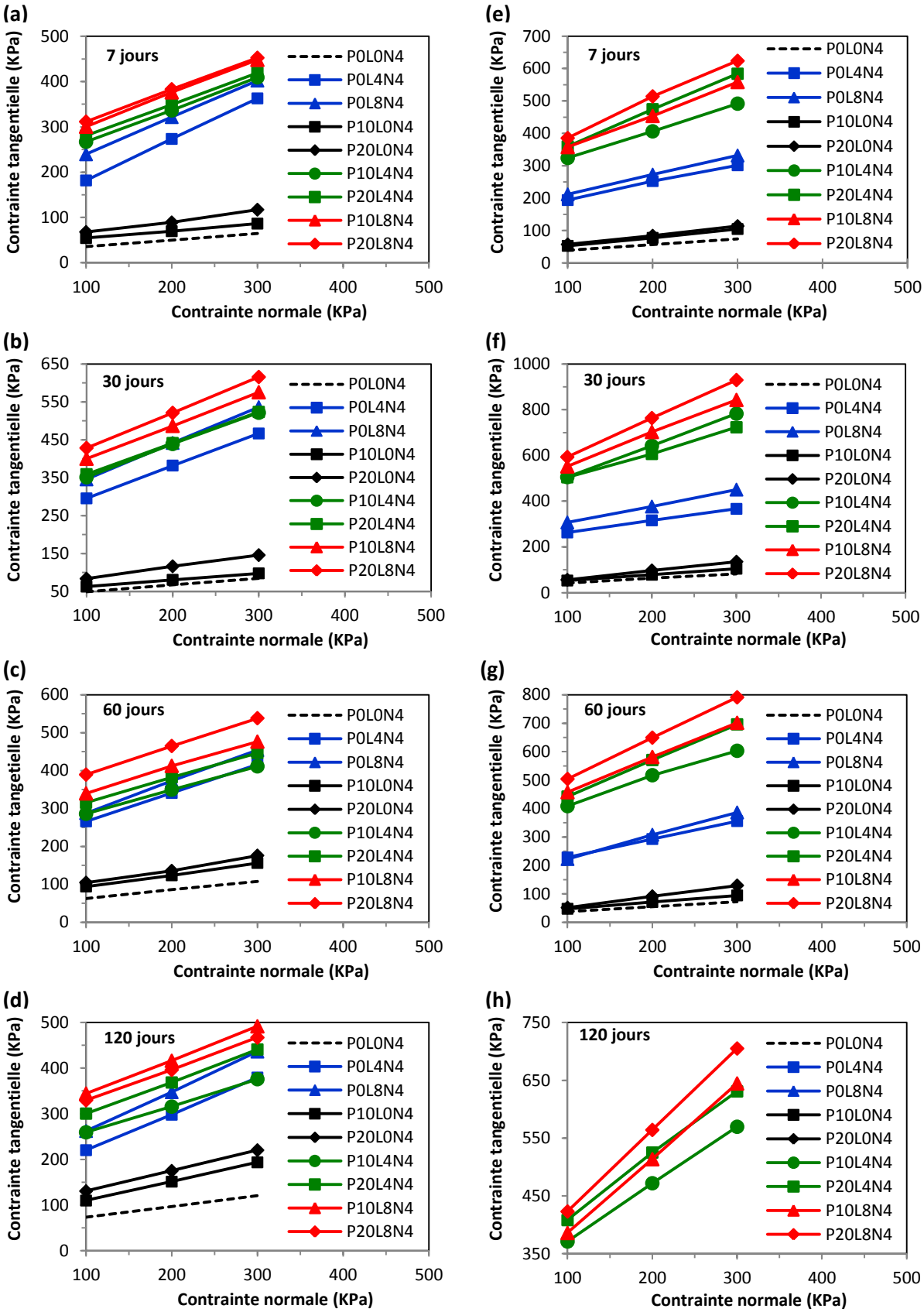


Fig. 6.9 — Effet de 4% du Na_2SO_4 sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.

.

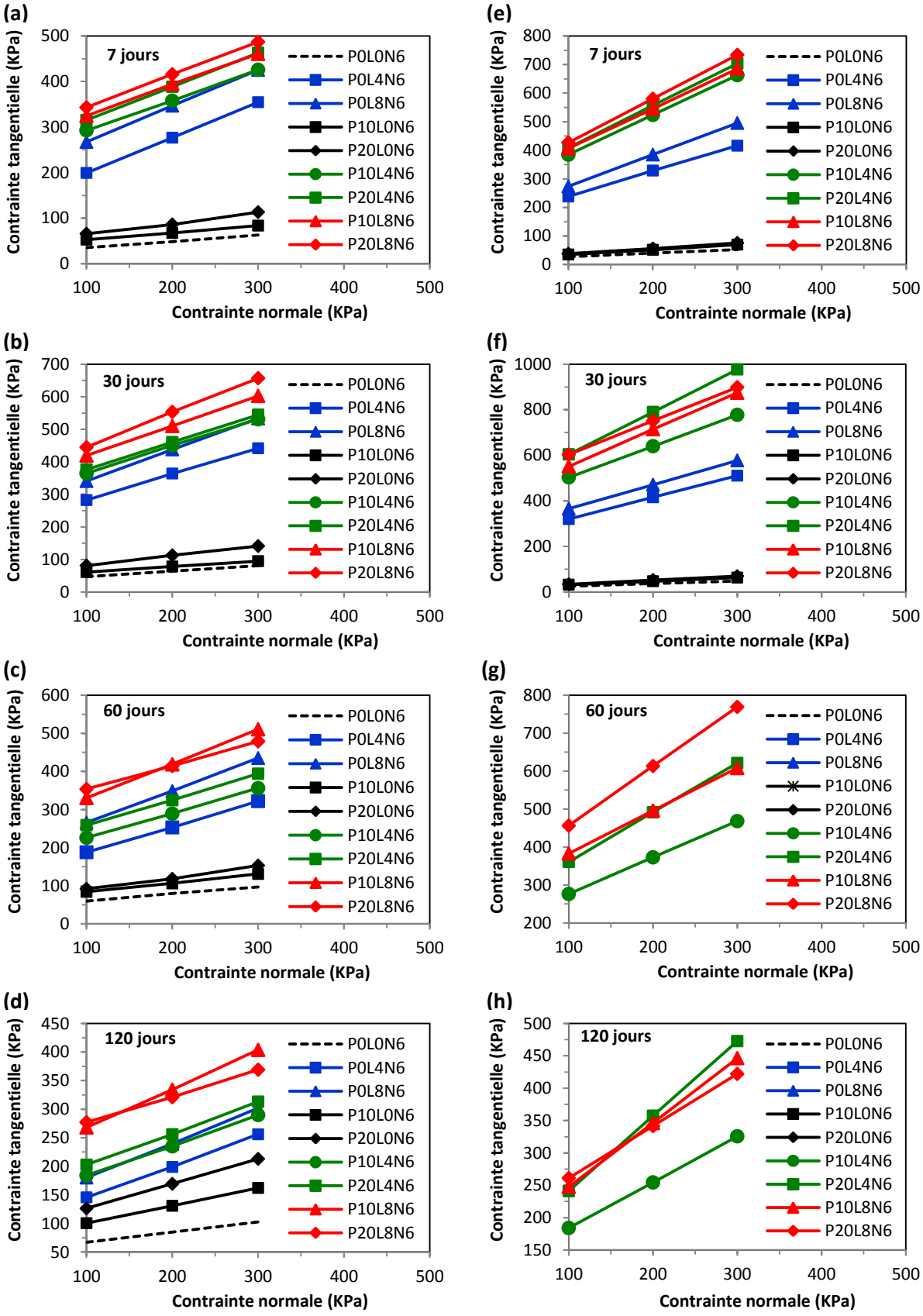


Fig. 6.10 — Effet de 6% du Na_2SO_4 sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.

6.3.3 Effet du $CaSO_4$ sur la cohésion

Les résultats de l'effet de différents pourcentages du $CaSO_4.2H_2O$ sur la cohésion des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sont reportés sur la Figure 6.11.

6.3.3.1 Cas du traitement à la chaux

La cohésion augmente de manière significative avec la période de cure et en particulier au-delà de 30 jours de cure lorsque la chaux est ajoutée toute seule aux deux sols argileux traités en présence d'une faible teneur en $CaSO_4.2H_2O$. Par exemple, pour 2% du $CaSO_4.2H_2O$, la cohésion du SG stabilisé avec 8% de chaux était de 85.9 KPa au bout 7 jours de cure alors qu'elle augmente jusqu'à 260.9 KPa après une cure 120 jours (Fig. 6.11(a-c)). En revanche, pour une même teneur en chaux, la cohésion du SR était de 120.4 KPa au bout de 7 jours de cure alors qu'elle augmente jusqu'à 381 KPa après 120 jours de cure (Fig. 6.11(d-f)). Cependant, si la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ est supérieure à 2%, la cohésion des deux sols argileux stabilisés augmente fortement avec la période de cure et notamment à très long terme. En général, la cohésion des deux sols argileux augmente avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ et de la période de cure.

6.3.3.2 Cas du traitement avec la PN

Pour les deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle seule et lorsque le $CaSO_4.2H_2O$ se présente avec une faible teneur, il a été constaté qu'il y a eu une augmentation significative de la variation temporelle de la cohésion et notamment avec la période de cure. Cependant, à très court terme, la cohésion des deux sols argileux augmente avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ et de la période de cure. Il est donc très clair que l'augmentation de la cohésion en présence du $CaSO_4.2H_2O$ se traduit par l'amélioration de la résistance des deux sols stabilisés. La cohésion des éprouvettes des deux sols argileux non traités ou traités avec l'addition de la pouzzolane naturelle seule a été significativement améliorée en présence du $CaSO_4.2H_2O$ et en particulier avec une forte teneur en sulfate utilisé. Pour le moment, il n'est pas possible d'expliquer cette augmentation parce qu'elle n'est certainement pas liée à la formation éventuelle de l'ettringite dans les échantillons des deux sols stabilisés. Ces observations ont été confirmées par des analyses de DRX reportées sur les Figures 5.2(f) et 5.3(f) (déjà citées au Chapitre 5). En outre, l'augmentation de la cohésion a été fortement marquée dans le SR que dans le SG et en particulier à long terme.

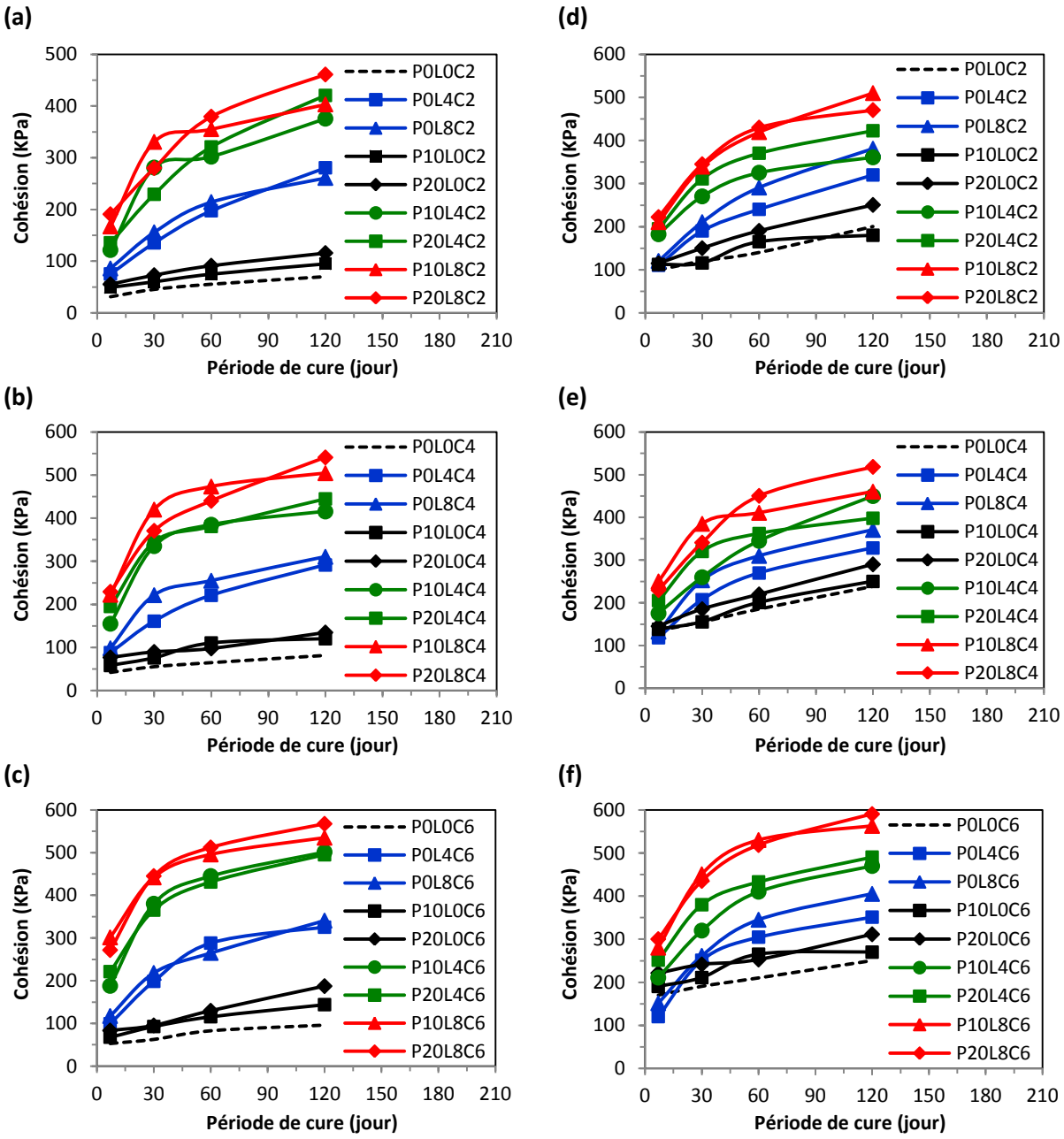


Fig. 6.11 — Effet de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ sur la cohésion des sols argileux stabilisé par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.

6.3.3.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN

L'addition de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle aux deux sols argileux en présence d'une faible teneur en $CaSO_4.2H_2O$ fait augmenter leur cohésion de manière significative avec la période de cure et notamment à partir de 60 jours. Par exemple, en présence de 2% du $CaSO_4.2H_2O$, la cohésion des SG et SR stabilisés avec la combinaison de 20%PN+8%L peut atteindre des valeurs de 461 et 470.6 KPa au bout de 120 jours de cure, respectivement. Cependant, pour les sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en présence de fortes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ (plus 2%), la cohésion

augmente considérablement avec la période de cure et en particulier à très long terme. Par exemple, en présence de 6% du $CaSO_4.2H_2O$, la cohésion des SG et SR stabilisés avec la même combinaison (20%PN+8%L) peut atteindre des valeurs de 567.5 et 590.4 KPa au bout de 120 jours de cure, respectivement.

En général, la cohésion des deux sols argileux stabilisés augmente avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ additionnée et de la période de cure. A court terme, l'augmentation de la cohésion et par conséquent la résistance au cisaillement peut être expliquée par la présence du $CaSO_4.2H_2O$ qui fait accélérer la réaction chimique entre le sol et la chaux (Aldaood et al., 2014a). A long terme, l'augmentation de la résistance au cisaillement est certainement liée à la formation d'ettringite qui est confirmée par des analyses de DRX (Figures 5.2(d) et 5.3(d)).

6.3.4 Effet du Na_2SO_4 sur la cohésion

Les résultats de l'effet apporté par le Na_2SO_4 sur la variation temporelle de la cohésion des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sont présentés dans la Figure 6.12.

6.3.4.1 Cas du traitement à la chaux

D'ailleurs, l'addition de la chaux seule aux deux sols argileux traités en présence d'une faible teneur en Na_2SO_4 fait augmenter considérablement leur cohésion avec la cure et en particulier au-delà de 60 jours de cure. Par exemple, la cohésion du SG stabilisé avec 8% de chaux est estimée à 98.4 KPa au bout de 7 jours de cure mais, elle augmente jusqu'à 340.9 KPa au bout de 120 jours de cure (Fig. 6.12(a-c)). En revanche, avec la même teneur en chaux, la cohésion du SR est estimée à 126.4 KPa au bout de 7 jours de cure mais, elle devient 453.3 KPa après 120 jours de cure (Fig. 6.12(d-f)).

De plus, après 30 jours de cure, la cohésion des échantillons du SG contenant plus de 2% du Na_2SO_4 décroît avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4 et de la période de cure. Cependant, après 30 et 60 jours de cure, les échantillons du SR sont entièrement altérés en présence de 6 et 4% du Na_2SO_4, respectivement. Cette altération peut s'expliquer par l'augmentation de la teneur en SO_4^{2-} en faisant favoriser la formation d'une grande quantité d'ettringite qui est la cause de l'altération des propriétés du sol traité. En outre, Mehta (1983) a rapporté que l'adsorption du sulfate sur la surface des C-S-H a provoqué une diminution de la résistance causée par la réduction de la capacité de cimentation.

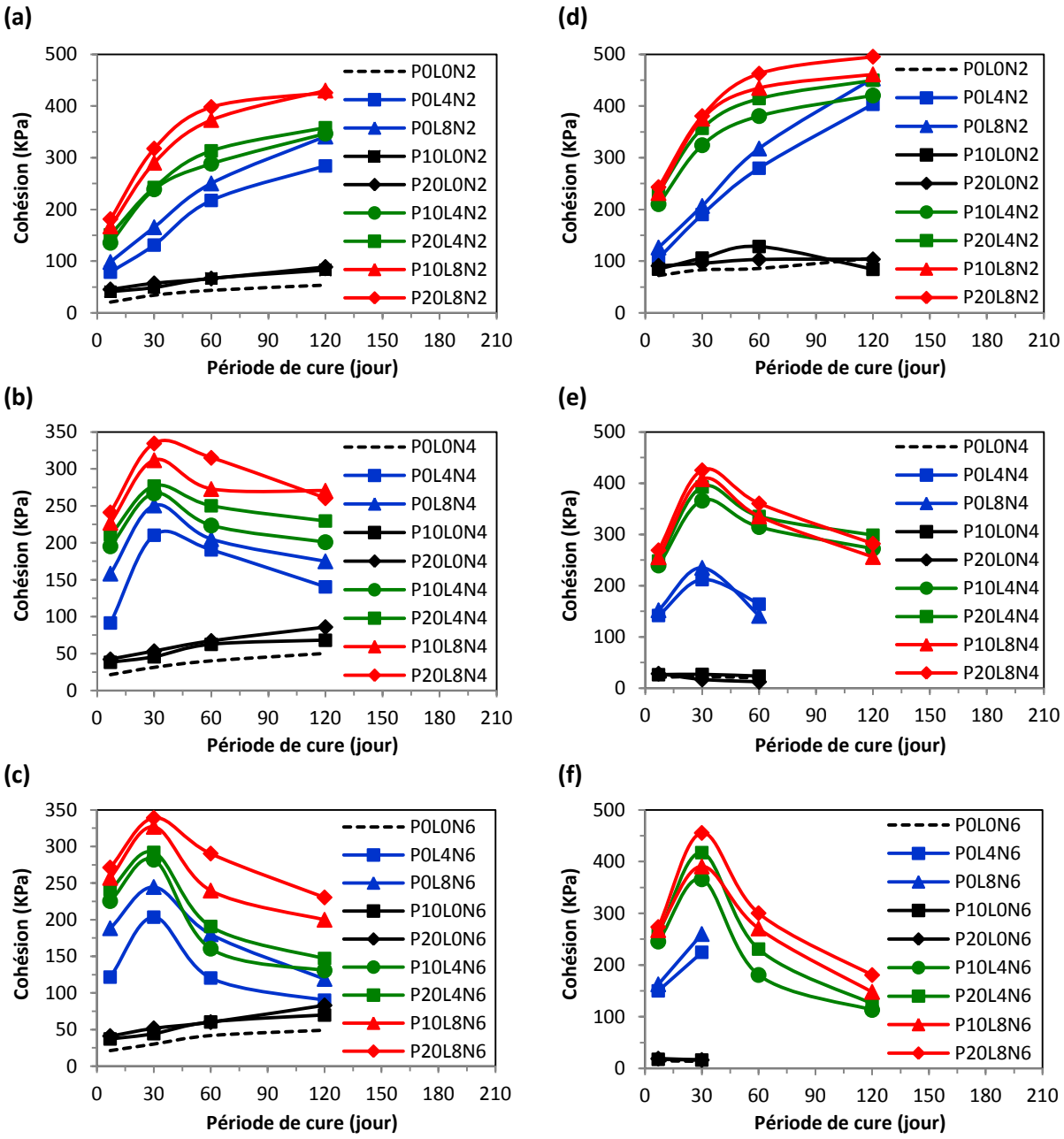


Fig. 6.12 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur la cohésion des sols argileux stabilisé par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.

6.3.4.2 Cas du traitement avec la PN

La figure 6.12 montre une augmentation négligeable de la cohésion avec la période de cure lorsque le Na_2SO_4 se présente avec une faible teneur (2%) dans les échantillons des deux sols argileux stabilisés avec l'addition seule de la pouzzolane naturelle. Cependant, à court terme la cohésion des deux sols argileux stabilisés augmente avec la période de cure et elle diminue avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4. Il est à signaler que pour le cas du SR, nous constatons que tous les échantillons des deux sols argileux traités sont complètement dégradés après des périodes de cure de 30 et 60 jours en présence de 6 et 4% du Na_2SO_4,

respectivement. La diminution de la cohésion des deux sols traités est reflétée par la diminution de la résistance au cisaillement qui est probablement attribuée à la présence du sulfate qui fait empêcher la cimentation des particules d'argiles et en favorisant la formation d'ettringite extrêmement expansive.

6.3.4.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN

D'ailleurs, l'addition de la chaux en combinaison avec la pouzzolane naturelle aux deux sols argileux traités en présence d'une faible teneur en Na_2SO_4 fait augmenter considérablement leur cohésion avec la cure et en particulier au-delà de 60 jours de cure. En effet, l'augmentation de la cohésion devient plus importante lorsqu'on combine 8% de chaux avec 20% de pouzzolane naturelle. Par exemple, la cohésion des SG et SR stabilisés avec la combinaison de 20%PN+8%L peut développer des valeurs de 425.7 et 495.4 KPa au bout de 120 jours de cure, respectivement (Fig. 6.12(a-f)). Ce comportement est attribué à l'amélioration des réactions de la chaux par l'augmentation de la teneur en silice en raison de l'augmentation du pH (Davidson et al., 1960). En revanche, la cohésion des deux sols argileux stabilisés en présence de 4 et 6% du Na_2SO_4 augmente rapidement jusqu'à 30 jours de cure, au-delà de cette période, la cohésion commence à décroitre progressivement avec des valeurs comparables à celles développées par les échantillons traités avec la pouzzolane naturelle seule.

Il est à noter que l'utilisation de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle pour un traitement des sols argileux riches en sulfates est fortement recommandée puisqu'elle résiste aux dommages structuraux causés par la formation de nouvelles phases expansives comme l'ettringite et/ou de la thaumasite. Par comparaison, quelque soit le types du traitement, les valeurs de la cohésion développées par le $CaSO_4.2H_2O$ sont bien plus élevées que celles développées par le Na_2SO_4.

6.3.5 Effet du $CaSO_4$ sur l'angle de frottement interne

Les résultats de l'effet engendré par le $CaSO_4.2H_2O$ sur la variation temporelle de l'angle de frottement interne des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sont illustrés dans la Figure 6.13.

6.3.5.1 Cas du traitement à la chaux

L'angle de frottement interne des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux augmente considérablement avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ et de la période de cure, en particulier, à très long terme. Par exemple, avec 2% du $CaSO_4.2H_2O$,

l'angle de frottement interne du SG stabilisé avec 8% de chaux est estimé à 35.6° au bout de 7 jours de cure mais, il augmente jusqu'à 42.6° après 120 jours de cure (Fig. 6.13(a-c)). En revanche, pour une même teneur en chaux additionnée, l'angle de frottement interne du SR est estimé à 48.2° au bout de 7 jours de cure et il devient 54.1° après 120 jours de cure (Fig. 6.13(d-f)).

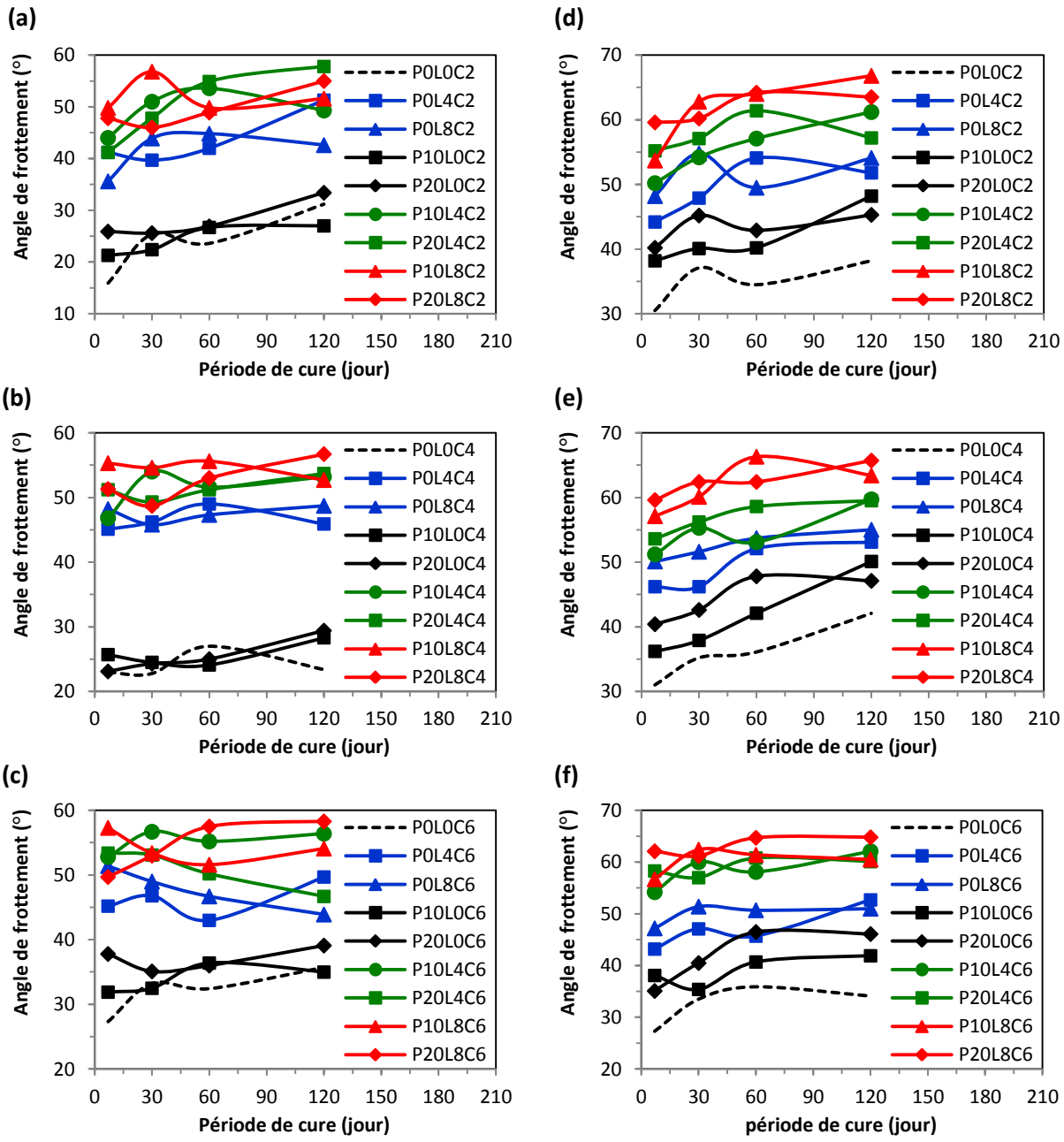


Fig. 6.13 — Effet de différentes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ sur l'angle de frottement interne des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.

6.3.5.2 Cas du traitement avec la PN

En général, l'angle de frottement interne des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle seule augmente progressivement avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ et de la période de cure. Par comparaison, l'angle de frottement interne des deux sols argileux stabilisés avec 20% de pouzzolane naturelle est bien plus grand que celui des sols non traités. Ce comportement est probablement lié au fait que la pouzzolane naturelle possède un angle de frottement interne bien plus élevé que celui du sol non traité.

6.3.5.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN

L'angle de frottement interne des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle augmente significativement avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ et de la période de cure, en particulier, à très long terme. Par exemple, avec 2% du $CaSO_4.2H_2O$, l'angle de frottement interne des SG et SR stabilisés avec la combinaison de 20%PN+8%L peut développer des valeurs de 55 et 63.5° au bout de 120 jours de cure, respectivement. De plus, l'angle de frottement interne des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle, en présence des teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ supérieures à 2% augmente avec la période de cure, en particulier, à très long terme. Par exemple, en présence de 6% du $CaSO_4.2H_2O$, l'angle de frottement interne des SG et SR stabilisés avec la combinaison de 20%PN+8%L peut développer des valeurs de 58.3 et 64.8° au bout de 120 jours de cure, respectivement.

Il est à observer que l'angle de frottement interne des échantillons des deux sols argileux stabilisés à la chaux seule ou combinée avec la pouzzolane naturelle en présence du $CaSO_4.2H_2O$ augmente avec l'augmentation de la cohésion (Fig. 6.13(a-f)). En général, les plus grandes valeurs de l'angle de frottement interne sont aussi couplées avec des grandes valeurs de cohésion. Ce comportement est probablement dû aux grandes charges normales utilisées lors de l'essai de cisaillement direct qui font augmenter la compressibilité de la structure du sol tout en activant les propriétés de frottement entre les composés cimentaires et les particules de sol qui conduisent à une forte augmentation de l'angle de frottement interne.

6.3.6 Effet du Na_2SO_4 sur l'angle de frottement interne

Les résultats de l'effet apporté par le NaS_2O_4 sur la variation temporelle de l'angle de frottement interne des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sont illustrés dans la Figure 6.14.

6.3.6.1 Cas du traitement à la chaux

En présence de 2% du Na_2SO_4, l'angle de frottement interne des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux seule augmente considérablement avec la période de cure. Cependant, au-delà de 2% du Na_2SO_4, l'angle de frottement interne du SG stabilisé avec l'addition de la chaux seule augmente considérablement avec la période de cure jusqu'à 30 jours mais, elle diminue significativement après cette période de cure.

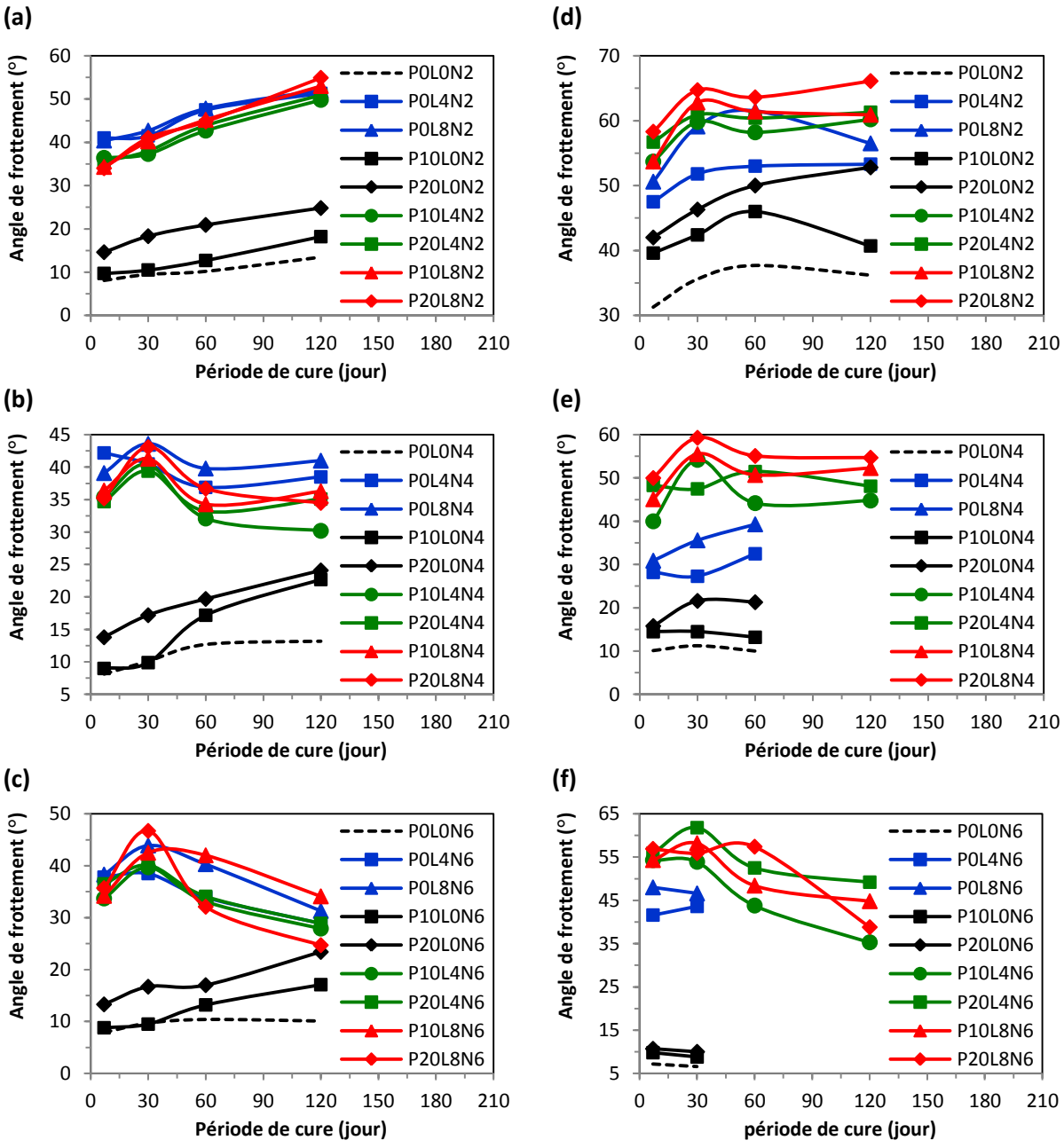


Fig. 6.14 — Effet de différentes teneurs en N_2aSO_4 sur l'angle de frottement interne des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.

En revanche, à court terme et lorsque la teneur en Na_2SO_4 est supérieure à 2%, les valeurs de l'angle de frottement interne des échantillons du SR stabilisé avec l'addition de la chaux seule

s'annulent après 30 et 60 jours de cure en présence de 6 et 4% en Na_2SO_4, respectivement. Il est à noter que l'utilisation de la chaux comme stabilisant dans un traitement des sols fins et très bénéfique quand la teneur en Na_2SO_4 est inférieure à 2%.

6.3.6.2 Cas du traitement avec la PN

L'angle de frottement interne des échantillons du SG traité avec l'addition de la pouzzolane naturelle augmente linéairement avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4, de la teneur en pouzzolane naturelle et de la période de cure. Le même comportement a été observé pour le SR quand la teneur en Na_2SO_4 additionnée est égale à 2%. En outre, les échantillons du SR traité avec l'addition de la chaux montrent le même comportement que celui des échantillons traités avec la pouzzolane naturelle en présence de 4 et 6% du Na_2SO_4.

6.3.6.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN

Lorsque la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées, l'angle de frottement interne du SR augmente initialement d'une manière précoce jusqu'à 30 jours à savoir que cette augmentation est importante lorsque la teneur en Na_2SO_4 augmente. Cependant, pour des teneurs de 4 et 6% du Na_2SO_4, l'angle de frottement interne des deux sols argileux traités avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle présente une variation perturbée avec la cure, mais elle décroit avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4 après 30 jours de cure. Il est à signaler que les valeurs de l'angle de frottement interne sont optimales après 30 jours de cure quand la teneur en Na_2SO_4 est supérieure à 2%.

6.4 Conclusion

Plusieurs essais ont été conduit au niveau du laboratoire afin d'étudier les différents effets apportés par la présence des sulfates ($CaSO_4.2H_2O$ et Na_2SO_4) sur la résistance au cisaillement (la cohésion; C et l'angle de frottement interne; φ) des deux sols argileux (SG et SR) traités avec l'addition de la chaux (L), de la pouzzolane naturelle (PN) et de leur combinaison (L-PN). A partir des résultats des essais effectués, les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- La stabilisation à la chaux seule en absence des sulfates fait augmenter considérablement la résistance au cisaillement des deux sols argileux stabilisés. Cette augmentation est fonction de la teneur en chaux ajoutée et de la période de cure. Cependant, l'utilisation de la PN toute seule a provoqué une influence négligeable sur la résistance au cisaillement des deux sols argileux traités.

- Les meilleurs résultats de la résistance au cisaillement sont obtenus lorsque la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées. La combinaison de ces deux derniers additifs fait augmenter la résistance au cisaillement des deux sols argileux étudiés mieux que l'utilisation de la chaux toute seule.
- Avec la pouzzolane naturelle en tant qu'additif, une augmentation significative de la résistance au cisaillement a été observée sur les échantillons des deux sols argileux traités en présence du $CaSO_4.2H_2O$ en comparaison avec les échantillons traités sans présence du $CaSO_4.2H_2O$ à savoir que le SR a des meilleurs résultats. Ceci est probablement attribué aux particules fines du $CaSO_4.2H_2O$ qui font augmenter la compacité des échantillons des deux sols argileux traités.
- Les échantillons des deux sols traités à la chaux en présence du $CaSO_4.2H_2O$ ne montrent qu'une légère augmentation de la résistance au cisaillement par rapport aux échantillons des deux argileux sols traités en absence du $CaSO_4.2H_2O$. Ceci peut être expliqué par l'effet du $CaSO_4.2H_2O$ qui présente l'aptitude de réduire la solubilité de la chaux hydratée dans les échantillons des deux sols argileux en tant que stabilisant.
- Pour les échantillons des deux sols argileux contenant du $CaSO_4.2H_2O$, il y a une meilleure augmentation de la résistance au cisaillement lorsque la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est utilisée.
- Les grandes valeurs de la résistance au cisaillement des échantillons des deux sols argileux stabilisés sont attribuées à la présence du $CaSO_4.2H_2O$ qui fait accélérer la réaction chimique entre le sol, la chaux et la pouzzolane naturelle.
- L'amélioration de la résistance au cisaillement des deux sols argileux stabilisés avec la période de cure est attribuée à la formation d'ettringite en raison de la présence du $CaSO_4.2H_2O$ notamment avec des fortes teneurs.
- En présence du Na_2SO_4, les fortes valeurs initiales de la cohésion développées par les deux sols argileux à court terme peuvent être attribuées à l'accélération des réactions pouzzolaniques causées par l'hydroxyde de sodium provenant de l'addition du Na_2SO_4.
- La dégradation totale des éprouvettes des deux sols argileux stabilisés pendant la cure et la diminution progressive de leurs cohésions peut s'expliquer par la formation d'ettringite favorisée par la présence du Na_2SO_4 dans les mélanges de Sol-Chaux-PN. Cette modification est particulièrement importante lorsque la teneur en Na_2SO_4 augmente. Le taux de l'altération des éprouvettes des deux sols stabilisées dépend de plusieurs facteurs à savoir: la composition minéralogique du sol, le type et la teneur de l'additif utilisé, la teneur et le type du sulfate présent et enfin la période de cure.

- La stabilisation des sols riches en Na_2SO_4 par la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est très efficace contre la dégradation des performances mécaniques causées par l'ettringite.
- La nature minéralogique du sol présente une importance capitale et joue un rôle très important dans la réussite ou à l'échec d'un traitement en dominant les effets eux-mêmes apportés par le Na_2SO_4 sur les sols stabilisés.
- La présence d'une faible teneur en Na_2SO_4 dans les des deux sols argileux stabilisés par la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle fait augmenter leur résistance au cisaillement tout en résistant à l'altération causée par la formation de l'ettringite dans le cas où le Na_2SO_4 se présente avec des teneurs supérieures à 2%.
- Il est important de classer le Na_2SO_4 comme un élément perturbateur du processus de la stabilisation du sol lorsque sa teneur est supérieure à 2% alors que le $CaSO_4.2H_2O$ peut être considéré comme un additif de stabilisation.

Conclusions Générales, Recommandations et Perspectives

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

1. Conclusions générales

Une étude expérimentale approfondie a été effectuée au niveau du Laboratoire de l'Habitat et de la Construction Centre afin d'évaluer quantitativement les effets apportés par la présence de différentes teneurs en sulfate monovalent (sulfate de sodium anhydre, Na_2SO_4) et bivalent (sulfate de calcium hydraté, $CaSO_4.2H_2O$) sur les limites d'Atterberg, la résistance à la compression non confinée et au cisaillement des deux sols argileux (sol gris, SG et sol rouge, SR) traités avec l'addition de la chaux (L), de la pouzzolane naturelle (PN) et de leur combinaison (L–PN) à différentes périodes de cure. De plus, des tests de diffraction des rayons X (DRX) et de microscopie électronique à balayage (MEB) ont été également effectués en vue de suivre l'évolution et les changements éventuels de la minéralogie et de la macro ou microstructure des deux sols argileux traités, respectivement. A la lumière des résultats des tests effectués, les conclusions suivantes peuvent être dégagées:

o En absence des sulfates

- Il est déconseillé d'utiliser la pouzzolane naturelle toute seule en tant qu'additif minéral du fait qu'elle apporte une faible réduction dans l'indice de plasticité et une augmentation négligeable dans la résistance en compression simple et au cisaillement des deux sols argileux traités.
- Cependant, une diminution importante de l'indice de plasticité avec une augmentation considérable dans les valeurs de la résistance en compression simple et au cisaillement ont été observées pour les deux sols argileux traités avec l'addition de la chaux toute seule. Ceci reflète clairement que la chaux est fortement recommandée pour le traitement chimique des sols instables.
- En outre, l'utilisation de la combinaison des deux ajouts (chaux/pouzzolane naturelle) fait améliorer considérablement toutes les propriétés géotechniques des deux sols argileux traités par rapport au traitement seul à la chaux.
- La combinaison de 8% de chaux avec 20% de pouzzolane naturelle améliore considérablement l'ouvrabilité du sol traité et par conséquent, la diminution de la sensibilité à l'eau. Cette même combinaison (8%L+20%PN) est hautement recommandée pour avoir des résistances en compression et au cisaillement extrêmement importantes et notamment à très long terme.

○ En présence des sulfates

- La W_L des sols argileux non traités diminue considérablement avec l'augmentation de la teneur en $CaSO_4.2H_2O$ et de la période de cure alors qu'il y a un effet marginal en présence seul du Na_2SO_4. D'autre part, le Na_2SO_4 fait augmenter d'une façon significative la W_L des sols argileux traités à la chaux ou avec la combinaison de chaux–PN alors qu'elle diminue en présence du $CaSO_4.2H_2O$.
- Le $CaSO_4.2H_2O$ fait diminuer la W_L des sols argileux traités avec l'addition de pouzzolane naturelle notamment avec la période de cure. En revanche, en présence du Na_2SO_4, la W_L des mêmes sols augmente fortement avec l'augmentation de la période de cure alors qu'elle diminue avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle.
- L'augmentation de la W_P des sols argileux traités à la chaux ou avec la chaux-NP est plus prononcée avec le Na_2SO_4 qu'avec le $CaSO_4.2H_2O$. En outre, les effets causés par ces deux types de sulfates sur la W_P sont négligeables lorsque la pouzzolane naturelle est utilisée toute seule en tant que stabilisant.
- Par comparaison, la présence du $CaSO_4.2H_2O$ dans les deux sols argileux traités avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison fait réduire considérablement leur indice de plasticité alors qu'il augmente avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4.
- Des augmentations significatives de la résistance en compression et au cisaillement ont été observées pour les échantillons des deux sols argileux traités avec la pouzzolane naturelle en présence du $CaSO_4.2H_2O$ par rapport à ceux qui ont été traités sans présence du $CaSO_4.2H_2O$. Ces augmentations sont probablement attribuées aux particules fines du $CaSO_4.2H_2O$ qui ont fait augmenter la compacité des échantillons des deux sols argileux stabilisés.
- Les échantillons des deux sols traités avec l'addition de la chaux en présence du $CaSO_4.2H_2O$ n'ont développé qu'une légère augmentation de la résistance en compression simple et au cisaillement par rapport à ceux qui ont été traités sans présence du $CaSO_4.2H_2O$. Ceci peut être attribué à l'aptitude du $CaSO_4.2H_2O$ de faire réduire la solubilité de la chaux hydratée dans les échantillons des deux sols argileux traités.
- Des augmentations considérables de la résistance en compression simple et au cisaillement ont été observées pour les échantillons des deux sols argileux traités avec la combinaison de chaux–pouzzolane en présence du $CaSO_4.2H_2O$.

- Les augmentations progressives dans la résistance en compression simple et au cisaillement des deux sols argileux étudiés, notamment le SR, peuvent être expliquées par la formation de l'ettringite minérale favorisée par la présence du $CaSO_4.2H_2O$ dans les mélanges de Sol–Chaux–PN. Ces augmentations sont attribuées d'une part à la présence du $CaSO_4.2H_2O$ qui fait accélérer les réactions chimiques entre le sol, la chaux et la pouzzolane naturelle, et d'autre par, à la formation d'ettringite non expansive (ettringite primaire) en raison de la présence du $CaSO_4.2H_2O$ notamment avec des fortes teneurs.

- Les augmentations précoces (rapides) de la résistance en compression simple et au cisaillement des deux sols argileux peuvent être attribuées à l'accélération des réactions pouzzolaniques causées par l'hydroxyde de sodium (NaOH) provenant de la dissolution du Na_2SO_4 en présence de l'eau.

- Les réductions progressives de la résistance en compression simple et au cisaillement du SG et ainsi les dégradations totales des éprouvettes du SR après 30 et 60 jours de cure peuvent être expliquées par la formation de l'ettringite minérale expansive (ettringite secondaire) favorisée par la présence de fortes teneur en Na_2SO_4 dans les mélanges de Sol–Chaux–PN.

- La nature minéralogique du sol présente une importance capitale et joue un rôle très important dans la réussite ou l'échec d'un traitement en dominant les effets eux-mêmes apportés par le Na_2SO_4 sur les sols stabilisés.

- Il est à signaler qu'il n'y aura aucun risque à envisager pour la stabilisation des sols avec l'utilisation de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison en présence de fortes teneurs en $CaSO_4.2H_2O$ alors qu'il est déconseillé d'utiliser ces ajouts tout seuls dans le cas de la présence du Na_2SO_4 avec de fortes teneurs. En revanche, la stabilisation des sols argileux riches en Na_2SO_4 par la combinaison de Chaux–PN est fortement recommandée du fait qu'elle présente une efficacité contre la dégradation des performances mécaniques causées par la formation de l'ettringite minérale expansive et notamment à très long terme.

- Il est important de classer le Na_2SO_4 comme un composé chimique fortement perturbateur du processus de la stabilisation des sols argileux lorsque sa teneur est supérieure à 2% alors qu'en revanche le $CaSO_4.2H_2O$ peut être considéré comme un additif de stabilisation.

- La composition minéralogique du sol a une importance capitale et joue un rôle très important dans le succès du processus de la stabilisation particulièrement en présence du $CaSO_4.2H_2O$.
- Les augmentations et les diminutions de l'indice de plasticité dépendent de plusieurs facteurs à savoir : la teneur et le type de l'additif utilisé, la teneur et le type du sulfate, la période de cure (la durée d'exposition aux sulfates) et la composition minéralogique des sols qui peut jouer un rôle très important dans les réactions chimiques avec les sulfates.
- Dans tous les cas des traitements effectués, il s'est avéré que les ions calcium (Ca^{2+} venant de l'addition de la chaux ou du $CaSO_4.2H_2O$) produisent des effets bénéfiques alors que les ions sodium (Na^+, venant de l'addition du Na_2SO_4) provoquent des effets indésirables sur les limites d'Atterberg de deux sols argileux stabilisés.

2. Recommandations

- L'utilisation de la pouzzolane naturelle en combinaison avec la chaux est fortement recommandée du fait qu'elle développe des résistances mécaniques élevées et proches à celles développés par l'utilisation du ciment seul ou en combinaison avec la chaux.
- Puisque la pouzzolane naturelle est disponible en Algérie avec des quantités considérables et facile à préparer. En terme du développement durable, elle peut être donc mélangée avec de la chaux pour améliorer les caractéristiques physico-mécaniques des mauvais sols et de minimiser les émissions de CO_2 à effet de serre dégagés par les usines de la fabrication des ciments et par conséquent la préservation de l'environnement.
- Du point de vue économique, le $CaSO_4.2H_2O$ est naturellement disponible avec des quantités importantes et moins cher. Il peut être donc utilisé seul en tant que stabilisateur et/ou accélérateur pour les réactions pouzzolaniques des sols à stabiliser. De plus, leur effet devient significatif lorsqu'il est mélangé seulement avec 10 ou 20% de pouzzolane naturelle.
- Le Na_2SO_4 avec des faibles teneurs (Na_2SO_4<2%) peut être utilisé, à court terme, comme un accélérateur de la dissolution de la pouzzolane naturelle et des réactions pouzzolaniques sans pouvoir altérer la résistance à très long terme.

- Il est recommandé d'utiliser la pouzzolane naturelle en combinaison avec la chaux puisqu'elle résiste à la dégradation des éprouvettes lorsque le Na_2SO_4 se présente avec des fortes teneurs.
- Avant de procéder à la technique de la stabilisation chimiques des sols, il est fortement recommandé d'effectuer des analyses chemico-minéralogiques en vue de se renseigner de la composition chimique (type et teneur en sulfates total) et minéralogique (type et teneur des minéraux argileux) des sols afin d'éviter les échecs de traitement liés généralement à la présence des sulfates et à la nature des sols traités.

3. Perspectives

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

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

Abdi, M.R. and Wild, S. (1993). *Sulphate expansion of lime-stabilised kaolinite: part I. Physical characteristics*. Clay Minerals, Vol. 28, pp. 555–567, doi: 10.1180/claymin.1993.028.4.06.

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

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.

Aldaood, A., Bouasker, M. and Al-Mukhtar, M. (2014b). *Impact of wetting–drying cycles on the microstructure and mechanical properties of lime-stabilized gypseous soils*, Engineering Geology, Vol. 174, pp. 11–21, doi: 10.1016/j.enggeo.2014.03.002.

Al-Mukhtar, M., Khattab, S. and Alcover, J.F. (2012). *Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil*. Engineering Geology, Vol. 139, pp. 17–27, doi:10.1016/j.enggeo.2012.04.004.

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.

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

Al-Rawas, A.A. and Goosen, M.F. (2006). *Expansive soils: recent advances in characterization and treatment*. Taylor & Francis, London, UK.

Al-Rawas, A.A., Hago, A.W. and Al-Sarmi, H. (2005). *Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman*. Building and Environment, Vol. 40, No. 5, pp. 681–687, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.08.028.

al-Swaidani, A., Hammoud, I. and Meziab, A. (2016). *Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, doi: 10.1016/j.jrmge.2016.04.002.

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

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

ASTM D2166 (2000). *Standard test methods for unconfined compressive strength of cohesive soil*. Annual book of ASTM Standards, American Society of Testing and Materials, USA, 04:08, doi: 10.1520/D2166_D2166M.

ASTM D4318 (2000). *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. Annual book of ASTM Standards, American Society of Testing and Materials, USA, 04:08, doi: 10.1520/D4318.

ASTM D6528 (2000). *Standard test method for consolidated undrained direct simple shear testing of cohesive soils*. Annual book of ASTM Standards, American Society of Testing and Materials, Philadelphia, USA, 04:08, doi: 10.1520/D6528-00.

ASTM D698 (2000). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort*. Annual book of ASTM Standards, American Society of Testing and Materials, USA, 04:08.

Atterberg, A. (1911). *The behaviour of clays with water, their limits of plasticity and their degrees of plasticity*. Internationale Mitteilungen fur Bodenkunde, vol. 1, p. 10–43.

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.

Aubert, J.E., Segui, P., Husson, B. and Measson, M. (2012). *A method developed to quantify lime and gypsum consumed by mineral additions*. Cement and Concrete Composites, Vol. 34, No. 7, pp. 874–880, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.04.005.

Bahar, R., Benazzoug, M. and Kenai, S. (2004). *Performance of compacted cement-stabilised soil*. Cement and concrete composites, Vol. 26, No. 7, pp. 811–820, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003.

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

Bagherpour, I. and Choobbasti, A.J. (2003). *Stabilization of fine-grained soils by adding micro silica and lime or micro silica and cement*. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 8, No. B, pp. 1–10.

Baryla, J. M., Chenais, V., Gavois, L. and Havard, H. (2000). *Effet de sulfates et sulfures sur des marnes traitées à la chaux et au liant routier sur un chantier autoroutier*. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, France. Bull, No. 224, pp. 39–48, https://trid.trb.org/view.aspx?id=960225.

Bell, F.G. (1988). *Stabilization and treatment of clay soils with lime. Part 2: some applications*. Ground Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 25–29, https://trid.trb.org/view.aspx?id=293790.

Bell, F.G. (1989). *Lime stabilisation of clay soils*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Vol. 39, No. 1, pp. 67–74, doi: 10.1007/BF02592537.

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.

Bell, F.G. (1993). *Engineering treatment of soils*. Chapman and Hall, London.

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

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

Broms, B., and Boman, P. (1979). *Lime columns-a new foundation method*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, (ASCE 14543), Vol. 105, pp. 539–556.

Broms, B.B. (1987). *Stabilization of soft clay in Southeast Asia*. In Proceedings of the 5th International Geotechnical Seminar on Case Histories in Soft Clay, pp. 163–198.

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. (1982). *Minéralogie des argiles: Structure et propriétés physico-chimiques*. Masson, Tomes 1 & 2, pp. 184–189.

Casagrande, A. (1947). *The pile foundation for the new John Hancock Building in Boston*. Graduate School of Engineering, Harvard University.

Celik, E. and Nalbantoglu, Z. (2013). *Effects of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-stabilized sulfate-bearing soils*. Engineering Geology, Vol. 163, pp. 20–25, doi: 10.1016/j.enggeo.2013.05.016.

Choquette, M., Bérubé, M.A. and Locat, J. (1987). *Mineralogical and microtextural changes associated with lime stabilization of marine clays from eastern Canada*. Applied Clay Science, Vol. 2, No. 3, pp. 215–232, doi: 10.1016/0169-1317(87)90032-9.

Çokça, E. and Tilgen, H.P. (2010). *Shear strength-suction relationship of compacted Ankara clay*. Applied Clay Science, Vol. 49, No. 4, pp. 400–404, doi: 10.1016/j.clay.2009.08.028.

Croft, J.B. (1964). *The pozzolanic reactivities of some New South Wales fly ashes and their application to soil stabilization*. Proc. ARRB, 2-Part 2, Australia, Vol. 120, pp. 1144–1167, https://trid.trb.org/view.aspx?id=1209241.

Cuisinier, O., Le Borgne, T., Deneele, D. and Masrouri, F. (2011). *Quantification of the effects of nitrates, phosphates and chlorides on soil stabilization with lime and cement*. Engineering Geology, Vol. 117, No. 3, pp. 229–235, doi: 10.1016/j.enggeo. 2010.11.002.

Das, B.M. (1983). *Principles of foundation engineering*. Thomson.

Davidson, D.T., Mateos, M. and Barnes, H.F. (1960). *Improvement of lime stabilization of montmorillonitic clay soils with chemical additives*. Highway Research Board Bulletin, Vol. 262, pp. 33–50, https://trid.trb.org/view.aspx?id=1285103.

De Cock, F. and Bottiau, M. (2004). *Compactage dynamique et vibrocompactage dans un hall industriel en cours de construction: un défi géotechnique*. ASEP-GI 2004 –Vol. 2. Magnan (ed.), Presses de l'ENPC/LCPC, Paris.

Degirmenci, N., Okucu, A. and Turabi, A. (2007). *Application of Phosphogypsum in Soil Stabilization*. Building and Environnement, Vol. 42, No. 9, pp. 3393–3398, doi:10.1016/j.buildenv.2006.08.010.

Dermatas, D. and Meng, X. (2003). *Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils*. Engineering Geology, Vol. 70, No. 3, pp. 377–394, doi: 10.1016/S0013-7952(03)00105-4.

Eades, J.L. and Grim, R.E. (1960). *Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization*. Highway Research Board Bulletin, National Research Council, Washington, DC, No. 262, pp. 51–63.

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

Eberemu A.O. (2013). *Evaluation of bagasse ash treated lateritic soil as a potential barrier material in waste containment application*, Acta Geotechnica, Vol. 8, No. 4, pp. 407-421, doi: 10.1007/s11440-012-0204-5.

El-Rawi, N.M. and Awad, A.A. (1981). *Permeability of lime stabilized soils*. Journal of Transportation Engineering Division, ASCE, Vol. 107, No. 1, pp. 25–35.

Eskisar, T. (2015). *Influence of cement treatment on unconfined compressive strength and compressibility of lean clay with medium plasticity*. Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 40, No. 3, pp. 763–772, doi: 10.1007/s13369-015-1579-z.

Floyd, M., Czerewko, M.A., Cripps, J.C. and Spears, D.A. (2003). *Pyrite oxidation in Lower Lias Clay at concrete highway structures affected by thaumasite, Gloucestershire, UK*. Cement and Concrete Composites, Vol. 25, No. 8, pp. 1015–1024, doi: 10.1016/S0958-9465(03)00125-2.

Fontaine, D., (1984). *Traitement des arènes granitiques aux liants hydrauliques*. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris VI, ENSMP, p. 207. https://trid.trb.org/view.aspx?id=1032712.

Gaafer, M., Bassioni, H., Mostafa, T. (2015). *Soil Improvement Techniques*. International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 6, No. 12, pp. 217–222, http://www.ijser.org.

Gabr, A.K. (2012). *The Uncertainties of Using Replacement Soil in Controlling Settlement*. The Journal American of Science, Vol. 8, No. 12, pp. 662–665, doi: 10.7537/marsjas081212.91.

Gay, G. and Schad, H. (2000). *Influence of cement and lime additives on the compaction properties and shear parameters of fine grained soils*. Otto-Graf Journal, Vol. 11, pp. 19–31.

George, S.Z., Ponniah, D.A. and Little, J.A. (1992). *Effect of temperature on lime-soil stabilization*. Construction and Building Materials, Vol. 6, No. 4, pp. 247–252, doi: 10.1016/0950-0618(92)90050-9.

Ghobadi, M.H., Babazadeh, R. and Abdilor, Y. (2014). *Utilization of lime for Stabilizing Marly Soils and Investigating the Effect of pH Variations on shear Strength Parameters*. Journal of Engineering Geology, Vol. 8, No. 1, pp. 1939–1962.

Ghrici, M., Kenai, S., and Said Mansour, M. (2007). *Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements*. Cement and Concrete Composites, Vol. 29, No. 7, pp. 524–549, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.04.009.

Glenn, G.R. and Handy, R.L. (1963). *Lime-clay mineral reaction products*. Highway Research Record, Vol. 29, pp. 70–82.

Goswami, R.K. and Singh, B. (2005). *Influence of Fly Ash and Lime on Plasticity characteristics of Residual Lateritic Soil*. Proceedings of the ICE-Ground Improvement, Vol. 9, No. 4, pp. 175–182, doi: 10.1680/grim.2005.9.4.175.

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

Grim, R.E., (1968). *Clay mineralogy*. McGraw-Hill, New York, p. 214.

Guney, Y., Sari, D., Cetin, M. and Tuncan, M. (2007). *Impact of Cyclic Wetting–Drying on Swelling Behavior of Lime-Stabilized Soil*. Building and Environnement, Vol. 42, No. 2, pp. 681–688, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.10.035.

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

Harichane, K., Ghrici, M. and Kenai, S. (2011a). *Effect of curing period on shear strength of cohesive soils stabilized with combination of lime and natural pozzolana*, International Journal of Civil Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 90–96.

Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S. and Grine, K. (2011c). *Use of natural pozzolana and lime for stabilization of cohesive soil*, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 29, No. 5, pp. 759–769, doi: 10.1007/s10706-011-9415-z.

Harichane, K., Ghrici, M., Khebizi, W. and Missoum, H. (2010). *Effect of the combination of lime and natural pozzolana on the durability of clayey soils*. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 17, pp. 1194–1210.

Harichane, K., Ghrici, M. and Missoum, H. (2011b). *Influence of natural pozzolana and lime additives on the temporal variation of soil compaction and shear strength*, Frontiers of Earth Science, Vol. 5, No. 2, pp. 162–169, doi: 10.1007/s11707-011-0166-1.

Harichane, K., Ghrici, M. and Kenai, S. (2012). *Effect of the combination of lime and natural pozzolana on the compaction and strength of soft clayey soils: a preliminary study*,

Environmental and earth sciences, Vol. 66, No. 8, pp. 2197–2205, doi: 10.1007/s12665-011-1441-x.

Harris, J. P., Sebesta, S. and Scullion, T. (2004). *Hydrated lime stabilization of sulfate-bearing vertisols in Texas*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1868, 31–39, doi: 10.3141/1868-04.

Hunter, D. (1988). *Lime-induced heave in Sulphate-bearing clay soils*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 2, pp. 150–167, doi: 10.1061/(ASCE) 0733-9410(1988)114:2(150).

Hu, Z., Jia, Z., Gao, L. and Yuan, Z. (2016). *The Effects of Sulfate on the Strength of Lime-fly Ash Stabilized Soil*. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 21, No. 10, pp. 3669–3676, http://www.ejge.com/2016/Ppr2016.0310ma.pdf.

Holtz, R.D. and Kovacs, W.D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, N.J. 07632, http://worldcat.org/isbn/0134843940 .

Ho, M.H. and Chan, C.M. (2011). *Some Mechanical Properties of Cement Stabilized Malaysian Soft Clay. International Journal of Civil*, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, Vol. 5, No. 2, pp. 76–83, scholar.waset. org/1999.3/10197.

Hossain, K.M.A., Lachemi, M. and Easa, S. (2006). *Characteristics of Volcanic Ash and Natural Lime Based Stabilized Clayey Soils*. Civil Engineering, Vol. 33, No. 11, pp. 1455–1458, doi: 10.1139/L06-099.

Hossain, K.M.A., Lachemi, M. and Easa, S. (2007). *Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua New Guinea*. Resources Conservation and Recycling, Vol. 51, No. 4, pp. 711–731, doi: 10.1016/j.resconrec. 2006.12.003.

Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, S., Songpiriyakij, S. (1999). *A study of strength activity index of ground coarse fly ash with Portland cement*. Science Asia, Vol. 25, p. 223–229.

Indraratna, B. (1996). *Utilization of lime, slag and fly ash for improvement of a colluvial soil in New South Wales, Australia*. Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 169–191, doi: 10.1007/BF00452946.

Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. (1972). *Soil stabilization principles and practice*. Vol. 11, No. Textbook, p. 374, https://trid.trb.org/view.aspx?id=137528.

Jha, A.K. And Sivapullaiah, P.V. (2015). *Mechanism of improvement in the strength and volume change behavior of lime stabilized soil*. Engineering Geology, Vol. 198, pp. 53–64, doi: 10.1016/j.enggeo.2015.08.020.

Ji-ru, Z. and Xing, C. (2002). *Stabilization of expansive soil by lime and fly ash*. Journal of Wuhan University of Technology–Materials Science Edition, Vol. 17, No. 4, pp. 73–77, doi: 10.1007/BF02838423.

Kamon, M. (1992). *Recent developments of soil improvement*. In: Proceedings of International Symposium on Soil Improvement and Pile Foundation, Nanjing, China, Vol. 1, pp. 1–16.

Kavak, A. and Akyarli, A. (2007). *A field application for lime stabilization*. Environmental Geology, Vol. 51, No. 6, pp. 987–997, doi: 10.1007/s00254-006-0368-0.

Kenai, S., Soboyejo, W. and Soboyejo, A. (2004). *Some engineering properties of limestone concrete*. Materials and manufacturing processes, Vol. 19, No. 5, pp. 949–961, doi: 10.1081/AMP-200030668.

Kenai, S., Bahar, R. and Benazzoug, M. (2006). *Experimental analysis of the effect of some compaction methods on mechanical properties and durability of cement stabilized soil*. Journal of materials science, Vol. 41, No. 21, pp. 6956–6964, doi: 10.1007/s10853-006-0226-1.

Kennedy, T., Smith, R., Holgreen, R. and Tahmoressi, M. (1987). *An Evaluation of Lime and Cement Stabilization*. Transportation Research board, Washington, D.C. TRR, No. 1119, pp. 11–25, http://worldcat.org/isbn/0309044723.

Khattab, S.A.A. (2002). *Etude multi-échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux*. Ph.D thesis, University of Orléans, France, p. 249.

Khemissa, M. and Mahamedi A. (2014). *Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay*. Applied Clay Science, Vol. 95, pp. 104–110, doi: 10.1016/j.clay.2014.03.017.

Kinuthia, J.M. (1997). *Property changes and mechanisms in lime-stabilised kaolinite in the presence of metal sulphates*. Ph.D Thesis, University of Glamorgan, Pontypridd, UK, http://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.265671.

Kinuthia, J.M., Wild, S. and Jones, G.I. (1999). *Effects of monovalent and divalent metal sulphates on consistency and compaction of lime-stabilized kaolinite*. Applied Clay Science, Vol. 14, No. 1, pp. 27–45, doi: PII S0169-1317_98.00046-5.

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

Kolias, S., Kasselouri-Rigopoulou, V. and Karahalios, A. (2005). *Stabilization of clayey soils with high calcium fly ash and cement*. Cement and Concrete Composites, Vol. 27, No. 2, pp. 301–313, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.019.

Kouloughli, S. (2007). *Etude expérimentale des mélanges sable bentonite : Leurs performances comme barrières de confinement dans les CET*. Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, Algérie.

Kujala, K. (1986). *Stabilization of harmful wastes and muds*. Proc. 1st Int. Symp. Environ. Technol, Vol. 1, pp. 540–548.

Kumar A., Walia B.S. and Bajaj A. (2007). *Influence of Fly Ash, Lime, and Polyester Fibers on Compaction and Strength Properties of Expansive Soil*. Journal of materials in civil engineering, Vol. 19, No. 3, pp. 242–248, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:3(242).

Laguros, J.G. (1962). *Effect of chemicals on soil-cement stabilization*. Retrospective Theses and Dissertations, Paper 2061, p. 167, http://lib.dr.iastate.edu/rtd/2061/ .

Lambe, T.W. (1953). *The structure of inorganic soil*. Proceedings, ASCE, Vol. 79. Tiré à part, No. 315, p. 49.

Le Borgne, T. (2010). *Effects of potential deleterious chemical compounds on soil stabilisation*. Doctoral dissertation, Ph.D thesis, Nancy-Université, France, http://hdl. hadle.net/10068/842439.

Le Pluart, L. (2002). *Nanocomposites Epoxyde/amine/montmorillonite : Rôle des interactions sur la formation, la morphologie aux différents niveaux d'échelle et les propriétés mécaniques des réseaux*. Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. France, http://theses.insa-lyon.fr/publication/2002ISAL 0061/these.pdf.

Lees, G., Abdelkader, M.O. and Hamdani, S.K. (1982). *Effect of clay fraction on some mechanical properties of lime-soil mixtures*. Highway Engineer, Vol. 29, No. 11, pp. 3–9, doi: 10.1016/0148-9062(84)91148-3.

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

Little, D.N., Nair, S. and Herbert, B. (2009). *Addressing sulfate-induced heave in lime treated soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 136, No. 1, pp. 110–118, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000185.

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.

Luckham, P.F. and Rossi, S. (1999). *Colloidal and rheological properties of bentonite suspensions*. Advances in Colloid and Interface Science, Vol. 82, No. 1, pp. 43–92, doi: 10.1016/S0001-8686(99)00005-6.

Manasseh, J. and Olufemi, A.I. (2008). *Effect of lime on some geotechnical properties of Igumale shale*. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 13, No. 6, pp. 1–12, doi: 10.1.1.534.4790.

Mathew, P.K. and Narasimha, R.S. (1997). *Effect of lime on cation exchange capacity of marine clay*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 2, pp. 183–185, doi: 103.10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:2(183).

McCarthy, M.J., Csetenyi, L.J., Sachdeva, A. and Dhir, R.K. (2012). *Fly ash influences on sulfate heave in lime-stabilised soils*. Proceedings of the ICE. Ground Improvement, Vol. 165, No. 3, pp. 147–158, doi: 10.1016/j.fuel.2011.07.009.

McCarthy, M.J., Csetenyi, L.J., Sachdeva, A. and Dhir, R.K. (2014). *Engineering and durability properties of fly ash treated lime-stabilised sulphate-bearing soils*. Engineering Geology, Vol. 174, pp. 139–148, doi: 10.1016/j.enggeo.2014.03.001.

Mehta, P.K. (1983). *Mechanism of sulphate attack on Portland cement concrete-another look.* Cement and Concrete Research, Vol. 13, No. 3, pp. 401–406, doi: 10.1016/0008-8846(83)90040-6.

Miller, G.A. and Azad, S. (2000). *Influence of Soil Type on Stabilization with Cement Kiln Dust*. Construction and Building Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 89–97, doi: 10.1016/ S0950-0618(00)00007-6.

Mitchell, J.K. and Dermatas, D. (1992). *Clay soil heave caused by lime-sulphate reactions*, ASTM Special Technical Publication 1135. ASTM, Philadelphia, PA, pp. 41–64, doi: 10.1520/STP15529S.

Mitchell, J.K. (1986). *Practical problems from surprising soil behaviour*. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 112, No. 3, pp. 274–279, http://cat.inist.fr/?aModele =afficheN&cpsidt=7868395.

Muntohar, A.S. and Hantoro, G. (2000). *Influence of rice husk ash and lime on engineering properties of a clayey subgrade*. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 5, pp. 1–9.

Nalbantoglu, Z. (2006). *Lime stabilization of expansive clay. Expansive soils-recent advances in characterization and treatment*. Taylor & Francis group, London, pp. 341–348.

Nalbantoglu, Z. and Tuncer, E.R. (2001). *Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 38, pp. 154–160, doi: 10.1139/cgj-38-1-154.

Narasimha Rao, S., and Rajasekaran, G. (1996). *Reaction products formed in lime-stabilized marine clays*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 5, pp. 329–336, doi: 10.1139/t00-076.

NF EN 196-2. (2013). *Méthodes d'essais des ciments - Partie 2: analyse chimique des ciments*.

NF EN 197-1. (2004). *Cement - Part 1: composition, specifications and conformity criteria for common cements*.

NF P 15-108. (2000). *Liants hydrauliques routiers – Composition, spécifications et critères de conformité.*

Okagbue, C.O. and Ochulor, 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.

Okagbue, C.O. and Yakubu, J.A., (2000). *Limestone ash waste as a substitute for lime in soil improvement for engineering construction*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 58, pp. 107–113, doi: 10.1007/s100640050004.

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

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.

Ola, S.A. (1978). *Geotechnical properties and behaviour of some stabilized Nigerian laterite soils*. Engineering Geology, Vol. 11, No. 2, pp. 145–160, doi: 10.1144/GSL.QJEG. 1978.011.02.04.

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.

Osula, D.O.A. (1996). *A Comparative Evaluation of Cement and Lime Modification of Laterite*. Engineering Geology, Vol. 42, No. 1, pp. 71–81, SSDI: 0013-7952 (95) 00067-4.

Ouhadi, V.R, Yong, R.N. (2008). *Ettringite formation and behaviour in clayey soils*. Applied Clay Science, Vol. 42, No. 1, pp. 258–265, doi: 10.1016/j.clay.2008.01.009.

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.

Prabakar, J., Dendorkarb, N. and Morchhale, R.K. (2004). *Influence of fly ash on strength behavior of typical soils*. Construction and Building Materials, Vol. 18, No. 4, pp. 263–267, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2003.11.003.

Puppala, A.J., Griffin, J.A., Hoyos, L.R. and Chmotid, S. (2004). *Studies on Sulfate-Resistant Cement Stabilization Methods to Address Sulfate-Induces Soil Heave*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp. 391–402, doi: 10.1061/(ASCE) 1090-0241(2004)130:4(391).

Puppala, A.J., Intharasombat, N. and Vempati, R.K. (2005). *Experimental studies on ettringite-induced heaving in soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 3, pp. 325–337, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241 (2005)131:3(325).

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

Radhakrishnan, G., Raju G.V.R. and Venkateswarlu, D. (2010). *Study of Consolidation Accelerated by Sand Drains*. Indian Geotechnical Conference. GEOtrendz December 16–18–2010, IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay. India. pp. 313–314. http://gndec.ac.in/~igs/ldh/conf/2010/articles/077.pdf.

Rahman, M.D.A. (1986). *The potentials of some stabilizers for the use of lateritic soil in construction*. Building and Environment, Vol. 21, No. 1, pp. 57–61, doi: 10.1016/0360-1323(86)90008-9.

Rajasekaran, G. (1994). *Physico-chemical behaviour of lime treated marine clay*. Ph.D Thesis, Indian Institute of Technology, Madras, India.

Raja, A. (1990). *Influence of sulphates on consolidation and swelling behaviour of lime treated calcium bentonite*. M. Tech Thesis, Indian Institute of Technology, Madras, India.

Rajasekaran, G. and Narasimha Rao, S. (1997). *The microstructure of lime-stabilization marine clay*. Ocean Engineering, Vol. 24, No. 9, pp. 867–878, doi: 10.1016/S0029-8018(96)00041-8.

Rajasekaran, G. and Narasimha Rao, S. (1996). *Lime migration studies in marine clays*. Ocean engineering, Vol. 23, No. 4, pp. 325–355, doi: 10.1016/0029-8018(95)00030-5.

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

Rao, S.M. and Shivananda, P. (2005). *Compressibility behaviour of lime-stabilized clay*. Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 309–319, doi: 10.1007/s 10706-004-1608-2.

Rao, S. M. and Venkataswamy, B. (2002). *Lime pile treatment of black cotton soils*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, Vol. 6, No. 2, pp. 85–93, doi: 10.1680/grim.2002.6.2.85.

Reid, J.M., Czerewko, M.A., Cripps, J.C. and Hillier, D.M. (2001). *Sulphate specification for structural backfills*. Report 447, TRL Limited, Crowthorne, http://cat.inist.fr/?aModele =afficheN&cpsidt=18517077.

Rekik, B. and Boutouil, M. (2006). *Étude de la compressibilité et de la micro structure d'un sédiment de dragage traité au liant hydraulique*. IX èmes Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, pp. 635–642, doi: 10.5150.jngcgc.2006.061-R.

Rollings, R.S., Burkes, J.P. and Rollings, M.P. (1999). *Sulphate attack on cement stabilized sand*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE Vol. 125, No. 5, pp. 364–372, doi: 10.1061/(ASCE)1090-02441(1999)125:5(364).

Roy, D.M. (1986). *Mechanism of cement paste degradation due to chemical and physical process*. Proceedings of 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Brazil, Vol. I, pp. 359–380.

Sakr, M.A., Shahin, M.A. and Metwally, Y.M. (2009). *Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content*. Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 27, N. 1, pp. 105–113. doi: 10.1007/s10706-008-9215-2.

Segui, P. (2011). *Elaboration de liants hydrauliques routiers à base de pouzzolane naturelle ou de cendre volante de papeterie*. Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, France, p. 207.

Segui, P., Aubert, J.E., Husson, B. and Measson, M. (2013). *Utilization of a natural pozzolan as the main component of hydraulic road binder*. Construction and Building Materials, Vol. 40, pp. 217–223, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.085.

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

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

Sherwood, P.T. (1962). *Effect of sulphates on cement- and lime-stabilised soils*. Building and Highway Research Board, No. 353, pp. 98–107, https://trid.trb.org/view.aspx?id=128024.

Shi, C. and Day, R.L. (2000a). *Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators Part I. Reaction kinetics*. Cement and Concrete Research, Vol. 30, No. 1, pp. 51–58, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00214-3.

Shi, C. and Day, R.L. (2000b). *Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators Part II. Reaction products and mechanisms*. Cement and Concrete Research, Vol. 30, No. 4, pp. 607–613, doi: PII S0008-8846(99)00205-7.

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. and Jha, A.K. (2014). *Gypsum induced strength behaviour of fly ash-lime stabilized expansive soil*. Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 32, No. 5, pp. 1261–1273, doi: 10.1007/s10706-014-9799-7.

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.

Sivapullaiah, P.V., Sridharan, A. and Ramesh, H.N. (2006). *Effect of sulphate on the shear strength of lime treated kaolinitic soil*. Ground Improvement, Vol. 10, No. 1, pp. 23–30, doi: 10.1680/grim.2006.10.1.23.

Sivrikaya, O., Yavascan, S. and Cecen, E. (2014). *Effects of ground granulated blast furnace slag on the index and compaction parameters of clayey soils*. Acta Geotechnica Slovenica, Vol. 11, pp. 19–27, http://www.fg.uni-mb.si/journal-ags/pdfs/AGS_2014-1_article_2.pdf.

Smith, C.J., Peoples, M.B., Keerthisinghe, G., James, T.R., Garden, D.L. and Tuomi, S.S. (1994). *Effect of surface applications of lime, gypsum and phosphogypsum on the alleviating of surface and subsurface acidity in a soil under pasture*. Australian Journal of Soil Research, Vol. 32, No. 5, pp. 995–1008, doi: 10.1071/SR9940995.

Sridhran, A., Sivapullaiah, P.V. and Ramesh, H.N. (1995). *Consolidation behaviour of lime treated sulphate soils*. Proc. Int. Symp. Compression Consolidation Clayey Soils, Hiroshima, Japan, Vol. 1, pp. 183–188.

Stavridakis, E.I. (2005). *Evaluation of engineering and cement-stabilization parameters of clayey-sand mixtures under soaked conditions*. Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 635–655, doi: 10.1007/s10706-004-0800-8.

Stipho, A.S. (1989). *Some engineering properties of stabilized salina soil*. Journal of Engineering Geology, Vol. 26, No. 2, pp. 181–197, doi: 10.1016/0013-7952(89)90006-9.

Taube, M.G. (2008). *Prefabricated Vertical Drains-The Squeeze Is On*. Geo-Strata-Geo Institute of ASCE, Vol. 9, No. 2, pp. 12–14.

Terashi, M., Tanaka, H., Niidome, Y. and Sakanoi, H. (1980). *Permeability of treated soils*. Proceedings, 15th Japan Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hiroshima, Japan, pp. 773–776.

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

Tonoz, M.C., Ulusay, R. and Gokceoglu, C. (2004). *Effects of lime stabilization on engineering properties of expansive Ankara clay*. Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe, Vol. 100, pp. 466–474, doi: 10.1007/978-3-540-39918-6_53.

Townsend, D.C. and Kylm, T.W. (1966). *Durability of lime-stabilized soils*. Highway Research Board Bulletin, Vol. 139, pp. 25–41.

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

Wang, Z. (2002). *Seismic anisotropy in sedimentary rocks, part 1: A single-plug laboratory method*. Geophysics, Vol. 67, No. 5, pp. 1415–1422.

Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G.I. and Higgins, D.D. (1998). *Effect of partial subsitution of lime with ground granular furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime-stabilised sulphate-bearing clay soils*. Engineering Geology, Vol. 51, No. 1, pp. 37–53, doi: PII S0013-7952(98)00039-8.

Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G.I. and Higgins, D.D. (1999). *Suppression of swelling associated with ettringite formation in lime stabilized sulphate-bearing clay soils by partial substitution of lime with Ground Granulated Blastfurnace Slag*. Engineering Geology, Vol. 51, No. 4, pp. 257–277, doi: 10.1016/S0013-7952(98)00069-6.

Yadu, L. and Tripathi, R.K. (2013). *Effect of granulated blast furnace slag in the engineering behaviour of stabilized soft soil*. Procedia Engineering, Vol. 51, pp. 125–131, doi: 10.1016/j.proeng.2013.01.019.

Yilmaz, I. and Civelekoglu, B. (2009). *Gypsum: an additive for stabilization of swelling clay soils*. Applied Clay Science, Vol. 44, pp. 166–172, doi: 10.1016/j.clay.2009.01.020.

Yi, Y., Gu, L. and Liu, S. (2015). *Microstructural and mechanical properties of marine soft clay stabilized by lime-activated ground granulated blastfurnace slag*. Applied Clay Science, Vol. 103, pp. 71–76, doi.org/10.1016/j.clay.2014.11.005.

Yong, R.N. and Ouhadi, V.R. (2007). *Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils*. Applied Clay Science, Vol. 35, No. 3, pp. 238–249, doi: 10.1016/j.clay.2006.08.009.

http://www.keller-france.com/techniques/applications/amelioration-et-renforcement-de-sol (accédé le: 17 Juin 2016).