

Université  
de Liège



Université de Liège  
Faculté des Sciences Appliquées

## Étude de l'amélioration des sols par traitement à la chaux

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master en Ingénieur  
Civil des Constructions par TRAN Van Duy

Frédéric COLLIN	Promoteur, Chargé de cours ULg
Luc COURARD	Membre du jury, Professeur ULg
Frédéric NGUYEN	Membre du jury, Chargé de cours ULg
Bertrand FRANÇOIS	Membre du jury, Chargé de cours ULB

Année académique 2012-2013

# Étude de l'amélioration des sols par traitement à la chaux

De nos jours, lors de la réalisation des ouvrages d'infrastructures, la réutilisation des matériaux du site de construction est doit être soigneusement considérée avec pour objectif de réduire des impacts négatifs sur la nature et le fonds d'investissement du projet. Cependant, dans la plupart de cas pratiques, la réutilisation des matériaux locaux rencontre des difficultés à cause de leurs propriétés médiocres qui ne pourraient pas répondre aux exigences de l'ouvrage, notamment les sols fins humides.

Afin de résoudre ce problème, on utilise bien souvent des méthodes du traitement des sols pour améliorer les propriétés géotechniques insuffisantes des sols rencontrés sur le site avant de les réutiliser pour une certaine fonction dans l'ouvrage. Le traitement des sols à la chaux est actuellement un des méthodes les plus courantes pour transformer les sols naturels locaux en nouveaux matériaux avec les performances désirées.

Dans le cadre de ce TFE, le sol argileux provient de la villes de Soignies, Belgique qui est le candidat pour le traitement à la chaux. L'objectif serait d'étudier le comportement, à court terme, du sol après le traitement, d'évaluer l'efficacité de la méthode pour le sol étudié et estimer la quantité de la chaux pour le travail de l'amélioration du sol pratique. Pour ce faire, plusieurs aspects pourront être abordés mais l'étude expérimentale en laboratoire sera privilégiée :

- Étude bibliographique sur les études rapportées dans la littérature ;
- Réalisation des essais physico-chimiques et mécaniques sur le sol naturel et les sols traités au cours du temps après le mélange.

**Frédéric COLLIN**  
*(Promoteur)*

**Luc COURARD**  
*(Membre du jury)*

**Frédéric NGUYEN**  
*(Membre du jury)*

**Bertrand FRANÇOIS**  
*(Membre du jury)*

# Table des matières

<b>Table des figures</b>	<b>iv</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>vii</b>
<b>Remerciements</b>	<b>1</b>
<b>Résumé</b>	<b>2</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>3</b>
1.1 Contexte générale . . . . .	3
1.2 Brève histoire . . . . .	4
1.3 Cadre de recherche . . . . .	5
<b>2 Traitement de sols en terrassement</b>	<b>7</b>
2.1 Stabilisation des sols . . . . .	7
2.2 Compactage du sol . . . . .	10
2.3 Traitement des sols à la chaux . . . . .	11
2.3.1 Amélioration à la chaux . . . . .	11
2.3.2 Stabilisation à la chaux . . . . .	12
2.4 Traitement des sols au ciment Portland . . . . .	13
2.5 Évaluation comparative entre modification à la chaux et au ciment . . . . .	15
<b>3 Technique du traitement à la chaux</b>	<b>17</b>
3.1 Minéralogie et chimie des sols . . . . .	17
3.1.1 Minéraux argileux . . . . .	18
3.1.2 Système d'argile-eau . . . . .	21
3.2 Interaction chaux - argile dans le milieu alcalin . . . . .	22
3.2.1 Échange cationique . . . . .	23
3.2.2 Flocculation et agglomération . . . . .	24
3.2.3 Réaction pouzzolanique . . . . .	24
3.2.4 Carbonatation . . . . .	25
3.3 Paramètres de technique . . . . .	26
3.3.1 Influence de la température . . . . .	26
3.3.2 Influence de la composition minéralogique de sols . . . . .	27
3.3.3 Influence de la chaux mise en œuvre . . . . .	29
3.3.4 Influence de l'humidité . . . . .	31
3.3.5 Influence de l'énergie et retard de compactage . . . . .	32
3.3.6 Influence de la taille des grains . . . . .	33
3.4 Perturbations . . . . .	34
3.4.1 Influence de la matière organique . . . . .	34
3.4.2 Influence des sulfates sur le traitement . . . . .	35

<b>4</b>	<b>Étude expérimentale</b>	<b>37</b>
4.1	Matériaux utilisés . . . . .	37
4.1.1	Sol . . . . .	37
4.1.2	Chaux . . . . .	37
4.2	Programme des essais au laboratoire . . . . .	37
4.2.1	Analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie . . . . .	38
4.2.2	Estimation de la consommation initiale de la chaux . . . . .	39
4.2.3	Essai de diffraction des rayons X . . . . .	41
4.2.4	Essai Proctor et CBR . . . . .	45
4.2.5	Essai de compression simple . . . . .	47
4.2.6	Essai triaxial . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Résultats et discussion</b>	<b>49</b>
5.1	Identification du sol étudié de la ville de Soignies . . . . .	49
5.1.1	Classification du sol étudié . . . . .	49
5.1.2	Détermination de la composition minéralogique . . . . .	50
5.2	Estimation de la consommation initiale de la chaux . . . . .	53
5.2.1	Méthode d'Eades & Grim . . . . .	53
5.2.2	Essai de limites d'Atterberg . . . . .	53
5.2.3	Détermination de la quantité de chaux libre . . . . .	54
5.3	Essais de compactage Proctor et CBR immédiat . . . . .	55
5.3.1	Compactage Proctor . . . . .	55
5.3.2	Valeurs IPI . . . . .	56
5.4	Changement dans la structure du sol traité à la chaux . . . . .	57
5.4.1	Phénomène de floculation & agglomération . . . . .	57
5.4.2	Changement dans la composition minéralogique . . . . .	57
5.5	Développement de la résistance du sol traité à la chaux . . . . .	59
5.5.1	Essai de compression simple . . . . .	59
5.5.2	Essai triaxial . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>65</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>67</b>
	<b>Annexe</b>	<b>71</b>

# Table des figures

1.1	Profil en long du projet routier . . . . .	3
2.1	Méthodes de stabilisation en fonction de leur convenance pour les sols de différente granulométrie et plasticité,[McNally, 1998] . . . . .	10
2.2	Exemple de courbes de compactage suivant la nature du sol [Marcoen et al., 2000] . . . . .	11
2.3	Schématisation de l'action de chaux à court terme, [Cabane, 2004] . . . . .	12
2.4	Essai de compression simple du sol traité à la chaux au cours du temps, [Kavak and Baykal, 2012] . . . . .	13
2.5	Représentation schématique du limon traité au-delà 90 jours de cure, [Cabane, 2004] . . . . .	14
2.6	Hydratation du ciment dans l'argile humide, [Prusinski and Bhattacharja, 1999] . . . . .	14
2.7	Modification dans la courbe granulométrique à l'instant de 2h après le mélange, [Osula, 1996] . . . . .	15
2.8	Effets du modificateur sur des limites d'Atterbergs et des optimums Proctor, [Osula, 1996] . . . . .	16
2.9	Effets des agents stabilisateurs et du temps de cure sur la résistance du sol traité,[Prusinski and Bhattacharja, 1999] . . . . .	16
3.1	Unités structurales de base de minéraux argileux et feuilles de silice et d'alumine [Mitchell et al., 1976] . . . . .	18
3.2	Formes d'arrangements possibles des tétraèdre de silice, [Little, 1995] . . . . .	19
3.3	Unités structurales des minéraux argileux communs d'après [Mitchell et al., 1976] . . . . .	20
3.4	Liaisons typiques dans les groupes de minéraux argileux, [Little, 1995] . . . . .	21
3.5	Diffusion des cations et molécules d'eau par la surface argileuse, [Mitchell et al., 1976] . . . . .	22
3.6	Schématisation de l'échange cationique dans l'argile, [Prusinski and Bhattacharja, 1999] . . . . .	23
3.7	Floculation et agglomération du sol traité à la chaux, [Prusinski and Bhattacharja, 1999] . . . . .	24
3.8	Réaction pouzzolanique, [Prusinski and Bhattacharja, 1999] . . . . .	25
3.9	Carbonatation observée sur des éprouvettes aux différents pourcentages de la chaux . . . . .	26
3.10	Influence de la température sur le développement de la résistance à la compression simple à 7 jours de cure, [Bell, 1996] . . . . .	27
3.11	Limites de plasticité et de liquidité de kaolinite, montmorillonite et quartz fin,[Bell, 1996] . . . . .	28
3.12	Variation de la résistance en compression simple des trois minéraux,[Bell, 1996] . . . . .	29
3.13	Solubilité des minéraux du sol en fonction de pH, [Boardman et al., 2001] . . . . .	30
3.14	Essai de compression simple ; a)expansive soil ; b)residual soil ; [Dash and Hus-sain, 2011] . . . . .	30

3.15	Modèle conceptuel physique proposé pour traitement des sols à la chaux, [Locat et al., 1990] . . . . .	31
3.16	Modèle conceptuel mécanique du développement de la résistance au cisaillement avec le temps, [Locat et al., 1990] . . . . .	32
3.17	Développement de la résistance du sol traité à la chaux aux différentes teneurs en eau, [Tang et al., 2011] . . . . .	32
3.18	Variation de la densité maximale sèche du sol traité à la chaux avec le retard de compactage, [Osinubi, 1998a] . . . . .	33
3.19	Module de cisaillement maximale ( $G_{max}$ ) contre la taille maximale ( $D_{max}$ ), [Tang et al., 2011] . . . . .	34
3.20	Influence de diverses matières organiques sur deux sols traités au ciment, [Tremblay et al., 2002] . . . . .	35
3.21	Évolutions de la résistance à la compression simple des sols à hauts sulfates, [Gaily, 2012] . . . . .	36
4.1	Agitation manuelle de la burette . . . . .	39
4.2	Mesure de la densité du sédiment par l'aréomètre dans un bain thermostatisé . . . . .	39
4.3	Dispositifs d'essai des limites d'Atterberg . . . . .	40
4.4	Mesure de pH du sol par pH meter . . . . .	40
4.5	Schéma de la diffraction des rayons X par une famille de plan réticulaire . . . . .	42
4.6	L'intensité du signal observé dépend du type d'atomes qui constituent ces plans . . . . .	42
4.7	Conservation des échantillons dans les seaux inversés . . . . .	46
4.8	Compacteur automatique CBR . . . . .	46
4.9	Système de CBR . . . . .	46
4.10	Moule de compression statique préparant les éprouvettes UCS ; a) Dimensions du moule b) Éprouvettes, [Muntohar, 2005] . . . . .	47
4.11	Conservation des éprouvettes . . . . .	48
4.12	Système de compression simple . . . . .	48
4.13	Courbe intrinsèque de l'essai triaxial . . . . .	48
4.14	Schéma d'appareil triaxial . . . . .	48
4.15	Cellule triaxiale au laboratoire . . . . .	48
5.1	Courbe granulométrique du sol naturel . . . . .	49
5.2	Classification des sols dont $D_{max} < 50mm$ selon la norme NF P11-300 . . . . .	50
5.3	Diffractogramme de la poudre totale du sol naturel . . . . .	51
5.4	Analyse DRX de la partie argileuse du sol naturel . . . . .	52
5.5	Évolution du pH en fonction de la quantité de chaux ajoutée . . . . .	53
5.6	Évolution des limites d'Atterberg du traitement . . . . .	54
5.7	Essai Proctor des sols traités à la chaux . . . . .	55
5.8	Évolution des valeurs CBR en fonction de la teneur en eau . . . . .	56
5.9	Évolution de l'IPI en fonction de la quantité de chaux ajoutée . . . . .	56
5.10	Floculation et agglomération des sols à un jour après le traitement . . . . .	57
5.11	Diffractogramme sur la poudre totale du sol traité à 4% de la chaux après 7 jours de cure . . . . .	58
5.12	Diffractogramme sur la poudre totale du sol traité à 4% la chaux après 28 jours de cure . . . . .	59
5.13	Fissures apparaissant sur des éprouvettes . . . . .	60
5.14	Évolution de la résistance en fonction du temps de cure . . . . .	60
5.15	Évolution du module d'élasticité en fonction du temps de cure . . . . .	61
5.16	Évolution de la résistance en fonction de la chaux ajoutée . . . . .	61
5.17	Évolution du module d'élasticité en fonction de la chaux ajoutée . . . . .	62

5.18	Corrélation entre la résistance en compression simple et la chaux libre au cours du temps . . . . .	62
5.19	pH du mélange sol - chaux avec le temps de cure pour différentes quantités de la chaux . . . . .	63
5.20	Évolution des paramètres de cisaillement des sols traités à 21 jours . . . . .	64
6.1	Détermination des limites de liquidité des sols traités à la chaux . . . . .	71
6.2	Courbes de l'essai CBR immédiat du sol naturel . . . . .	75
6.3	Courbes de l'essai CBR immédiat du sol traité à 2% de chaux . . . . .	75
6.4	Courbes de l'essai CBR immédiat du sol traité à 4% de chaux . . . . .	76
6.5	Courbes de l'essai CBR immédiat du sol traité à 8% de chaux . . . . .	76
6.6	Essais de compression simple des sols . . . . .	77

# Liste des tableaux

2.1	Mécanismes et applicabilités de divers agents stabilisants, [McNally, 1998] . . .	8
2.2	Effets de la minéralogie du sol sur sa réponse à la stabilisation, [McNally, 1998]	9
4.1	Caractéristiques physiques de l'argile de Soignies . . . . .	37
4.2	Fiche technique de la chaux vive . . . . .	38
5.1	Synthèse de l'analyse granulométrique . . . . .	49
5.2	Classification des sols - NF P11-300 . . . . .	50
5.3	Caractérisation des principaux minéraux et facteurs correctifs associés, [Boski et al., 1998] . . . . .	51
5.4	Estimation semi-quantitative des minéraux dans le sol étudié . . . . .	52
5.5	Détermination de la quantité CaO libre par titrage HCL 0,1N . . . . .	55
5.6	Optimum Proctor du sol après traitement à la chaux . . . . .	55
5.7	Composition minéralogique du sol traité à 4% de chaux après 7 jours de cure	58
5.8	Composition minéralogique du sol traité à 4% de chaux après 28 jours de cure	59
5.9	Essai de compression simple du traitement à la chaux de Bruxelles . . . . .	63
5.10	Essais triaxiaux des sols traités à 21 jours après le traitement . . . . .	64
6.1	Résultats des mesures du pH du sol selon la méthode d'Eades et Grim . . . . .	71
6.2	Essai Proctor du sol naturel . . . . .	72
6.3	Essai Proctor du sol traité à 2% de chaux . . . . .	72
6.4	Essai Proctor du sol traité à 4% de chaux . . . . .	72
6.5	Essai Proctor du sol traité à 8% de chaux . . . . .	73
6.6	Essai CBR immédiat du sol naturel . . . . .	73
6.7	CBR immédiat du sol traité à 2% de la chaux . . . . .	73
6.8	CBR immédiat du sol traité à 4% de chaux . . . . .	74
6.9	CBR immédiat du sol traité à 8% de la chaux . . . . .	74
6.10	Essai de titrage à l'HCl 0,1N . . . . .	74

# Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont permis, par leurs conseils, pistes suggérées et commentaires, la réalisation de ce Travail de Fin d'Études.

Je souhaiterais tout d'abord remercier mon promoteur Monsieur Frédéric COLLIN pour le suivi continu, sa disponibilité, ses nombreux conseils et sa gentillesse dont j'ai pu bénéficier tout au long de mon travail.

J'adresse mes remerciements aux membres du jury, Messieurs Luc COURARD et Frédéric NGUYEN - Université de Liège, Monsieur Bertrand FRANÇOIS - Université de Libre Bruxelles, pour le temps et l'intérêt qu'ils porteront à la lecture et à l'évaluation de ce travail.

Je voudrais remercier tous les membres du laboratoire géomécanique : René VANDEZANDE, Cédric ANCION, Pierre ILLING qui m'ont soutenu et conseillé tout au long de la réalisation de mes essais. Mes remerciements sont adressés à Monsieur Frédéric MICHEL qui m'a permis de réaliser des essais au Laboratoire des Matériaux de Construction (LMC). Je remercie sincèrement Madame Fabienne LIBIOULLE pour sa responsabilité sur mes essais au LMC.

Mes remerciements vont également à Madame Nathaline FAGEL qui a interprété les résultats de l'essai de diffraction des rayons X - DRX, ainsi que Joël OTTEN pour ses analyses DRX au département de Géologie. Un grand merci est adressé ensuite à Simon DELVOIE qui a activement participé aux essais DRX.

De nombreux professeurs de l'Université de Liège m'ont permis de mener à bien ce travail que ce soit par leur enseignement au cours de ces deux années d'études en Belgique. Je les en remercie.

Je suis également très reconnaissant envers Monsieur Michel Hogge pour la bourse d'études à l'Université de Liège pendant deux ans.

Je tiens à remercier mes amis du Master en Ingénieur des Constructions pour leurs aides dans mes études ainsi que dans la vie et l'amitié pendant deux ans en Belgique.

Enfin, permettez - moi d'exprimer toute ma gratitude envers ma famille et ma copine au Vietnam pour l'amour et le soutien tout au long de mes études.

# Résumé

Le traitement à la chaux est une technique bien connue pour améliorer les propriétés mécaniques des sols argileux dans le génie civil (construction de routes, construction ferroviaire et aéroport) en ajoutant une petite quantité de chaux dans le sol. De nombreuses études montrent que le traitement à la chaux peut modifier significativement les propriétés physiques et hydro-mécaniques des sols compactés comme la réduction de potentiel du gonflement, l'augmentation de la résistance au cisaillement, l'augmentation de la module d'élasticité et la modification des propriétés de compactage. Dans ce travail, une étude expérimentale sur le traitement à la chaux du sol argileux de la ville de Soignies, en Belgique a été réalisée en effectuant une série d'essai, y compris analyse granulométrique, limites d'Atterberg, essais de compactage Proctor, essais CBR, essais de mesure de pH, essais de diffraction des rayons X, essais de résistance à la compression simple et essais triaxiaux avec pour objectif d'évaluer l'efficacité de la méthode de traitement à la chaux du sol de Soignies, ainsi que de donner la quantité optimale de chaux pour la conception pratique.

Mots-clés : essai de laboratoire, traitement à la chaux, sol de Soignies, pH du sol, diffraction des rayons X, résistance à la compression simple

## Abstract

Lime treatment is a well-known technique to improve mechanical properties of clay soil in civil engineering (e.g. road construction, railway and airport construction) by adding a small amount of lime into the soil. Many studies show that lime treatment can significantly modify the physical and hydro-mechanical properties of compacted soil such as reducing swelling potential, increasing shear strength, increasing elastic modulus and modifying the compaction properties. In this study, a experimental investigation on the lime treatment of the clay soil in Soignies, Belgium was conducted by performing a series of tests, including grain size analysis, Atterberg limit tests, compaction Proctor tests, CBR tests, pH tests, X-ray diffraction tests, unconfined compressive strength tests and triaxial tests with an aim of assessing the suitability of the lime treatment method on the Soignies soil, as well as giving the optimal lime quantity for the design practice.

Keywords : Laboratory test, lime treatment, Soignies soil, pH soil, x-ray diffraction, unconfined compressive strength

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Contexte générale

De nos jours, le contexte de développement durable doit être soigneusement considéré dans toutes les activités humaines pour protéger l'environnement et pour la gestion des ressources naturelles.

La construction est une activité qui a généralement le plus fort impact sur la nature. En effet, lors des travaux de génie civil, notamment les travaux routiers (remblais, couches de forme, ou d'assises autoroutiers, routiers, ferroviaires, . . . etc.), l'aménagement du territoire joue un rôle primordial, non seulement sur le budget d'investissement mais aussi sur des impacts néfastes sur l'environnement naturel.

À cause de la raison économique associée à un souci écologique croissant de plus en plus lors de la réalisation des travaux routiers, on souhaite éviter du transport de terre et valoriser des matériaux locaux en réutilisant les sols qui sont extraits d'un déblai, puis transportés, et enfin mis en œuvre en remblai (figure 1.1).

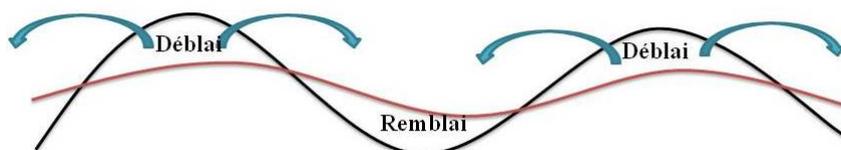


FIGURE 1.1 – Profil en long du projet routier

Les pratiques actuelles indiquent qu'il existe beaucoup de sols en Belgique n'étant, à priori, pas réutilisables dans leur état naturel car ils ne répondent pas aux exigences techniques imposées pour les applications envisagées. Ils présentent fréquemment une teneur en eau naturelle trop élevée et sont souvent trop plastiques, ce qui complique leur réutilisation (difficultés d'exécution, de supporter le trafic de chantier, d'obtenir le taux de compactage recherché, . . .)[Collin, 2003]. Par conséquent, il faudrait exiger le recours à des matériaux extérieurs aux projets lorsque la qualité et les propriétés géotechniques des matériaux rencontrés sur le site ne sont pas compatibles avec les performances demandées. Afin d'être compatible avec les exigences du développement durable, il est impératif d'utiliser des techniques de traitement des sols pour améliorer les sols médiocres locaux avant de les réutiliser.

Actuellement, la technique de traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques

est largement utilisée pour améliorer des propriétés mécaniques du sol sur l'emprise du projet dans le monde. Le traitement des sols à la chaux est une technique potentielle afin d'atteindre l'objectif «zéro emprunt, zéro dépôt» lors des travaux de terrassement dans le cadre des projets d'infrastructures.

Le traitement des sols en place à la chaux consiste à incorporer au sein des sols, cet agent de traitement - chaux, avec éventuellement de l'eau et les mélanger sur place avec pour objectif d'obtenir un matériau de construction de qualité recherchée en utilisant les affinités chimiques du sol et de la chaux.

Cette méthode de traitement des sols est anciennement reconnue et de plus en plus largement utilisée présentant beaucoup d'avantages sur 3 aspects : techniques, économiques, écologiques et environnementaux [Rou, 2004].

**Technique** : la technique permet l'exécution en remblais et en couches de forme en réalisant une couche traitée homogène, durable et stable, en présentant des caractéristiques mécaniques adaptées aux exigences de l'ouvrage. En outre, la nouvelle structure sol - chaux permet de bine répartir des charges sur le support. Cette technique assure également un bon comportement vis - à - vis des effets environnementaux (cycles séchage-humidification, gel-dégel et température chaude).

**Économique** : cette technique est réalisée à température ambiante. Elle utilise donc peu d'énergie. De plus, la réutilisation des matériaux en place contribue fortement à réduire le fonds d'investissement (mise en décharge, apport de granulats et coût de leur transport) des ouvrages d'infrastructures.

**Écologique et environnemental** : le travail à température ambiante avec la limitation de transport réduit sensiblement la pollution atmosphérique. La réutilisation des matériaux en place limite aussi l'exploitation des ressources naturelles non renouvelables. Ce qui contribue significativement à préserver l'environnement.

Afin d'améliorer davantage l'efficacité de cette technique de traitement des sols, depuis les années soixante, il y a beaucoup de recherches approfondies concernant cette méthode, qui ont été réalisées. À présent, on peut donc contrôler quasi parfaitement la qualité de cette méthode de traitement des sols pour appliquer efficacement cette technique aux cas particuliers.

## 1.2 Brève histoire

Le traitement des sols plastiques à la chaux a une très longue histoire. Cette technique apparaît depuis l'Antiquité. Les Chinois et les Romains sont les premières personnes utilisant cette forme d'amélioration des sols pour la construction de la Grande Muraille de Chine et celle de grandes voies de communication [McDowell, 1959].

Plus récemment, le premier test de la stabilisation des sols a été réalisé aux États-Unis en 1904 et la chaux a été premièrement utilisée comme un agent stabilisant dans la construction pratique des autoroutes en 1924 [Clare and Cruchley, 1957]. À cause de l'expansion des routes, pendant les années trente, pour répondre au accroissement des véhicules, l'utilisation du traitement des sols à la chaux a significativement augmentée. À cette époque, la chaux a été, sous forme de coulis, rajoutée aux sols argileux, afin d'améliorer des propriétés mécanique ainsi

que l'ouvrabilité de ce type de sol pour la réalisation des revêtements durables, des fondations des ouvrages routiers.

En Belgique, à la fin des années soixante, le CRR (Centre de Recherche Routière) a réalisé des études concernant cette technique lors de la construction du réseau autoroutier belge. Les résultats obtenus ont permis des progrès dans notre connaissance et cette méthode d'amélioration des sols a été adaptée aux sols humides d'Europe occidentale en utilisant de la chaux vive pour réduire la teneur en eau. À l'aide de ce résultat, un volume important de sols fins ( $> 10$  millions de  $m^3$ ) ont été améliorés et stabilisés à cette époque [Venstermans et al., 2001].

Sur le marché français, où règne le sol plastique fin, la technique a été fortement développée pendant les décennies suivantes. Elle a été appliquée pour la construction de fondation routière en réutilisant ce type de sol, éventuellement combiné à un traitement au ciment. Le résultat pratique obtenu était merveilleux : 7 millions de tonnes de sol traité et la quantité beaucoup plus grande de sols améliorés pour remblais lors de construction des ouvrages routiers.

Actuellement, la technique est utilisée non seulement dans la construction routière, mais également des travaux nécessitant peu de mouvements de terres en raison de la diminution croissante des possibilités de mise en décharge et d'utilisation des matériaux extérieurs pour remblais. La réalisation de plates-formes industrielles et aires de stationnement, la construction de complexes commerciaux et le comblement de tranchées de collecteurs et d'égouts en sont des exemples.

Un nouveau développement est aussi en cours dans le domaine de la réutilisation des terres. Ce sont les excédents de terres centralisés en un lieu, traités et remis sur le marché comme matériau de remblai certifié.

### 1.3 Cadre de recherche

Cette étude se consacre à un résumé bibliographique sur des études existantes dans la littérature et des essais dans le laboratoire afin d'évaluer l'efficacité, à court terme, du traitement à la chaux pour le sol étudié, sol de la ville de Soignies.

L'organisation de cette étude comprend 2 parties principales : étude bibliographique (les trois premiers chapitres) et étude expérimentale (les trois derniers chapitres). Les six chapitres sont :

**Chapitre 1 - Introduction :** ce premier chapitre présentera la problématique lors des travaux de terrassement, l'efficacité pratique du traitement des sols à la chaux sur place, sa brève histoire et l'organisation de ce mémoire.

**Chapitre 2 - Traitement des sols en terrassement :** on abordera la généralité des méthodes chimiques de traitement des sols en place, en concentrant sur la recommandation de mode d'emploi, des effets du traitement à la chaux sur chantier. On donnera une comparaison des traitements des sols par 2 agents les plus communs - chaux et ciment pour souligner des avantages de la chaux pour l'amélioration des sols.

**Chapitre 3 - Technique du traitement des sols à la chaux :** dans ce chapitre, on consacra notre étude au mécanisme de réaction de la chaux avec le système des sols fins

humides aux différentes échelles. L'influence de chaque paramètre de la technique et la perturbation du processus de traitement seront également mentionnées.

**Chapitre 4 - Procédure expérimentale :** une description détaillée sur des modes opératoires et des dispositifs expérimentaux des essais dans le laboratoire sera évoquée, dans ce chapitre, y compris l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, la méthode d'Eades et Grim - mesure pH du sol, la diffraction des rayons X, l'essai de titrage pour déterminer la quantité de la chaux libre à la fin du temps de maturation, compactage de proctor et CBR, la compression simple et l'essai triaxial.

**Chapitre 5 - Résultats et discussion :** cet chapitre parlera des résultats des essais dans une relation avec des résultats précédemment rapportés dans la littérature pour expliquer et discuter l'efficacité de traitement à la chaux de notre sol.

**Chapitre 6 - Conclusion :** le dernier chapitre donnera un résumé et des perspectives à l'issue de ce travail.

## Chapitre 2

# Traitement de sols en terrassement

### 2.1 Stabilisation des sols

En général, la stabilisation des sols est le processus de création ou l'amélioration de certaines propriétés désirées dans un matériau du sol de manière à le rendre stable et utile pour un but précis. Spécifiquement, [McNally, 1998] stipule que les améliorations dans les propriétés mécaniques causées par la stabilisation peuvent être les suivantes : augmentation de la résistance du sol (résistance au cisaillement), la rigidité (résistance à la déformation) et de durabilité (résistance à l'usure), la réduction du gonflement. La stabilisation des sols est normalement employée quand il est plus économique pour surmonter un déficit dans les propriétés d'un matériau sur place que le fait d'apporter un autre matériau loin du site de construction dont les propriétés est conforme aux objectifs désirés.

En réalité en construction, les agents stabilisants des sols sont principalement :

- gravier, granulats concassés, sable ;
- ciment Portland et ciment - mélanges de laitier ;
- chaux (chaux vive, chaux hydratée) et le gypse ;
- chaux - pouzzolane (chaux plus cendres volantes ou le laitier) ;
- asphalte (bitume) ;

Les effets de chaque agent stabilisant sur les différents sols ne sont pas identiques. Les propriétés obtenues sont dépendantes du type d'agent et du type de sol utilisé. McNally [1998] déclare que la sélection d'un agent approprié de stabilisant et des procédures de construction implique certain nombre de considérations. Le tableau 2.1 donne un résumé des mécanismes et l'applicabilité des divers agents stabilisants et la figure 2.1 illustre leur pertinence par rapport à la taille des particules du sol prédominantes et la plasticité.

Il est montré dans le tableau 2.1 que le ciment et le bitume sont les mieux adaptés pour les granulaires et les sols non plastiques, tandis que la chaux est plus performante dans les sols cohésifs. La stabilisation des sols granulaires est beaucoup plus facile lorsque le matériel grossier est mélangé aux autres plus fins. La figure 2.1 montre également que la chaux est préférable pour l'argile. Les effets de la minéralogie du sol sur sa réponse à la stabilisation jouent le rôle non-négligeable et sont présentés dans le tableau 2.2.

TABLE 2.1 – Mécanismes et applicabilités de divers agents stabilisants, [McNally, 1998]

Mécanisme	Effets	Sol approprié
<p><b><u>Granulat</u></b> Mélange avec le sol de mauvaise granulométrie, utilisé souvent pour les sols grossiers à fins (non-argileux)</p>	Densité de compactage plus élevée, mélange plus homogène, augmentation de la résistance	Granulométrie discontinue ou déficit en gravier (addition de gravier ou sable) ou harsh FCR - Fine crushed rock road base, (loam addition)
<p><b><u>Ciment</u></b> Mélange avec une petite quantité de ciment (modification du ciment) ou en proportion large (agglomération des grains)</p>	Amélioration de la résistance au cisaillement, réduction de la sensibilité à l'eau (modification), augmentation de la résistance à la traction et de la rigidité	La plupart des sols granulaires, surtout, de grandes quantités de ciment nécessaires dans les sols argileux, donc coûteux
<p><b><u>Chaux</u></b> Mélange du sol avec une quantité de faible à moyenne de chaux vive ou hydratée</p>	Augmentation de la capacité portante, séchage du sol humide, amélioration de la friabilité, réduction du gonflement et du retrait	Sols cohérents et spécialement humides, argiles avec IP élevé
<p><b><u>Chaux pouzzolane</u></b> Mélange de chaux plus des cendres volantes ou de l'argile en poudre dans le sol ou FCR</p>	Similaire au ciment, mais l'action plus lente et moins de résistance ultime	Comme dans le cas de ciment
<p><b><u>Bitume</u></b> Agglomération, le revêtement et la liaison de particules granulaires</p>	Imperméable, donner de la cohésion et la rigidité	Granulaire, sols non-cohérents dans les climats chauds

TABLE 2.2 – Effets de la minéralogie du sol sur sa réponse à la stabilisation, [McNally, 1998]

Minéraux	Agents recommandés	Remarques
Graviers concassés et FCR	Sableux ou limoneux, écrasés de schiste (secs)	Amélioration de la granulométrie, la maniabilité, augmentation de la densité de compactage
Sable de quartz	comme ci-dessus	Amélioration de la granulométrie, augmentation de la densité, donner la plasticité
	Ciment	pour la densité, résistance de cisaillement, imperméabilité
	Bitume, émulsion de bitume	Pour la cohésion, étanchéité
Sables de carbonate	Chaux	IP plus basse, augmentation de la résistance au cisaillement
Kaolinite, illite	Chaux	Pour le séchage, la friabilité et le développement de résistance
	Ciment	Pour la résistance au début, surtout en cas de la chaux précédemment appliquée
Montmorillorite et argiles de feuillets mixtes	Chaux	Pour le séchage, la friabilité et réduction IP
Argiles dispersives (sodique)	Chaux et gypse	Pour résister à la défloculation et à l'érosion interne
Allophane	Mélange de chaux - gypse	Pour la résistance
Centres volcaniques	Chaux	Accélération de la réaction pouzzolanique

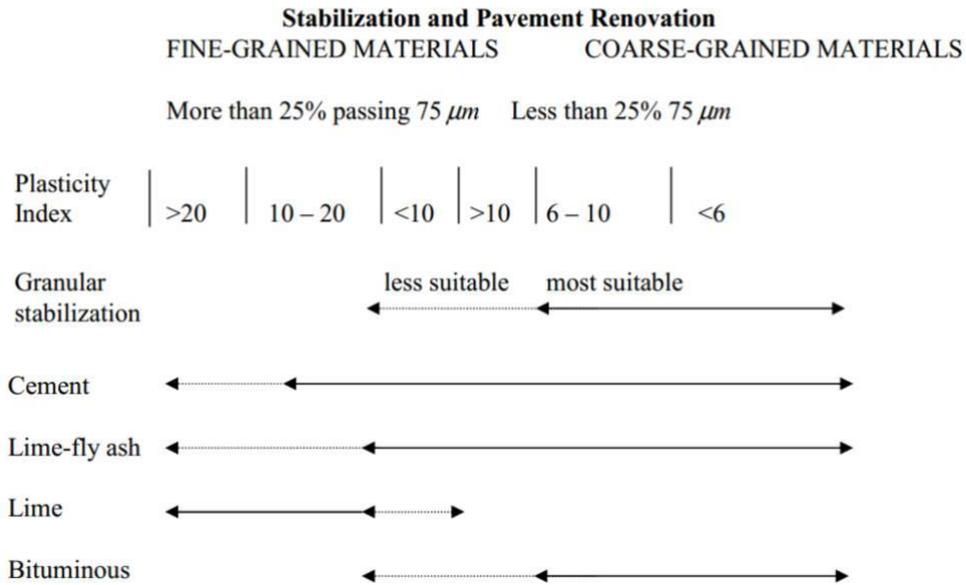


FIGURE 2.1 – Méthodes de stabilisation en fonction de leur convenance pour les sols de différente granulométrie et plasticité,[McNally, 1998]

## 2.2 Compactage du sol

Le compactage des sols est une technique utilisée en génie civil visant à améliorer la qualité des sols pour la construction. Le compactage d'un sol consiste à faire diminuer son volume par l'application d'un procédé mécanique (force, vibration, combinaison des deux, chocs, ...). Cette diminution du volume ne se produit que par l'élimination des vides remplis d'air qui existent dans le sol à son état initial. La teneur en eau du sol n'est donc pas modifiée. La diminution du volume implique l'augmentation du poids volumique du sol. Cela permet d'améliorer la résistance, de diminuer de la déformabilité et de réduire de la perméabilité. Il peut ainsi réduire ou éliminer le risque de tassement, également augmenter la stabilité des talus, mais aussi améliorer la capacité portante. Le compactage permet aussi de limiter les variations des volumes indésirables causés, par exemple, par l'action du gel, par le gonflement et par le retrait du sol, ou bien de prévenir la liquéfaction des sols.

L'efficacité du compactage est contrôlée par la densité obtenue qui 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 décroît avec l'augmentation de la teneur en eau. Cette valeur optimale est très importante, sur chantier, pour obtenir des sols suffisamment denses. C'est pour cette raison, que dans les années 1930, les principes fondamentaux du compactage des sols ont été donnés par R.Proctor. Il construisait alors des barrages pour l'ancien Bureau de l'Aqueduc de Los Angeles. À partir de ce moment-là, l'essai de compactage s'appelle l'essai Proctor. Le compactage est en fonction de quatre paramètres : la masse volumique du sol sec ( $\rho_d$ ), la teneur en eau (w), le compactage (énergie et mode), et le type de sol dont l'influence est illustrée par la figure 2.2.

L'effet direct du traitement des sols à la chaux et/ou au liant hydraulique sur l'essai de compactage est de modifier l'optimum Proctor du sol. Cette modification du sol traité sera détaillée dans les sections suivantes.

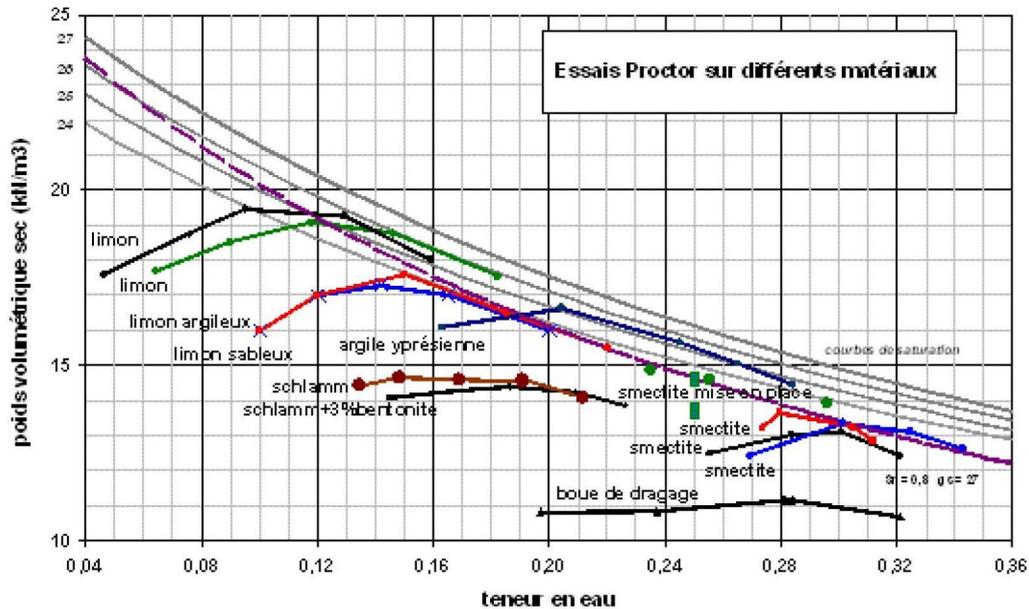


FIGURE 2.2 – Exemple de courbes de compactage suivant la nature du sol [Marcoen et al., 2000]

### 2.3 Traitement des sols à la chaux

Le traitement des sols à la chaux est un exemple typique de la méthode chimique pour améliorer des propriétés physico-mécaniques du sol. Le principe de la technique se base sur le processus physico-chimique de la réaction entre la chaux ajoutée et les minéraux argileux dans le sol traité qui conduit aux effets à court-terme (amélioration) et à long-terme (stabilisation) sur le sol.

Généralement, les sols qui sont candidats pour le traitement à la chaux disposaient d’une fraction minimale à  $75\mu\text{ m}$  de 25% et leur indice de plasticité supérieure à 10 [Dallas, 2000]. Cela est en accord avec les critères de choix de la méthode du traitement présentées à la figure 2.1. En fait, les sols argileux et limoneux satisfont à ces deux conditions.

#### 2.3.1 Amélioration à la chaux

La mise en contact entre la chaux (vive ou éteinte) et l’eau dans le sol par l’incorporation de la chaux à un sol humide provoque immédiatement une consommation d’eau et une évaporation importante à cause de la réaction exothermique suivante :



La chaleur de cette réaction chimique sèche le sol humide. La réaction avec de l’eau se produit même si les sols ne contiennent pas d’importantes fractions argileuses. Lorsque les particules argileuses sont présentes, la réaction chimique de la chaux avec des argiles cause un séchage plus fort. Le séchage se passe rapidement, en quelques heures, permettant de faire le compactage du sol beaucoup plus rapidement que par nécessité d’attendre pour le sol séché par évaporation naturelle.

Le séchage du sol humide sur le chantier est un des plus applications les plus courantes de la chaux pour le traitement des sols. Cet avantage de la chaux peut être utilisé pour servir à un ou plusieurs des objectifs suivants : compactage à l’aide d’un séchage sur les zones

humides; de fournir une table de travail pour la construction ultérieure, et de rendre le sol réalisable pour autre stabilisation convenable (avec du ciment Portland ou de l'asphalte). En général, entre 1% et 4% de chaux est suffisant pour sécher un site humide afin de permettre les travaux de construction de s'effectuer [Association et al., 2004].

L'incorporation de la chaux à un sol argileux ou limoneux non seulement provoque le séchage plus rapide, mais aussi modifie la structure du sol à court-terme par l'agglomération des particules fines en grumeaux stables (grossières et friables) en raison de leur fraction argileuse. Ce phénomène est appelé granulation ou floculation et s'explique par l'échange des cations alcalins ( $Na^+$ ,  $K^+$ ...) par des cations  $Ca^{2+}$  apportés par la chaux; ceci développe des forces électriques conduisant à la formation des ponts  $Ca(OH)_2$  ou  $CaOH^+$  entre les feuillets d'argile (figure 2.3).

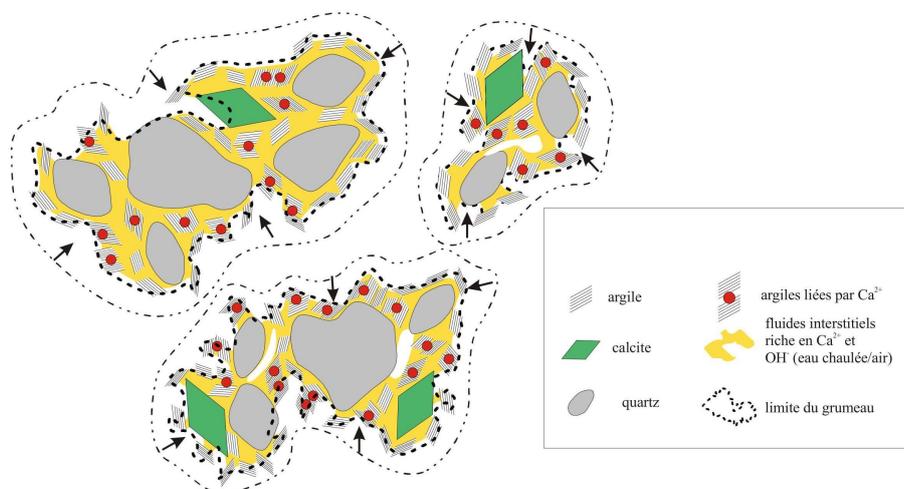


FIGURE 2.3 – Schématisation de l'action de chaux à court terme, [Cabane, 2004]

En raison de changements de texture causés par ces réactions dans le sol, la résistance et l'humidité de ces sols sont améliorées. Ces améliorations se traduisent par une meilleure maniabilité, par l'amélioration de la résistance immédiate et par la réduction du potentiel de gonflement.

En pratique, on observe normalement que, les limites de liquidité, la densité sèche, le potentiel de gonflement diminuent, tandis que les limite de plasticité, la teneur en eau optimale Proctor et les valeurs CBR augmentent à court-terme [Eades and Grim, 1960; Bell, 1989; Locat et al., 1990; Bell, 1996]. De plus, la courbe Proctor devient plus plate que celle du sol non-traité. Ces résultats obtenus dans le laboratoire explique, en réalité, qu'un sol fin et humide traité à la chaux passe d'un état plastique à un état solide, friable, facilement travaillable et perd une partie de sa sensibilité à l'eau.

### 2.3.2 Stabilisation à la chaux

La performance du sol traité à la chaux dépendant fortement du temps de cure est également un critère très important, en choisissant la méthode pour le traitement en terrassement sur le chantier. Kavak and Baykal [2012] ont donné un exemple de la stabilisation des sols par trois méthodes différentes : traitement à la chaux, remplacement du sol et renforcement du sol par géosynthétique quand l'on a élargi un ancien chemin de fer au Tchèque. Après 5

ans d'exploitation, la section traitée à la chaux sert encore très bien. Tandis que des sections utilisant les deux autres méthodes doivent être reconstruites. Cette caractéristique favorable de la chaux s'est expliquée par le processus de la réaction pouzzolanique au long du temps entre la chaux et les minéraux argileux dans le sol traité.

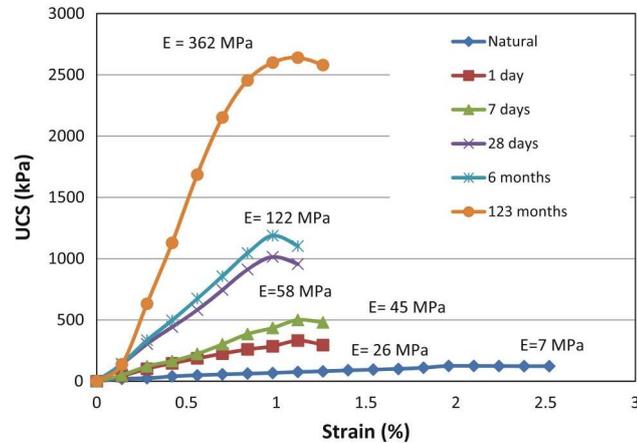


FIGURE 2.4 – Essai de compression simple du sol traité à la chaux au cours du temps, [Kavak and Baykal, 2012]

Lorsque la chaux est ajoutée dans le sol, elle fournit un milieu à haut pH (12,4) qui donne la condition initiale pour dissoudre des silices et alumines. Les substances dissoutes réagissent avec le calcium pour former de nouveaux composés cimentaires. Ce sont le silicate de calcium hydraté (CSH) et l'aluminate de calcium hydraté (CAH) qui sont similaires à ceux formés dans l'hydratation du ciment Portland. Ils forment la matrice qui contribue à la résistance des couches de sol traité à la chaux (figure 2.5). À l'issue des formes matricielles, le sol est transformé à partir d'un sable, matériau granulaire en une couche dure et relativement imperméable avec une capacité de charge significative. La matrice formée est permanente, durable et significativement imperméable, produisant une couche structurelle qui est à la fois solide et souple [Eades and Grim, 1960; Diamond et al., 1963; Ingles and Metcalf, 1972]

À long-terme, on observe clairement l'augmentation très forte de la résistance [Locat et al., 1990; Bell, 1996; Boardman et al., 2001; Kavak and Baykal, 2012], l'amélioration de la perméabilité [Osinubi, 1998b], la stabilité contre le gonflement et le retrait, la durabilité contre des effets environnementaux comme cycles de séchage - humidification et de gel -dégel [Guney et al., 2007; Khat tab et al., 2007; Stoltz et al., 2011; Tang et al., 2011].

## 2.4 Traitement des sols au ciment Portland

Le ciment Portland est un matériau finement divisé, qui résulte de l'inter-broyage du clinker et du gypse. Le clinker est un produit hydraulique composant de quatre phases principales de l'oxyde : silicate tricalcique ( $C_3S$ ), silicate dicalcique ( $C_2S$ ), aluminate tricalcique ( $C_3A$ ) et aluminoferrite tétracalcique ( $C_4AF$ ). Les deux phases de silicate de calcium sont les plus importantes en ce qui concerne la stabilisation des sols.



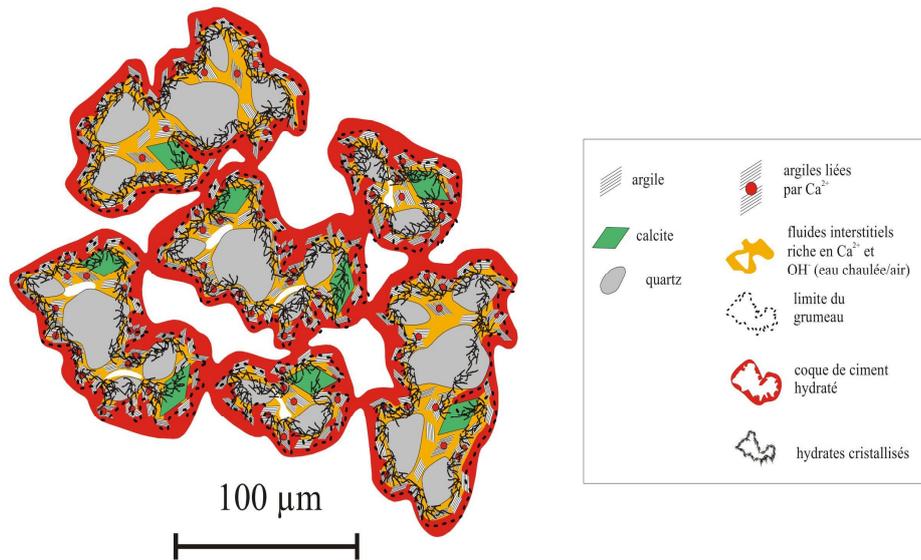


FIGURE 2.5 – Représentation schématique du limon traité au-delà 90 jours de cure, [Cabane, 2004]

Où  $H = H_2O$  ;  $CSH = C_3S_2H_3$

Le mélange du ciment dans le sol argileux humide produit donc des matériaux cimentaires primaires et secondaires dans la matrice de sol-ciment [Chew et al., 2004]. Les matériaux primaires à base de ciment sont formés par la réaction d’hydratation, et sont constitués de silicates de calcium hydratés ( $C_2SH_x$ ,  $C_3S_2H_x$ ), d’aluminates de calcium ( $C_3AH_x$ ,  $C_4AH_x$ ) qui fournissent la résistance et la structure de la matrice du sol, et la chaux hydratée  $Ca(OH)_2$ , ce qui fournit du calcium disponible pour l’échange cationique résultant la floculation et l’agglomération. C’est donc la différence particulière en terme de mécanisme par rapport au traitement des sols à la chaux. Une réaction pouzzolanique secondaire entre la chaux hydratée et la silice et l’alumine constituée dans les minéraux argileux conduit à la formation d’autres silicates de calcium hydratés et aluminates de calcium hydratés comme dans le cas de la chaux.

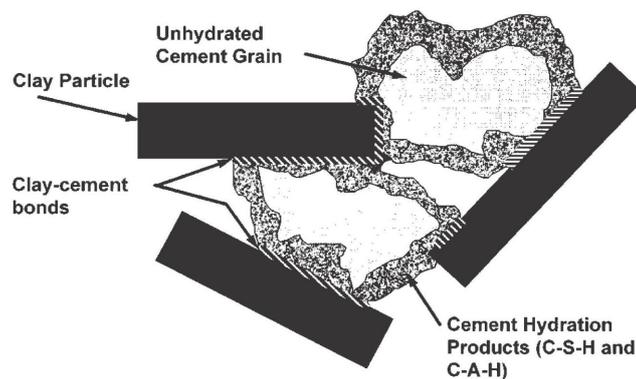


FIGURE 2.6 – Hydratation du ciment dans l’argile humide, [Prusinski and Bhattacharja, 1999]

En pratique, avec la chaux, le ciment est l’un des deux agents de stabilisation le plus largement utilisé dans le domaine de traitement des sols par la méthode chimique. Comme la chaux, le ciment, après avoir mélangé avec le sol, réduit le gonflement/retrait à l’origine de réduction de la plasticité du sol gonflant, améliore l’ouvrabilité, augmente la résistance.

## 2.5 Évaluation comparative entre modification à la chaux et au ciment

La chaux et le ciment sont deux types d'addition les plus largement utilisées pour le traitement des sols fins en terrassement. Le principe de ces deux types de stabilisation est principalement la dissolution de silicates et aluminates dans un milieu à haut pH, ce qui est directement fourni par la dissociation de la chaux dans l'eau pour le mélange chaux-eau et par des produits très réactifs d'hydratation du ciment. En pratique, le choix de type de modificateur se base non seulement sur le gain de résistance de la méthode de traitement, mais également sur la fluctuation du prix de matériaux sur le marché. En outre, l'indisponibilité de type de modificateur rend le choix impératif de l'autre type pour le travail du traitement.

Il existe quelques recherches sur la comparaison de ces deux types de modificateur par la comparaison de l'influence de la chaux et du ciment sur la modification et la stabilisation des sols argileux traités. Typiquement, Ingles and Metcalf [1972] ont présenté que la chaux est meilleur modificateur que le ciment pour les sols qui ont une fraction d'argile importante. Pourtant, ce résultat semble être indisponible pour les sols dont la fraction argileuse n'est pas significative.

Avec pour objectif de vérifier la justesse de cette proposition dans le cas des sols pauvrement argileux. Osula [1996] a travaillé sur l'argile latéritique dont la fraction argileuse est de 13% traitée au même pourcentage de la chaux et du ciment.

Les effets de la modification de 2 types de modificateur sont exprimés par des changements de la distribution des grains, des limites d'Atterberg et des optimums de Proctor. La comparaison est basée sur la proportion de la modification provoquée par 2 modificateurs. Il a aussi donné des conclusions comme les suivantes.

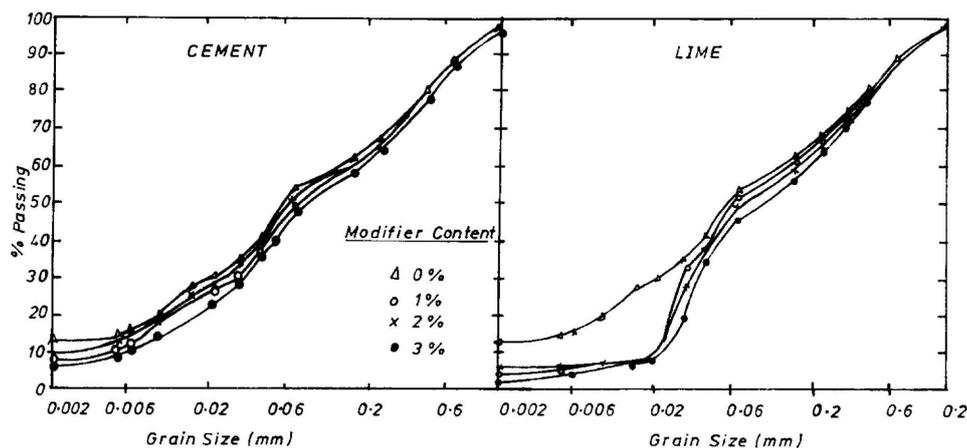


FIGURE 2.7 – Modification dans la courbe granulométrique à l'instant de 2h après le mélange, [Osula, 1996]

La chaux est légèrement plus efficace que le ciment dans l'amélioration de la taille des grains, à tous les instants considérés après le mélange (figure 2.7).

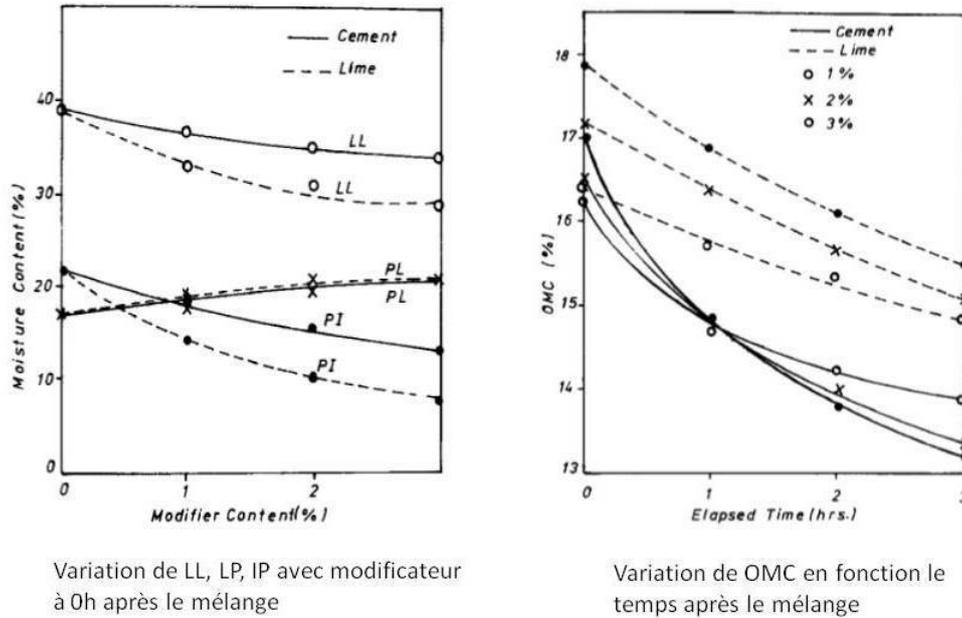


FIGURE 2.8 – Effets du modificateur sur des limites d’Atterbergs et des optimums Protor, [Osula, 1996]

Avec une teneur en modificateur croissant, la modification des limites d’Atterbergs et des optimums Protor dans la direction attendue de la chaux est plus efficace que celle du ciment. À partir de la meilleure performance globale de la modification de la chaux, il a suggéré que les produits d’hydratation du ciment autres que la chaux ne jouaient aucun rôle important dans les réactions de modification des sols. Leur rôle peut être unique dans le développement de la stabilisation du sol.

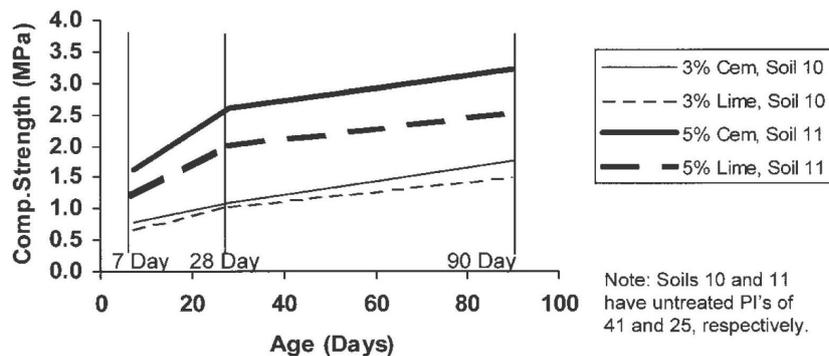


FIGURE 2.9 – Effets des agents stabilisateurs et du temps de cure sur la résistance du sol traité, [Prusinski and Bhattacharja, 1999]

À long - terme, le ciment manifeste la supériorité de l’augmentation de la résistance par rapport à la chaux. Prusinski and Bhattacharja [1999] ont rapporté que le ciment produisait la résistance au temps de cure relativement tôt (figure 2.9) grâce à l’hydratation du ciment produisant des matériaux cimentaires.

## Chapitre 3

# Technique du traitement à la chaux

Le principe du traitement à la chaux se base sur l'interaction de la chaux et les particules argileuses décrite par une succession de processus physico-chimiques complexes qui modifient le comportement mécanique des sols. Les quatre types de réactions qui peuvent se produire lors du traitement : (1) échange cationique, (2) floculation et agglomération, (3) carbonatation et (4) réaction pouzzolanique seront développés dans la première partie de ce chapitre. Un résumé bibliographique des paramètres du traitement sera également abordé. À la fin, on mentionnera des perturbations peuvent fortement influencer sur l'efficacité de la technique.

### 3.1 Minéralogie et chimie des sols

Un cours de minéralogie du sol fournit une excellente base pour chercher à comprendre les phénomènes impliqués dans la stabilisation des sols. Le sujet de la minéralogie du sol est donc la base de connaissance expliquant l'interaction entre la chaux et le sol.

La croûte terrestre est essentiellement composée d'oxygène (47,3%), de silicium (27,7%) et d'aluminium (7,8%). Elle sont suivies par des petites quantités de métaux du fer (4,5%), de calcium (3,5%), de sodium (2,5%), de potassium (2,5%) et de magnésium (2,2%) [Mitchell et al., 1976]

Un minéral est une substance inorganique naturelle et homogène ayant une composition chimique connue et des propriétés physiques caractéristiques et particulières. Ses structures cristallines internes déterminées (réseau cristallographique donné) sont caractérisées par des combinaisons diverses de deux unités structurales de base : tétraèdre de silice (T) et octaèdre d'aluminium (O). Ainsi, les éléments qui composent environ 83% de la croûte terrestre sont comptabilisés par ces deux unités structurales.

**Le tétraèdre**  $(SiO_4)^{-4}$  représente le polyèdre de coordination de base qui constitue principalement les minéraux de quartz et de feldspath. Le tétraèdre de silice n'est pas électriquement neutre. Les tétraèdres relient entre eux pour former des arrangements qui minimisent les forces de répulsions entre les ions silicium. La variété des minéraux silicate est produite par le tétraèdre -  $(SiO_4)^{-4}$  reliant avec d'autres tétraèdres similaires en partageant une, deux, trois ou tous les quatre atomes d'oxygène de tétraèdres. Les tétraèdres sont effectivement regroupés pour former une spirale comme présenté à la figure 3.2. Le partage d'atomes d'oxygène entre les tétraèdres résulte de le plus fort type de liaisons chimiques entre les tétraèdres primaires, c'est la liaison de valence.

**L'octaédrique** (couche O) à base d'octaèdres de gibbsite  $Al(OH)_3$ , octaèdre de 6 hy-

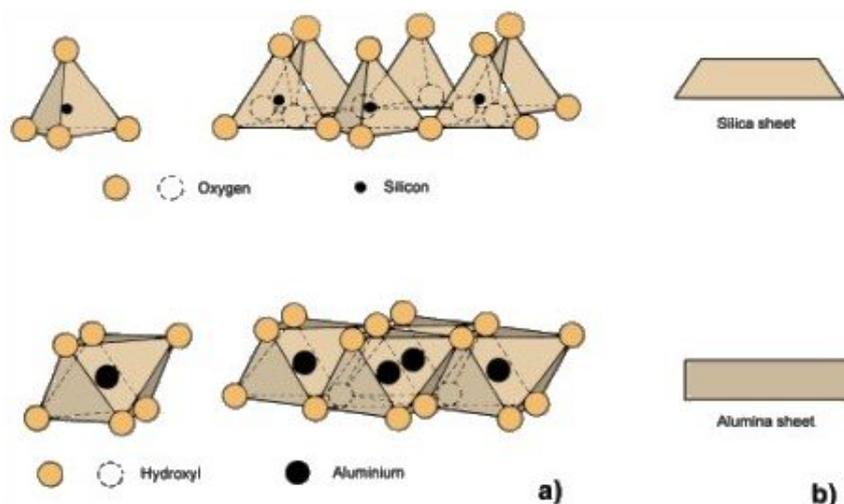


FIGURE 3.1 – Unités structurales de base de minéraux argileux et feuilles de silice et d'alumine [Mitchell et al., 1976]

droxyles  $OH^-$  avec un ion aluminium au centre. Un octaèdre est le volume formé par deux pyramides de base carrée, assemblées par les bases. De nouveau, ces octaèdres s'associent en formant des hexagones selon un plan. On peut aussi trouver la brucite  $Mg(OH)_2$  à la place de la gibbsite.

### 3.1.1 Minéraux argileux

Dans le quartz, chaque tétraèdre partage tous leurs quatre atomes d'oxygènes avec les autres pour former le réseau tridimensionnel. Un réseau de silicate comme le quartz est un minéral très fort (mécaniquement) et durable (mécaniquement et chimiquement). Cette stabilité est due à la liaison interne très forte entre des tétraèdres.

Un autre réseau de silice presque identique à quartz est le réseau de feldspath. Au cours de la formation de feldspath, une partie des positions de silice sont remplies par de l'aluminium. Puisque l'aluminium a une charge inférieure par +1 que celle de silice ce qui, crée un déséquilibre de charge dans la structure tridimensionnelle. Ce potentiel de charge est donc équilibré par des cations adsorbés dans la structure de réseau tel que le potassium, le calcium et le sodium. Le minéral feldspath est plus faible et moins durable que le quartz pour deux raisons : (1) le cation aluminium est plus grand que l'ion de silice et ne fixe précisément pas entre les atomes d'oxygène comme le fait que le silicium et (2) les cations adsorbés dans les trois dimensions silicate rendent la structure plus sensible aux intempéries [Little, 1995].

Malgré les différences dites ci-dessus, tous les deux quartz et feldspath en particules qui sont équidimensionnels, granulaires, durs et chimiquement relativement stables. Les minéraux de quartz et de feldspath peuvent exister sur une large gamme de tailles de particules (de gravier à limon). En fait, le quartz, en raison de sa nature extrêmement stable, peut-être même conservé sa structure minéralogique quand il est altéré jusqu'aux tailles de particules argileuses (inférieure à  $2 \mu m$ ). D'autre part, le feldspath, parce qu'il est moins mécaniquement et chimiquement stable, il ne conserve pas sa structure de base minéralogique sous des intempéries extrêmes. En d'autres termes, on ne trouve pas généralement la présence de feldspaths dans la taille argileuse.

Les tétraèdres de silice sont reliés entre eux au niveau de leurs coins en raison de la forte répulsion entre triangles adjacents des tétraèdres. Cette disposition permet aux tétraèdres de former des structures cristallines. En fait, ces structures sont les silicates indépendants ou les chaînes, les anneaux de tétraèdres et les phyllosilicates 3.2. Les silicates lamellaires sont une unité d'épaisseur mais peut théoriquement s'étendre infiniment dans la dimension latérale. Ce sont des unités à partir desquelles les minéraux argileux sont formés.

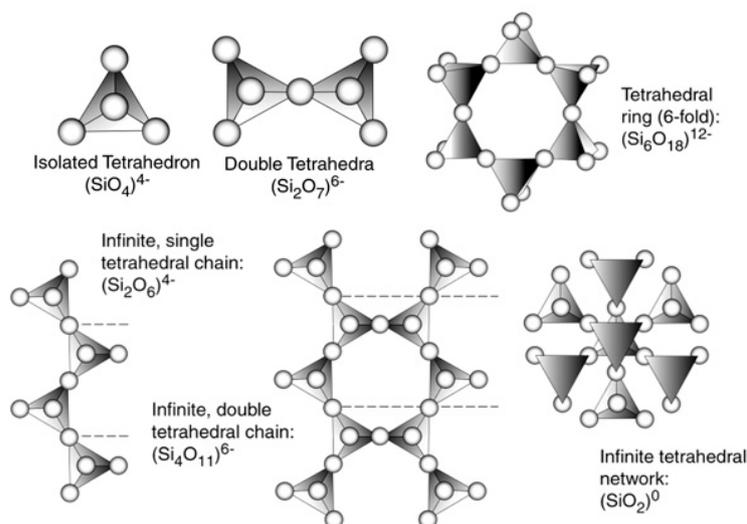


FIGURE 3.2 – Formes d'arrangements possibles des tétraèdre de silice, [Little, 1995]

Un scénario typique pour la formation de minéraux argileux est l'altération chimique des feldspaths. L'hydrolyse est probablement le processus chimique le plus important aux intempéries et est provoquée par une réaction entre les ions dans le minéral de feldspath, le hydrogène dissocié ( $H^+$ ) et des ions hydroxyde ( $OH^-$ ) de l'eau.

Les petits ions  $H^+$  dissociés de la molécule d'eau peuvent facilement entrer dans la structure en réseau ouvert du minéral de feldspath. En grandes concentrations dans le réseau, ils remplacent les ions métalliques qui ont été adsorbés à neutraliser le déficit de charge provoquée par la substitution de l'aluminium pour le silicium lors de la formation du feldspath. Les ions remplacés comprennent le sodium, le potassium et le calcium.

Les deux couches de base, tétraédriques (T) et octaédriques (O), illustrées à la figure 3.1 sont empilées pour former des minéraux argileux les plus communs. Les deux arrangements communs des couches T et O qui constituent les unités de base de minéraux argileux sont présentés à la figure 3.3. La configuration 1 :1 (T-O) est typique du minéral de kaolinite qui présente une faible plasticité. La configuration 2 :1 (T-O-T) est typique du groupe d'argile smectique qui peut être très plastique et instable [Mitchell et al., 1976].

Au cours de la formation de certains minéraux argileux, un phénomène appelé substitution isomorphe se produit. Dans ce procédé, une partie des ions de silicium dans la couche tétraédrique ou des ions d'aluminium dans la couche octaédrique sont remplacés par d'autres ions métalliques de faible charge positive (valence inférieure). Le résultat est un déficit de charge qui se traduit par une charge nette négative à la surface de la cellule unitaire d'argile. Certains minéraux, tels que la kaolinite, l'expérience montre que la substitution isomorphe partielle est très peu. Dans la kaolinite, environ 1/400 d'atomes de silicium (valence +4), sont remplacés par de l'aluminium (+3 valence) dans la couche tétraédrique. Le smectite, d'autre part, on

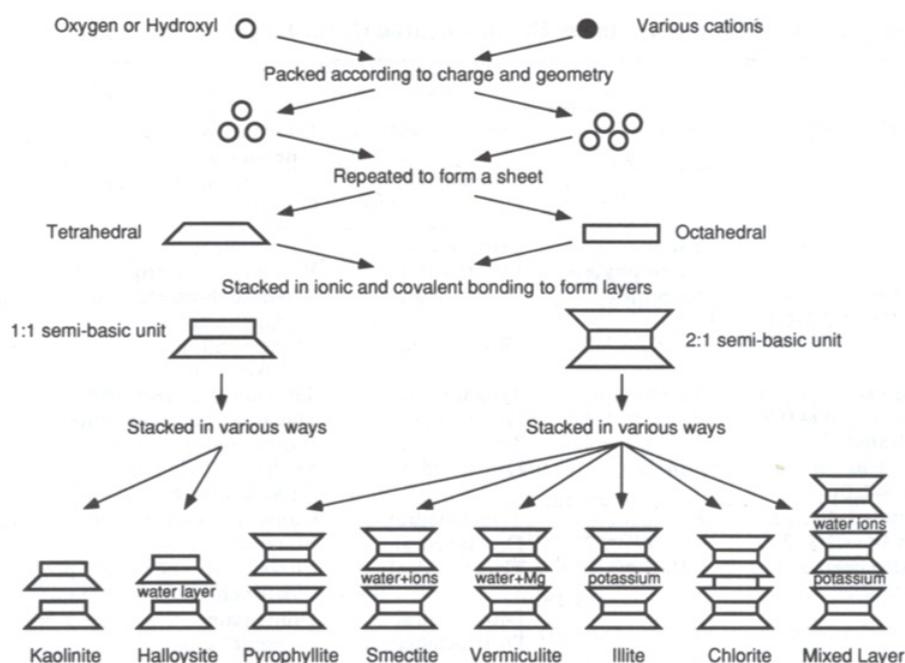


FIGURE 3.3 – Unités structurales des minéraux argileux communs d'après [Mitchell et al., 1976]

a une substitution isomorphe abondante, typiquement d'environ 1/6 d'atomes d'aluminium (+3 valence) dans la couche octaédrique sont remplacés par du magnésium (+2 valence). Les résultats est que les minéraux de type smectique ont une charge de surface négative très élevée et que les minéraux de kaolinite ont une charge de surface négative faible. Le rapport de charge de surface entre la smectite et kaolinite est d'environ 10 à 1 [Little, 1995].

La manière dont les cellules unitaires de base de minéraux argileux sont reliées entre elles est fortement affectée par la charge de surface ainsi que la structure minérale. En fait, cellules unitaires de kaolinite sont liées par des liaisons hydrogène entre les atomes d'oxygène sur la base de la couche tétraédrique et des ions hydroxyde à la surface de la couche octaédrique, (figure 3.4). La liaison hydrogène est une liaison secondaire de valence n'est pas aussi forte que les liaisons primaire de valence qui relient les couches (T et O) ensemble. Cependant, la liaison est suffisamment forte pour empêcher l'infiltration dans les couches par l'eau ou par les particules étrangères, telles que les cations. Le résultat est que la kaolinite est une argile relativement stable de faible plasticité.

La grande quantité de substitution isomorphe se produisant au sein des unités de smectite donne un minéral argileux avec une charge de surface sensiblement négative. Cette charge est satisfaite par l'adsorption des ions positivement chargés (cations), à la surface. Les liaisons entre les couches successives sont dues au fait que les cations adsorbées équilibrent avec les charges négatives de la surface de l'argile (figure 3.4). Par conséquent, ce lien cationnique est une liaison très faible et se traduit par des particules d'argile avec des plans de premier plan de clivage ou de faiblesse. En raison de la liaison faible du feuillet intermédiaire, des particules d'argile smectique sont des particules beaucoup plus petites que les particules de kaolinite.

L'efficacité de cette liaison cationnique dépend du type et de la concentration des cations disponibles. C'est pourquoi, la réponse de l'argile smectique à l'eau dépend fortement des ions présents dans l'eau interstitielle. Ainsi, sa capacité à gonfler ou son retrait et sa plasticité sont

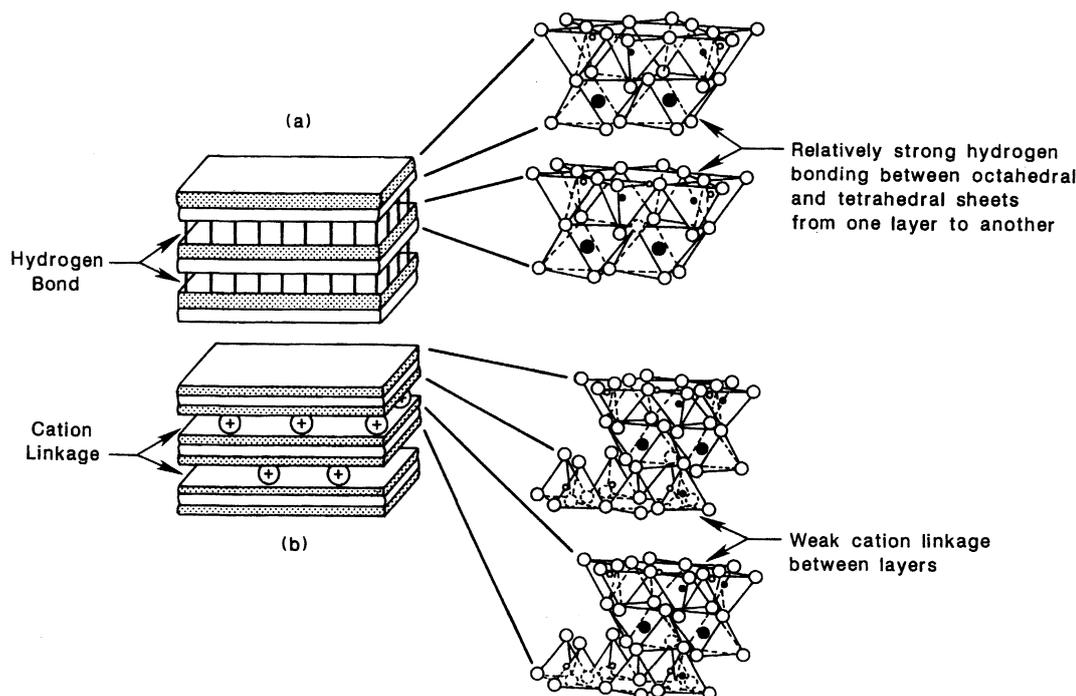


FIGURE 3.4 – Liaisons typiques dans les groupes de minéraux argileux, [Little, 1995]

contrôlés par l'interaction argile-eau.

### 3.1.2 Système d'argile-eau

À cause du fait que les particules d'argile sont généralement composées des couches tétraédriques et octaédriques. Dans le minéral smectiques, l'agencement de 2 :1, associé à un niveau substantiel de substitution isomorphe (1/6 du nombre d'atomes d'aluminium remplacés par magnésium), conduit aux particules d'argile ayant une morphologie en forme de plaque. Ces particules sont également très faibles de tailles et possèdent une surface énorme. En fait, les minéraux smectique ont souvent des surfaces de près de  $800 \text{ m}^2/\text{g}$ . Cela peut être comparé à seul  $15 \text{ m}^2/\text{g}$  pour kaolinite<sup>1</sup>. Avec cette surface disponible énorme couplée à la nature hautement chargée de la surface d'argile, il n'est pas étonnant que l'argile soit active et peut facilement absorber les liquides polaires comme l'eau et des cations disponibles dans l'environnement interstitiel.

La figure 3.5 donne une explication simplifiée tout en représentant les phénomènes importants dans le système d'argile - eau. Tout d'abord, à la figure 3.5 la surface d'argile négative est représentée à être entourée par des cations chargés positivement attirés vers la surface pour équilibrer le potentiel de charge. Ces ions forment une couche diffusée. Cette diffusion est due à la charge de la répulsion et de l'agitation thermique des cations. Un deuxième phénomène illustré à la figure 3.5 est la diffusion des molécules d'eau vers la forte concentration de cations vers la surface d'argile à cause de la concentration d'électrolyte élevée [Mitchell et al., 1976].

Les molécules d'eau non seulement cherchent à diffuser la couche cationique adsorbé mais aussi elles sont, en fait, attirées par les cations et à la surface de l'argile en raison de leur structure dipolaire unique. Dans la figure 3.5, les molécules d'eau sont représentées comme

1. La surface spécifique est estimée par la fraction entre la surface totale et la masse.

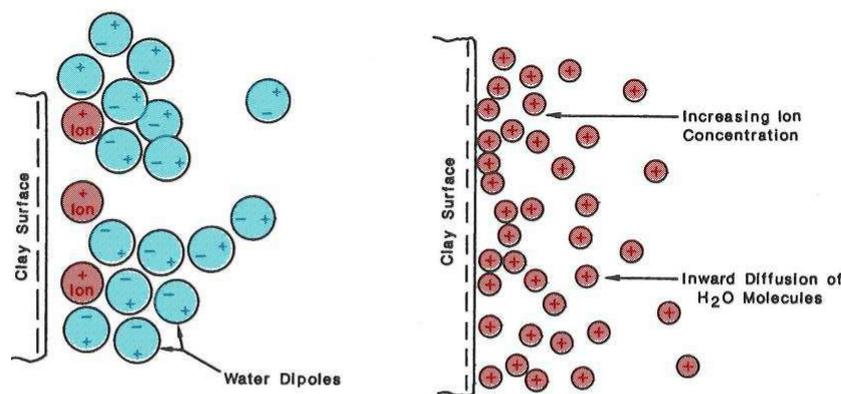


FIGURE 3.5 – Diffusion des cations et molécules d'eau par la surface argileuse, [Mitchell et al., 1976]

des molécules distinctes extrémités positives et négatives en raison de l'arrangement moléculaire de l'hydrogène et des atomes d'oxygène. Certains chercheurs pensent qu'une couche de molécules d'eau est fixée à la surface d'argile par une liaison hydrogène et que les couches suivantes sont plus lâches, parce qu'elles sont formées par des ions qui se déplacent dans le milieu d'eau sous l'influence de l'attraction électrique et des activités thermiques des cations Little [1995]. En tout cas, le résultat est une double couche diffuse entourant l'argile comprend (a) l'eau retenue par la liaison hydrogène et par l'adsorption polaire et par des forces de Van der Waals ; (b) une couche diffusée de cations, qui est attirée par la surface d'argile négativement chargée et les anions qui sont attirés par le cation et les molécules d'eau dipolaires.

Le résultat d'une surface hautement chargée, comme le cas des argiles smectiques, associées aux cations, qui ont la charge  $+1$  par ion et sont thermiquement actives, est une couche d'eau très diffusée qui entoure les particules d'argile. En raison de cette couche, des smectites augmentent leur poids si elles sont totalement adsorbées de l'eau (sept fois leur poids sec). Lorsque ces couches d'eau diffusées sont complètement hydratées, elles forcent les plaquettes d'argile dans un arrangement parallèle qui offre une résistance au cisaillement très peu.

L'épaisseur de la couche d'eau diffusée est très dépendante de la nature et la concentration de cations présents dans l'eau interstitielle. Les cations divalents (cations avec une charge  $+2$ ) peuvent s'équilibrer plus efficacement au potentiel de charge négative que les cations monovalents (cations avec une charge  $+1$ ). Ainsi, la résultante diffusée de la couche "eau - cations divalents" autour des particules d'argile est beaucoup plus petite que la couche diffusée "cations monovalents - eau" autour des particules d'argile avec la minéralogie identique.

### 3.2 Interaction chaux - argile dans le milieu alcalin

Lorsque la chaux est ajoutée dans le sol, les deux phénomènes se produisent : 1) amélioration rapide des propriétés liées à la teneur en eau du sol comme compactage, plasticité, pression de gonflement et 2) augmentation de la résistance du mélange, même si 10 ans après le traitement [Kavak and Baykal, 2012]. La littérature propose quatre mécanismes qui sont responsable de ces transformations.

1. Échange cationique : remplacement des ions échangeables métalliques sur la surface de la particule d'argile par des ions calcium fournis par la chaux.

2. Floculation et agglomération des particules d'argile.
3. Carbonnatation.
4. Réaction pouzzolanique : Réaction entre la chaux et silicate et aluminates produisant des produits cimentaires.

### 3.2.1 Échange cationique

Lorsque la chaux est ajoutée à un système sol-eau, sous la forme de  $\text{CaO}$ , une réaction fortement exothermique d'hydratation se forme  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et libère environ  $17.10^9 \text{J}$  de l'énergie thermique par kg de  $\text{CaO}$  ajouté. Cependant, la chose la plus importante est que la réaction d'hydratation résulte d'un milieu de fortes concentrations de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$  dans l'eau interstitielle du sol. Cette dissociation des ions génère une séquence de réactions qui varie en fonction de la composition du sol, la minéralogie et la chimie de l'eau interstitielle. L'échange cationique semble commencer immédiatement après le mélange. En effet, les cations de calcium dissous sont instantanément absorbés et intercalés dans l'espace inter-foliaire de l'argile (structure TOT) et remplacent les différents cations inter-foliaires existant [Hilt and Davidson, 1960; Eades and Grim, 1960; Choquette et al., 1987]. Cet échange cationique se produit parce que les cations de calcium divalents peuvent normalement remplacer les cations de valence unique, et des ions dans une concentration élevée remplacera ceux qui sont en concentration plus faible. Le fait que le calcium remplacera la plupart des cations disponibles dans le système d'eau est documenté par la série lyotrope qui stipule généralement que les cations de valence plus élevée remplacent ceux de plus faible valence, et que les grands cations remplacent les cations plus petits de la même valence [Little, 1995]. La série lyotrope s'écrit :

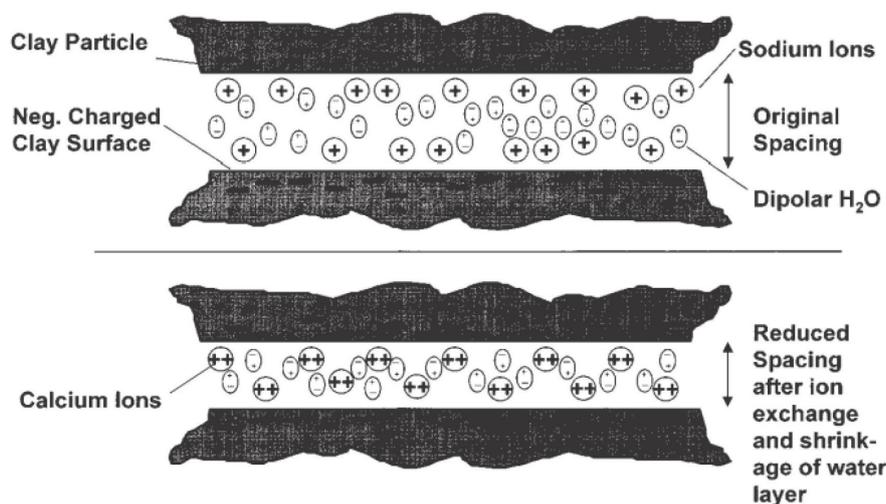
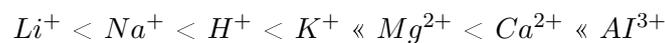


FIGURE 3.6 – Schématisation de l'échange cationique dans l'argile, [Prusinski and Bhattacharja, 1999]

Donc, les particules d'argile sont entourées par une double couche diffuse qui est modifiée par l'échange d'ions du calcium. Ceci modifie la densité de la charge électrique dans les particules d'argile qui conduisent à les attirer plus proche les uns aux autres pour former des floes, le processus est appelé floculation qui est illustré sur la figure 3.6. D'autre part, le résultat de l'échange cationique est également la cause des changements dans la plasticité du sol traité

à la chaux qui diminue normalement l'indice de plasticité. En résumé, c'est ce processus qui est principalement responsable de la modification des propriétés mécaniques des sols argileux lorsqu'ils sont traités à la chaux [Sherwood, 1993].

### 3.2.2 Flocculation et agglomération

La flocculation et l'agglomération sont la conséquence de l'échange cationique. Ce processus change la texture de l'argile à partir de celui d'une matière plastique et grains fins à celle d'un sol granulaire. Flocculation altère leur structure à partir d'une structure horizontale, parallèle à une orientation plus aléatoire bord-à-face. Flocculation a été attribuée à la forte teneur en électrolyte, au pH élevé et à la réduction de l'épaisseur à double couche à travers l'échange de cations [Diamond et al., 1963; Hilt and Davidson, 1960; Eades and Grim, 1960; Boardman et al., 2001].

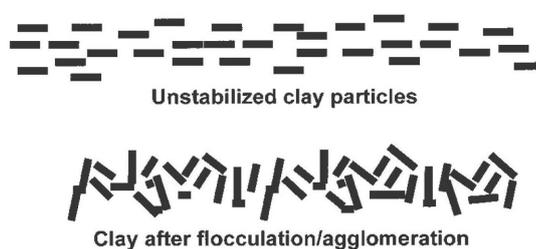


FIGURE 3.7 – Flocculation et agglomération du sol traité à la chaux, [Prusinski and Bhattacharja, 1999]

L'agglomération est supposée à se produire que des particules d'argile flocculées commencent à former des liaisons faibles au niveau des interfaces bord - surface des particules d'argile à cause du dépôt de matériaux à base de ciment au niveau des interfaces des particules d'argile (figure 3.7). L'agglomération commence la formation de plus gros agrégats à partir des particules d'argile finement divisées, et améliore encore la texture du sol argileux. La taille réduite de la double couche diffuse en raison de l'échange de cations, ainsi que l'augmentation de la friction interne des particules d'argile due à la flocculation et l'agglomération, ce qui entraînent la réduction de la plasticité du sol, l'augmentation de la résistance au cisaillement, et l'amélioration de la texture. [Diamond et al., 1963; Mitchell et al., 1976; Bell, 1996; Prusinski and Bhattacharja, 1999].

### 3.2.3 Réaction pouzzolanique

Une fois que l'affinité de sol est satisfaite par les cations  $Ca^{2+}$ , une autre réaction, appelée réaction pouzzolanique, se déclenche entre la chaux et les couches tétraédrique et octaédrique des feuillets argileux et le calcium, en particulier sur les bords des particules d'argile. Notons que les cations de calcium fixés dans l'espace interfoliaire de la fraction argileuse ne participent pas à la réaction pouzzolanique [Hilt and Davidson, 1960; Bell, 1996].

L'environnement basique à pH élevé augmente la solubilité et la réactivité de la silice et de l'alumine présents dans des particules d'argile. Il est postulé que les ions calcium se combinaient avec de la silice et de l'alumine dissoutes dans le réseau d'argile pour former un matériau à base de ciment supplémentaire (CSH et CAH) qui est observé par plusieurs auteurs [Hilt and Davidson, 1960; Diamond et al., 1963; Arabi and Wild, 1986; Choquette et al., 1987; Little, 1995; Bell, 1996; Rao and Rajasekaran, 1996; Kavak and Akyarlı, 2007;

Al-Mukhtar et al., 2010a]. Bien que ce soit un processus "through solution", des autres ont affirmé une réaction directe de l'hydroxyde de calcium avec des surfaces d'argile adjacentes, avec les produits de pouzzolane formés comme des précipités. Cela contribue à expliquer le processus d'agglomération.

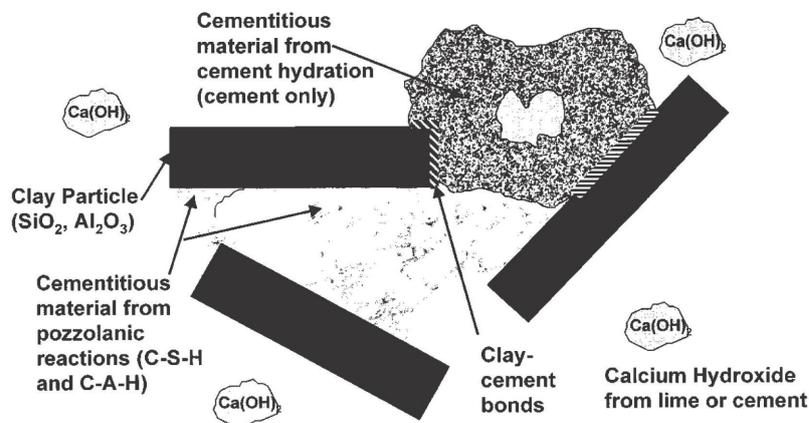


FIGURE 3.8 – Réaction pouzzolanique, [Prusinski and Bhattacharja, 1999]

Le mode d'attaque est postulé pour comprendre de la dissolution sur les bords des particules de silice en raison du pH élevé (12,4) maintenu par l'hydroxyde de calcium, suivi par la précipitation des produits de la réaction - deux hydratés [Diamond et al., 1963]. Ces hydratés tapissent la surface des particules du sol et en cristallisant, agissent comme des liens entre les particules du sol. Cette réaction consomme donc les argiles et aboutit à la formation de nouveaux minéraux aux propriétés liantes. Ces produits de réaction donc contribuent à la floculation en liant des particules adjacentes du sol. Une telle réaction pouzzolanique dépend du temps et se déroule lentement, au fil des mois et des années. Pour maximiser la réactivité, la quantité de chaux dans le système doit être capable de maintenir un environnement de pH vers 12,4 pendant une longue période de temps. Parce que la solubilité des ions de silice et d'alumine est très élevée à cette valeur.

### 3.2.4 Carbonatation

La carbonatation (formation de la calcite) de la chaux est une conséquence de la réaction produite entre la chaux et le  $CO_2$  de l'air par l'équation chimique (3.1). Cette réaction pourrait se produire pendant la maturation des sols traités.



Cependant, elle n'est pas recherchée lors du traitement des sols. Dans le cas du développement de cette réaction, les cristaux de calcite ainsi formés ont une propriété liante très médiocre et perturbent la stabilisation des sols car leur développement inhibe la réaction pouzzolanique [Cabane, 2004]. Ainsi, cette réaction provoque une réduction de la résistance finale à cause de la consommation d'une partie de la chaux disponible pour la réaction pouzzolanique. Bien que la calcite formée peut renforcer légèrement le sol pendant la première période, cette réaction ne peut pas être considérée comme une amélioration à long terme. On peut observer visuellement la carbonatation par la présence d'une couche blanche couverte des éprouvettes comme sur la figure 3.9. On a trouvé que la carbonatation était bien observée aux pourcentages plus élevés de la chaux parce qu'ils donnent une quantité de la chaux libre plus grande pour la réaction

de carbonatation.

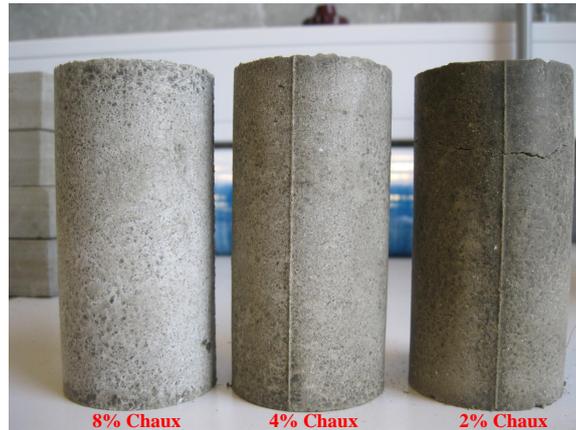


FIGURE 3.9 – Carbonatation observée sur des éprouvettes aux différents pourcentages de la chaux

### 3.3 Paramètres de technique

L'efficacité du traitement des sols à la chaux est difficile à prévoir. Le gain en résistance du sol traité, par exemple résistance de cisaillement, est normalement un critère important visant à évaluer l'efficacité de la stabilisation des sols. Le gain en résistance au cisaillement, à moment donné, sera une fonction de beaucoup de variable [Locat et al., 1990] :

$$S_u = f(S_{u_0}, A, A_w, W_0, c, t_a, t) \quad (3.2)$$

D'où :

- $S_{u_0}$  est la résistance au cisaillement non-drainé immédiatement après le compactage ;
- $A$  est le paramètre minéralogique, la taille de grains, la surface spécifique, et la capacité d'échange cationique ;
- $A_w$  est le paramètre relatif à la chimie initiale de l'eau interstitielle ;
- $W_0(\%)$  est la teneur en eau dans le moule de compactage ;
- $c(\%)$  est la concentration additive ;
- $t_a$  et  $t$  (jours) sont respectivement le temps de maturation et de cure. Le temps de maturation est le temps entre le mélange et le compactage ;

On analysera l'influence des paramètres dans l'équation 3.2 ci-dessus sur le comportement du sol traité à la chaux.

#### 3.3.1 Influence de la température

La température de maturation est un des facteurs fortement contrôlant la réaction pouzzolanique. Généralement, la réaction pouzzolanique a une cinétique lente qui s'accélère avec l'augmentation et est ralentie si la température diminue.

Al-Mukhtar et al. [2010*a,b*] ont travaillé sur un sol gonflant intitulé Impersol traité à la chaux à  $20^\circ C$  et  $50^\circ C$ . Il a rapporté que une forte augmentation de la résistance en compression simple était obtenue par traitement à la chaux principalement due aux réactions pouzzolaniques. Une augmentation de la température de  $20^\circ C$  à  $50^\circ C$  multiplie la vitesse de

la réaction pouzzolanique par six, ce qui conduit au gain important de résistance de compression simple à  $50^{\circ}\text{C}$  en comparaison avec le cas à  $20^{\circ}\text{C}$ .

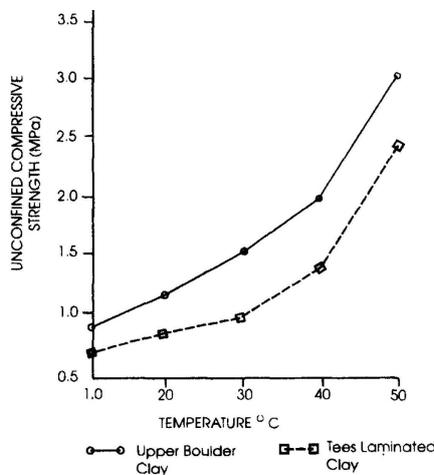


FIGURE 3.10 – Influence de la température sur le développement de la résistance à la compression simple à 7 jours de cure, [Bell, 1996]

Diamond et al. [1963] a montré que calcium hydraté -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pouvait encore réagir au quart et d'autres silicates (kaolinite, monmorilonit, illite, quartz...) à la température relativement faible. En fait, si la température tombe au-dessous d'environ  $4^{\circ}\text{C}$ , les réactions pouzzolaniques sont retardées et peuvent cesser à des températures plus basses Bell [1996].

Boardman et al. [2001] a présenté que l'on n'avait aucune réaction pouzzolanique dans sept premiers jours après le mélange chaux-sol à  $11,5^{\circ}\text{C}$ . En s'accordant avec cette opinion, Rao and Shivananda [2005] ont fait preuve du rôle positif de la température dans le processus de réaction pouzzolanique en indiquant que l'activité pouzzolanique commence après un jour de cure à  $25^{\circ}\text{C}$ .

### 3.3.2 Influence de la composition minéralogique de sols

L'argile est le composant le plus actif dans le sol. Donc, la faible teneur de certains minéraux d'argile peut exercer une influence importante sur les propriétés physiques du sol. En outre, le taux de cristallinité<sup>2</sup> est également important, les minéraux argileux ayant la cristallinité mal ordonnée ont des différentes propriétés que ceux ayant la cristallinité bien ordonnée. Ces différences conduisent aux différences dans les comportements des différents types de minéraux argileux ainsi que ceux de sols traités à la chaux.

Les sols argileux ont une large gamme de composition minéralogique. Ils peuvent consister des proportions diverses de différents types de minéraux argileux, en particulier la kaolinite, l'illite, la chlorite et la montmorillonite, les minéraux non argileux, comme le quartz, et/ou la matière organique et la matière colloïdale.

Il existe beaucoup de recherches, typiquement comme Diamond et al. [1963]; Bell [1996], qui ont montré que tous les types d'argile réagissaient à la chaux. Cependant, on n'a pas obtenu les mêmes propriétés de diverses groupes de minéraux argileux traités à la chaux, ce qui s'est partiellement expliqué par les différents niveaux d'activité (disponibilité des aluminates et

2. Cristallinité est mesurée par le pourcentage entre le volume de matériaux cristallins et le matériau total

silicates) sur la surface de la particule d'argile. Cela s'est manifesté par la capacité d'échange des cations. Les minéraux argileux gonflants, par exemple montmorillonite, présentent une capacité d'échange cationique élevée, tandis que les minéraux argileux non-gonflants comme kaolinite ont la capacité d'échange cationique relativement basse. En étudiant sur trois types les plus populaires dans les sols argileux étant kaolinite, montmorillonite et grains fins de quartz traités aux différents pourcentages de la chaux, [Bell, 1996] a rapporté des résultats très intéressants qui sont présentés sur les figures 3.11, 3.12.

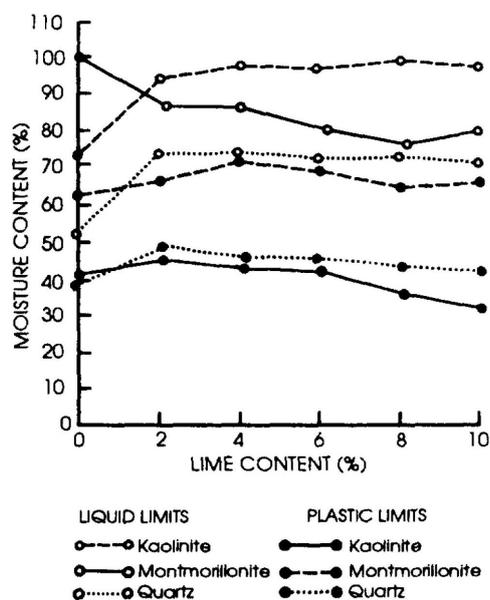


FIGURE 3.11 – Limites de plasticité et de liquidité de kaolinite, montmorillonite et quartz fin, [Bell, 1996]

À la figure 3.11, on observe l'augmentation la plus importante des limites de plasticité de la montmorillonite, tandis que les limites de plasticité de kaolinite ont tendance de diminuer et celles de quartz ne changent significativement. Les limites de liquidité de kaolinite et de quartz ont augmenté avec l'addition de la chaux. Alors que celles de montmorillonite étaient diminuées. Par conséquent, l'indice de plasticité de montmorillonite réduit, cependant ceux de kaolinite et de quartz augmentent. Ce résultat est aussi d'accord avec Rogers and Glendinning [2000] qui ont dit que l'argile présentait la réduction de plasticité, causée par une augmentation considérable de la limite de plasticité de l'argile. Ceci est souvent associé à une réduction significative de l'indice de plasticité, bien que dans certains cas (par exemple kaolinite) la limite de liquidité augmente significativement. Ce phénomène inhabituel (augmentation de l'indice de plasticité) été clairement expliqué par Dash and Hussain [2011]. Ils ont supposé que la formation d'hydrates de gel de silicate de calcium (CSH gel) - une des trois phases de la formation de silicate de calcium hydraté (CSH gel, CSH1, CSH2) [Diamond et al., 1963] avait lieu, ce qui se compose des produits solides et de l'eau d'hydratation tenue physiquement ou adsorbé sur la surface des hydrates. Cette eau, appelée eau gel, est située entre les produits solides d'hydratation dans les pores du gel de très petite taille (environ  $2\mu m$ ). Le volume d'eau du gel a été établi pour être aussi élevé que 28% du volume de gel. Ce volume est la cause de l'augmentation IP dans quelques types de sol traité à la chaux. Ainsi, sous traitement à la chaux, les sols à forte teneur en silice sont susceptibles d'augmenter dans la limite de liquidité.

Grâce aux résultats présentés sur la figure 3.12, Bell a indiqué que les résistances atteintes par la montmorillonite sont plus faibles que celles atteintes par la kaolinite. Les plus fortes

résistances à la compression sont atteintes pour le quartz traité à la chaux. Molard et al. [1987] arrivent aux mêmes conclusions que Bell : les sols traités au liant hydraulique contenant de la kaolinite et de l'illite présentent des caractéristiques mécaniques plus fortes que les sols contenant une grande part d'argile expansive, de type montmorillonite.

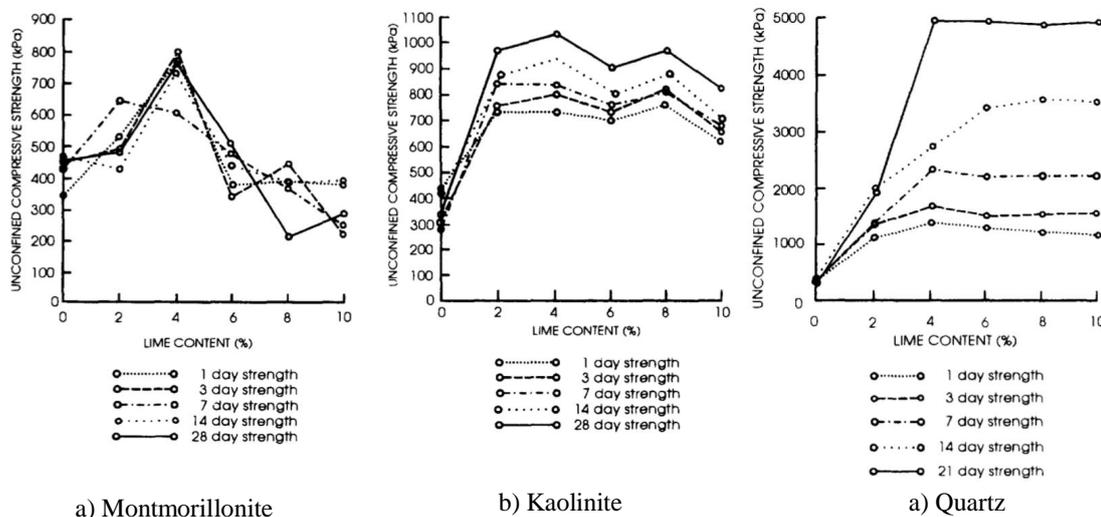


FIGURE 3.12 – Variation de la résistance en compression simple des trois minéraux, [Bell, 1996]

### 3.3.3 Influence de la chaux mise en œuvre

La résistance développée après le traitement est évidemment influencée par la quantité de gel à base des produits cimentaires (CSH, CAH, CASH) et par conséquent, la quantité de chaux consommée.

Lorsque la chaux est ajoutée à un sol, il doit d'abord satisfaire à l'affinité du sol à la chaux. En d'autres termes, des ions sont adsorbés par les minéraux argileux et ne sont pas disponibles pour les réactions pouzzolaniques jusqu'à ce que cette affinité est satisfaite. Puisque cette chaux est fixée dans le sol et n'est pas disponible pour d'autres réactions, le processus est appelé le point de fixation de chaux. Les ajouts de chaux égaux au point de fixation de la chaux contribuent généralement à l'amélioration de l'ouvrabilité du sol, mais ils ne peuvent pas donner lieu à une résistance suffisante (d'après [Hilt and Davidson, 1960]). D'où la quantité de chaux nécessaire dépassant au point de fixation de la chaux est liée à la proportion de minéraux argileux présents dans un sol et est indépendante de la teneur en carbonate, ce qui est liée à la capacité d'échange cationique d'un sol [Bell, 1996]. L'addition de plus de chaux génère aucune amélioration de la maniabilité, mais contribue principalement à une augmentation de la résistance à long terme à travers l'action de cimentation de la réaction pouzzolanique.

Bell [1996] a indiqué que l'addition optimale de chaux nécessaire pour la modification maximale du sol était généralement comprise entre 1 et 3% de la chaux vive, Basma and Tuncer [1991] ont également proposé de 2 - 8% de la chaux hydratée. Au-delà de ce point, la chaux est disponible pour augmenter la résistance du sol.

Pour une réactivité maximale, la valeur du pH des fluides de pores doit rester à environ 12,4. La solubilité des ions de silicium et d'aluminium est très élevée à cette valeur (figure 3.13). Des silicates de calcium est continument formés, tant que les conditions fortement

alcalines persistent. De plus, des petites quantités de phases de calcium d'aluminium hydraté ( $C_4AH_{13}$  et  $C_3AH_6$ ) et de phases de calcium de silicate aluminat hydraté ( $C_2ASH_8$ ) peuvent se développer, spécialement lorsque la kaolinite est traitée à la chaux.

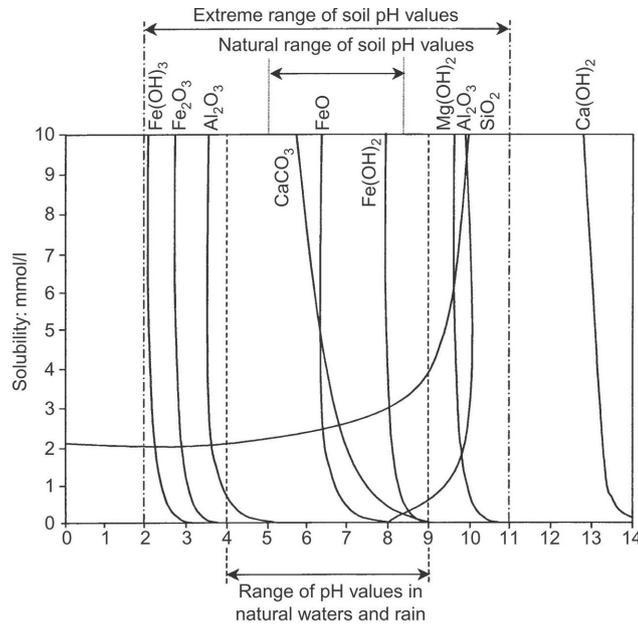


FIGURE 3.13 – Solubilité des minéraux du sol en fonction de pH, [Boardman et al., 2001]

La question posé est qu'est-ce que la résistance du sol traité augmente continument en fonction de la quantité de la chaux ajoutée ? La réponse est non, parce que si l'on a beaucoup de chaux dans le sol, une seule partie est consommée pour la modification et pour la réaction pouzzolanique. La chaux libre réduit la résistance du sol. Parce que la chaux elle-même n'a ni frottement ni cohésion appréciable. Cette conclusion est bien montrée par Bell [1996]; Dash and Hussain [2011].

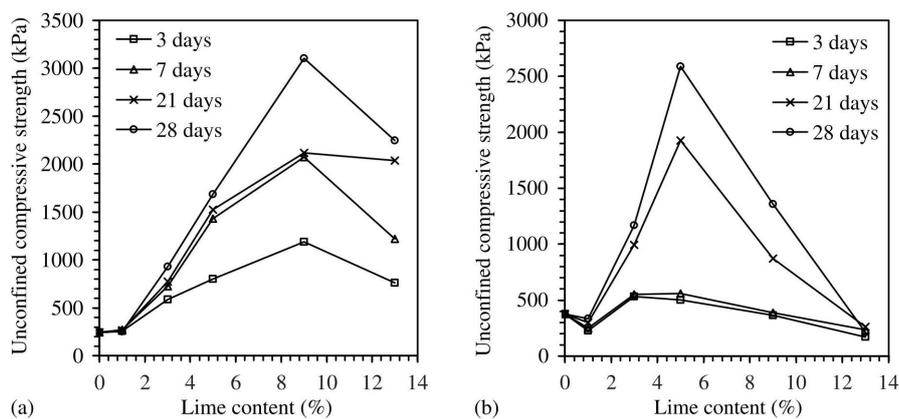


FIGURE 3.14 – Essai de compression simple; a)expansive soil; b)residual soil; [Dash and Hussain, 2011]

### 3.3.4 Influence de l'humidité

L'eau dans le sol libère des cations  $Ca^{2+}$  et anions  $OH^-$  par la dissolution de la chaux ajoutée. Après l'échange cationique, ces ions réagissent avec l'alumine et avec la silice qui sont dissoutes dans le milieu basique pour former des nouveaux minéraux de cimentation (CSH et CAH) liant des particules d'argile. Cette attaque chimique se propage de la périphérie (bords des particules) vers le cœur [Diamond et al., 1963]. Donc, le processus de réaction pouzzolanique est lié fortement à la diffusion et dispersion occasionnées des cations de calcium par la présence de l'eau interstitielle.

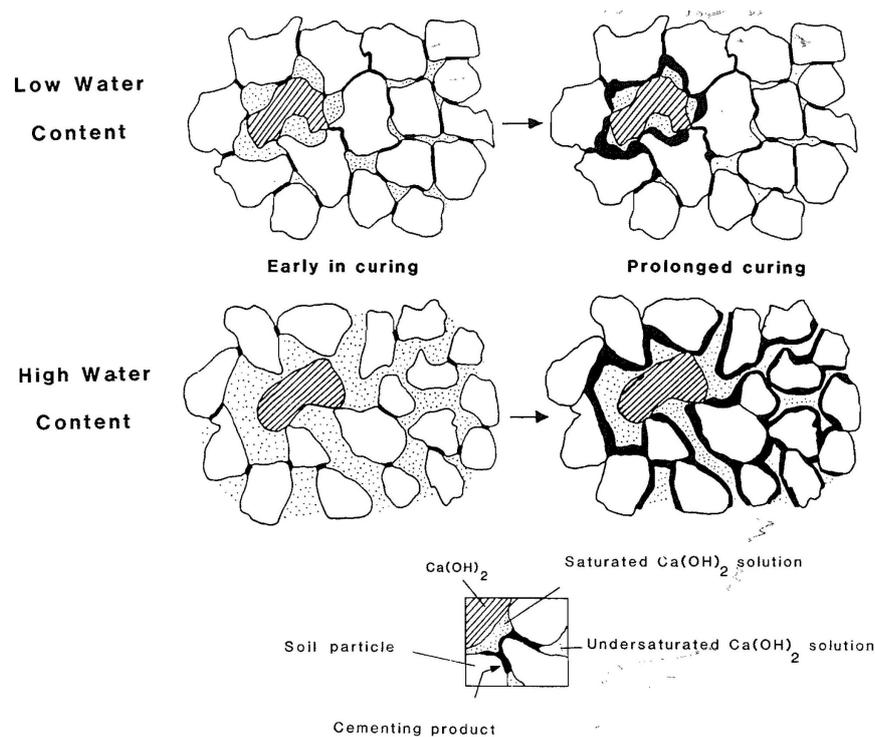


FIGURE 3.15 – Modèle conceptuel physique proposé pour traitement des sols à la chaux, [Locat et al., 1990]

Locat et al. [1990] ont proposé un modèle conceptuel physique pour signifier que l'importance de la teneur en eau favorise la formation des produits de cimentation au sein d'une zone plus ou moins étendue autour des grains d'argile (figure 3.15). Il a expliqué que la teneur en eau forte augmentait le volume de mélange et diminue le nombre de particules de la chaux par unité volumique. De plus, la distance entre des particules d'argile est plus grande, ce qui exige plus de produits cimentaires au cours du développement de la résistance. C'est la raison pour laquelle on a observé l'augmentation lente de la résistance du sol avec teneur en eau élevée [Locat et al., 1990; Tang et al., 2011].

En pratique, la teneur en eau n'a aucune influence sur la résistance maximale à la fin du temps de cure, lorsque toutes les réactions sont complètes. À partir de ces résultats et le modèle à la figure 3.15, Locat et al. [1990] ont encore proposé un modèle conceptuel mécanique (figure 3.16) du développement de la résistance au cisaillement pour la teneur en eau forte (HWC) et la teneur en eau faible (LWC). Ils ont indiqué que le développement de la résistance du sol traité à la teneur en eau forte était plus lent que celui du sol traité à la teneur en eau faible. Cependant, si on ajoute assez de chaux et que le temps nécessaire pour que la réaction pouzzolanique soit complète, on obtiendrait la même résistance dans tous les deux cas. La

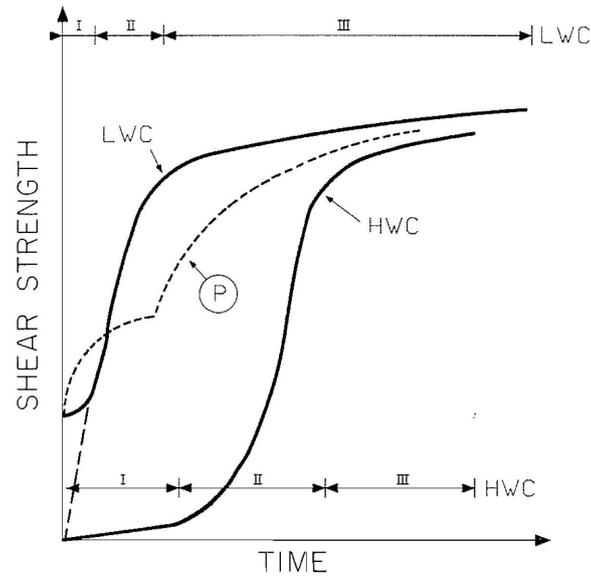


FIGURE 3.16 – Modèle conceptuel mécanique du développement de la résistance au cisaillement avec le temps, [Locat et al., 1990]

justesse de ce modèle a été correctement vérifiée par Tang et al. [2011] sur une étude du développement de la résistance au cisaillement d'une argile traitée à 3% de chaux avec 14% et 18% de teneur en eau par "Bender element test" (figure 3.17).

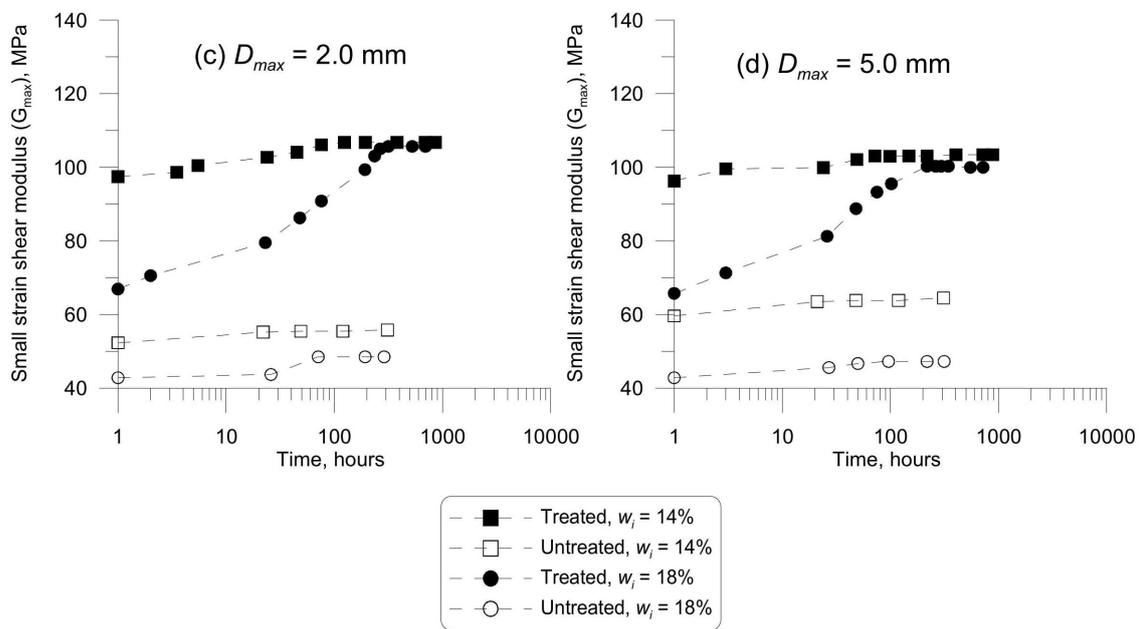


FIGURE 3.17 – Développement de la résistance du sol traité à la chaux aux différents teneurs en eau, [Tang et al., 2011]

### 3.3.5 Influence de l'énergie et retard de compactage

Pour les matériaux immédiatement compactés après le mélange, le changement dans les caractéristiques de compactage est principalement du à la modification de la granulométrie

du sol. Lorsque le compactage est retardé, les produits d'hydratation commencent à relier des particules dans un état lâche et l'interruption de ces agglomérations est nécessaire pour densifier le sol qui ne pourrait pas retrouver sa pleine résistance. Par conséquent, une partie de l'énergie de compactage est utilisée pour briser des cimentations. Donc, des densités maximales sont réduites aux retards de compactage accrus.

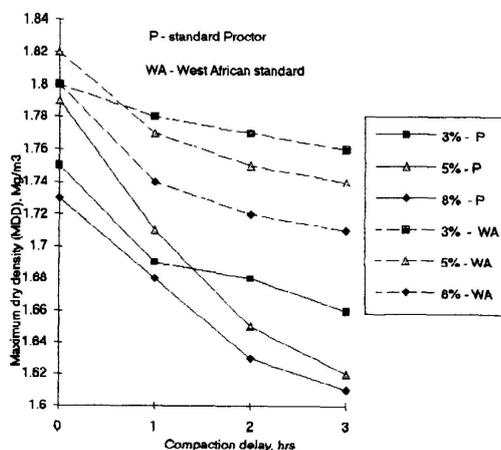


FIGURE 3.18 – Variation de la densité maximale sèche du sol traité à la chaux avec le retard de compactage, [Osinubi, 1998a]

Cette explication contribue à montrer l'influence importante des énergies de compactage et des retards de compactage sur la teneur en eau optimale (TEO) du mélange chaux-sol. Osinubi [1998a] a observé que la TEO a diminué avec une augmentation des retards de compactage et que les pertes augmentaient avec des teneurs plus élevées de chaux. La diminution de TEO avec une augmentation des retards de compactage est due à l'échange de cations et réactions d'agrégation qui se déroulent simultanément, utilisant ainsi l'eau disponible dans le système.

Les résultats montrent que les retards de compactage affectent le sol traité à la chaux en réduisant sa résistance potentielle maximale. Cette réduction implique donc que les composés à base de ciment formés avant le compactage ont été brisés à la densité du mélange sol-chaux qui n'a pas repris la résistance pleine initiale. De plus, la réduction de la densité a également entraîné une diminution du nombre de points de contact des produits d'hydratation de la chaux du système qui se lie aux particules.

### 3.3.6 Influence de la taille des grains

Tang et al. [2011] a étudié l'influence de la taille des grains sur le traitement à la chaux. Il a utilisé quatre tailles maximales des grains du sol ( $D_{max} = 0.4, 1.0, 2.0$  et  $5.0$  mm) avec deux teneurs en eau ( $W_i = 14$  et  $18\%$ ) traité à  $3\%$  de la chaux. Il a rapporté que le module de cisaillement à petite déformation ( $G_{max}$ ) diminuait avec l'augmentation de  $D_{max}$ . Tandis que la variation de  $G_{max}$  en fonction de  $D_{max}$  est négligeable pour le sol non-traité (figure 3.19).

On observe également une basse efficacité de la chaux sur les grains grossiers du sol qui peut être attribués à la rareté de pouzzolane (matériau siliceux et aluminacé) dans le sol grossier qui est nécessaire pour la réaction pouzzolanique. C'est la raison pour laquelle Dallas [2000] et Thagesen [1996] conseillent d'un sol ayant une teneur minimale en argile ( $D < 0,002$

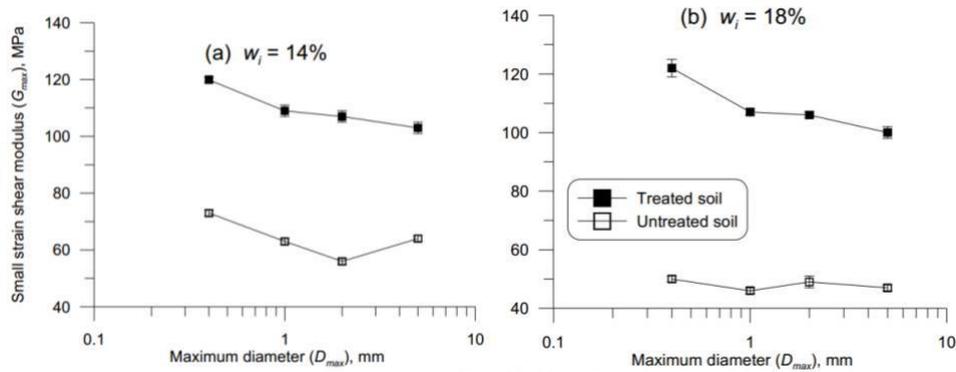


FIGURE 3.19 – Module de cisailment maximale ( $G_{max}$ ) contre la taille maximale ( $D_{max}$ ), [Tang et al., 2011]

mm) de 10% et un indice de plasticité de 10 pour la stabilisation à la chaux.

### 3.4 Perturbations

Dans le sol, on a certaines substances qui sont susceptibles de réagir avec la chaux et le sol, et peuvent donc venir affecter le traitement. C'est le cas des substances chimiques naturelles telles que les matières organiques, les composés soufrés (gypse, pyrite), ou bien encore les composés chlorés (NaCl). C'est le cas également des substances chimiques introduites dans les sols par l'activité anthropique, comme les engrais (nitrates, phosphates, soufre).

Dans cette étude, on va étudier, dans la littérature, l'influence sur le traitement de deux éléments perturbateurs typiques : matière organique et sulfates. Pour des autres comme nitrates, phosphates, chlorates, il existe très rares de références sur l'influences sur traitement à la chaux, à la connaissance de l'auteur. Quelques références existant comme Cabane [2004]; Le Borgne [2010]; Cuisinier et al. [2011]; Saussaye [2012] qui ont seulement donné des évaluations quantitatives, sans aucune interprétation claire sur leur interaction physico-chimique dans le sol traité et concentre sur leurs influences sur le traitement au ciment.

#### 3.4.1 Influence de la matière organique

Dans de nombreux travaux de stabilisation, le matériau à traiter contient des matières organiques qui peuvent être présentés sous différentes formes, telles que les matériaux de dragage. Ces derniers peuvent contenir divers composés organiques, l'acide humique, des fibres végétales ou des huiles lourdes. La matière organique dans les sols peut être divisée en deux catégories : non humique et humiques [Tremblay et al., 2002]. La partie non humique comprend végétale, animale, ou des restes de micro-organismes, notamment la cellulose, l'hémicellulose, le saccharose, l'amidon, les protéines, les acides aminés, les graisses, les cires, les résines et les acides organiques. Grâce au processus des micro-organismes, ces composés sont transformés en polysaccharides et glucides. La partie humique est composé de l'altéré ou des transformés de la partie non humique. Cette catégorie comprend principalement les alcanes, acides gras, acides humiques, fulviques et humines. Un troisième groupe de la matière organique doit être ajouté, c'est des contaminants organiques. Ces derniers sont, la plupart du temps, anthropiques et comprennent une très grande variété de composés.

Lorsqu'un sol organique est traité à un liant hydraulique, la matière organique peut interférer avec le processus d'hydratation, parce que la matière organique a tendance à enrober

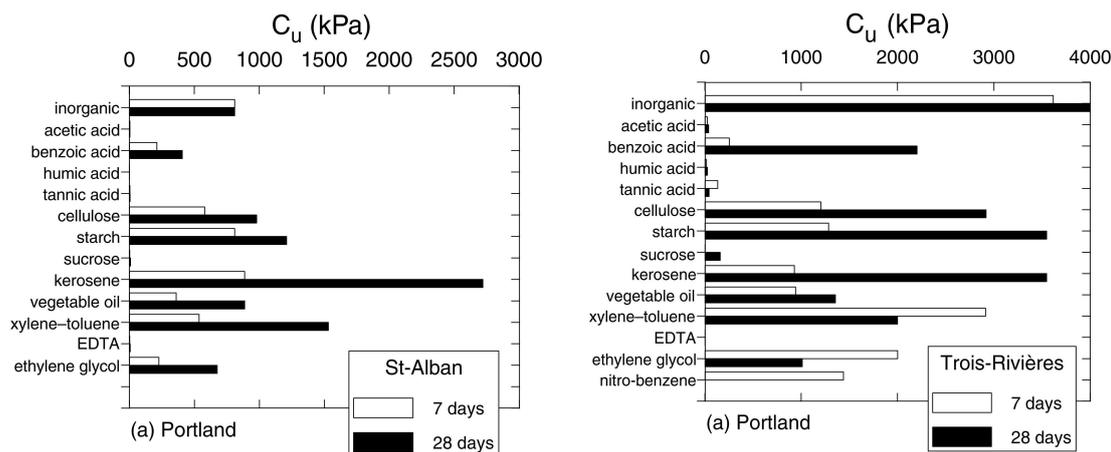


FIGURE 3.20 – Influence de diverses matières organiques sur deux sols traités au ciment, [Tremblay et al., 2002]

des grains d'additifs, retarder ou prévenir la réaction d'hydratation. Cela semble, cependant, que ce ne sont pas tous les composés organiques qui sont vraiment nocif pour le traitement au liant hydraulique [Tremblay et al., 2002]. Par une recherche expérimentale sur deux sols traité à la chaux et mélangés avec différents types de matière organique, Tremblay et al. [2002] a rapporté que l'acide humique, l'acide tannique empêchent fortement le processus d'hydratation, tandis que la cellulose, l'amidon n'ait aucune influence sur le traitement. Ils ont aussi indiqué que l'impact négatif de quelques matières organiques sur le traitement dépendait de la composition minéralogique du sol comme xylène - toluène, glycol éthylène.

Sur une étude d'analyse thermique Harvey et al. [2010] ont montré que la matière organique affectait considérablement l'efficacité du traitement comme une inhibition de la formation de calcium de silicate hydraté CSH qui est le produit principal de la réaction pouzzolanique augmentant la résistance du sol traité. Cela s'explique par deux mécanismes possibles suivants :

1. **Complexation des ions  $Ca^{2+}$**  : la présence de la matière organique dans le sol va augmenter sa capacité d'échange cationique. Par conséquent, plus de  $Ca^{2+}$  serait requise pour satisfaire à la capacité d'échange cationique du sol. Ceci réduit donc la quantité de  $Ca^{2+}$  disponible pour la formation CSH. La complexation de  $Ca^{2+}$  pourrait donc être attendu à affecter la phase de précipitation de formation CSH et pour expliquer la réduction du gain de résistance dans les sols stabilisés à la chaux.
2. **Tamponnage du pH** : des groupes d'acide dans la matière organique pourraient tamponner le pH, ce qui réduise la dissolution de silicates et limite la quantité de silice disponible pour la formation de CSH. C'est la raison pour laquelle la précipitation de CSH<sub>2</sub>, avec le rapport élevé de Ca :Si, est moins affecté par l'augmentation de la teneur en matière organique.
3. **Autres mécanismes** : (i) l'interaction directe des composants organiques dissous avec des argiles, ce qui réduit l'aire de surface disponible pour la dissolution et (ii) l'interaction entre la matière organique dissoute ou non dissoute et des espèces de silice dissoute inhibe ainsi la nucléation et la précipitation de phases de CSH.

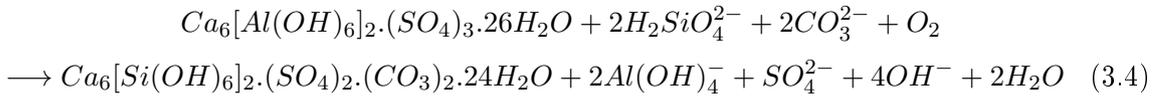
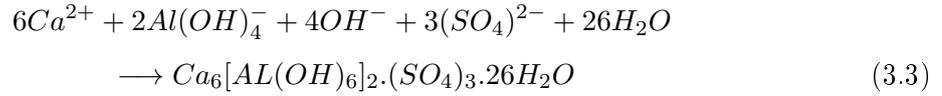
### 3.4.2 Influence des sulfates sur le traitement

Le succès de la chaux dans la stabilisation des argiles est d'améliorer une ou plusieurs propriétés d'un sol argileux, telles que la résistance, la durabilité et de réduire le potentiel

d'expansion. Cependant, la présence de sulfates dans les sols traités à la chaux provoque souvent des effets inverses.

Lorsque les sulfates sont présents dans le sol, ils participent également à la réaction et perturbent les réactions pouzzolaniques normales à long-term du processus de stabilisation. Au lieu de cela, minéraux comme l'ettringite  $Ca_6[AL(OH)_6]_2.(SO_4)_3.26H_2O$  et la thaumasite  $Ca_6[Si(OH)_6]_2.(SO_4)_2.(CO_3)_2.24H_2O + 2Al(OH)_4^- + SO_4^{2-}$  sont formés. Ces deux minéraux sont de nature expansible lors de l'absorption d'eau [Kota et al., 1996; Rajasekaran, 2005; Little et al., 2009].

Une réaction géochimique simplifiée rapportée par Hunter [1988] pour la formation des ces deux minéraux peut être résumée comme suivant :



À côté de l'augmentation du gonflement du sol traité à la chaux, le sulfate contribue à perturber le développement de la résistance à la compression simple. En fait, Gaily [2012] a étudié le comportement de différents types de sol à haut sulfate à Texas, USA et rapporté une réduction de la résistance à la compression simple après trois jours de cure par apport au cas des sols traités compressés immédiatement après le traitement (figure 3.21)

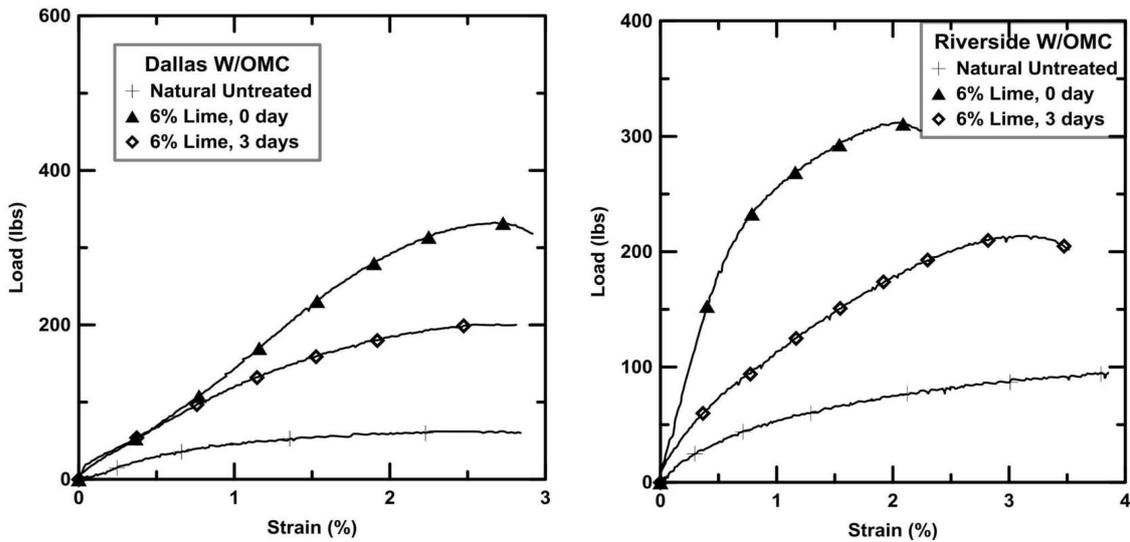


FIGURE 3.21 – Évolutions de la résistance à la compression simple des sols à hauts sulfates, [Gaily, 2012]

# Chapitre 4

## Étude expérimentale

### 4.1 Matériaux utilisés

#### 4.1.1 Sol

Le sol utilisé dans cette étude vient de la région de Soignies, Belgique. C'est visuellement une argile très humide. L'argile de Soignies est, tout d'abord, séchée à  $35^{\circ}C$  pendant une semaine. Ensuite, elle est broyée et tamisée au tamis de 2 mm. Ainsi, on obtient un sol argileux avec  $D_{max} = 2\text{mm}$  pour réaliser les essais [CRR, 2010]. La classification du sol est réalisée par l'analyse de tamisage, par la sédimentométrie et par les limites d'Atterberg. La composition minéralogique du sol et la quantité de matière organique sont aussi déterminées pour expliquer des phénomènes physiques et mécaniques observés au cours des essais. Les caractéristiques physiques du sol testé sont présentées au tableau 4.1 suivant :

TABLE 4.1 – Caractéristiques physiques de l'argile de Soignies

Caractéristiques	Valeur testée
Limite de liquidité (LL)	35,4 %
Limite de plasticité (LP)	16,8 %
Indice de plasticité (IP)	18,6 %
Matière organique	0,7 %
Fraction argileuse	16,9 %

#### 4.1.2 Chaux

On a utilisé la chaux vive qui est fourni par New Lime Development (NLD sprl). La composition chimique de la chaux est présentée dans le tableau 4.2.

### 4.2 Programme des essais au laboratoire

La procédure suivie pour notre étude expérimentale de traitement des sols à la chaux est essentiellement basée sur la proposition par [Dallas, 2000] et [Association, 2006] qui est composé de quatre étapes principales suivantes :

1. Évaluation du sol initial
  - Identification par analyse granulométrique et sédimentométrique
  - Limites d'Atterberg
2. Estimation de la consommation initiale de la chaux pour le traitement

TABLE 4.2 – Fiche technique de la chaux vive

Composants	Quantité
CaO	95,1 %
MgO	0,57%
SiO <sub>2</sub>	1,53%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,15%
S	0,03%
CO <sub>2</sub>	1,17%
PF	2,20%
Réactivité à l'eau t <sub>60</sub>	1,68 min

- Mesures de pH des sols traités par la méthode d'Eades & Grim
  - Limites d'Atterberg des sols traités
  - Consommation initiale de la chaux par titrage
3. Détermination de l'optimum Proctor et des valeurs CBR immédiat
  4. Détermination de l'évolution de la résistance des sols traités par essais de compression simple et essai triaxial.

#### 4.2.1 Analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie

Une donnée importante permettant la caractérisation d'un sol est la courbe granulométrique exprimant la distribution de la taille des grains qui constituent un sol. Dans le laboratoire, cette courbe est déterminée par essais de tamisage et de sédimentométrie.

L'analyse granulométrique par tamisage ( $D \geq 74\mu m$ ) consiste à séparer et classer à l'aide de tamis des grains selon leur diamètre par une colonne de tamis à dimensions de mailles décroissantes installée sur un système d'agitation mécanique. Les gammes granulométriques ainsi isolées sont pesées pour déterminer la proportion en masse de chacune dans le sol étudié.

L'analyse granulométrique par sédimentométrie est employée pour étudier la distribution des tailles de grains plus petits ( $\leq 74\mu m$ ), parce que des interactions moléculaires entre ces sédiments et le tamis empêchent l'utilisation de ce dernier.

L'essai de sédimentométrie est réalisé conformément à la norme **NF P94 - 057**. Le principe est basé sur la loi de Stokes (équation 4.1). Initialement, les particules du sol sont séparées les unes des autres par l'ajout de défloculant (Hexa-méta-phosphate de sodium). Après 24h de repos, on agite manuellement pour répartir aléatoirement des particules bien séparées (figure 4.1). Ensuite, on met la burette dans un bain thermostaté à 20°C. La mesure de la densité est effectuée par l'aréomètre (figure 4.2).

$$d = \sqrt{\frac{18 \cdot v \cdot \mu}{g \cdot (\rho_s - \rho_w)}} \quad (4.1)$$

Avec :  $v$  - vitesse de sédimentation ;  $\mu$  - viscosité du fluide ;  $\rho_s$  et  $\rho_w$  - densité du sédiment et densité du liquide.

Dans cette étude, on a employé les deux techniques pour déterminer la courbe granulométrique complète du sol naturel. L'essai de tamisage a été réalisé seul afin d'observer le phénomène de floculation du sol après traitement à la chaux.



FIGURE 4.1 – Agitation manuelle de la bûrette



FIGURE 4.2 – Mesure de la densité du sédiment par l'aréomètre dans un bain thermostaté

#### 4.2.2 Estimation de la consommation initiale de la chaux

L'ajout de chaux nécessaire à la modification maximale du sol a été désigné comme le point de fixation de la chaux ou de la consommation initiale de chaux [Hilt and Davidson, 1960; Eades and Grim, 1966]. Ce critère donne une indication de la quantité minimale de chaux qui doit être ajoutée pour atteindre un changement significatif dans les propriétés du sol, principalement en termes de plasticité et de compactage. Par conséquent, cette quantité répond à l'affinité du sol pour l'échange de calcium inter-lamellaire [Bell, 1996]. Le point de fixation de la chaux représente la quantité de chaux ajoutée pour atteindre une valeur de pH de 12,4 pour le mélange chaux-sol [Eades and Grim, 1966]. [Clare and Cruchley, 1957] ont également rapporté que la viscosité du coulis de chaux-sol et la taille des floccs sont maximum atteintes au niveau du point de rétention de la chaux.

Al-Mukhtar et al. [2010a] ont estimé la consommation initiale de la chaux par la réaction à court terme en utilisant différentes méthodes indépendantes : indice de plasticité, pH, absorption atomique et diffraction des rayons X pour la bentonite traitée à la chaux. En se basant sur la procédure de cette recherche, pour notre étude, on utilisera l'indice de plasticité, pH et l'essai de titrage pour estimer la teneur optimale de la chaux à court terme.

#### Limites d'Atterberg

Les essais de limites d'Atterberg ont été réalisés conformément à la norme **NF P94-051** pour le sol initial et les sols traités aux différents pourcentages de la chaux (2, 3, 4, 5, 6 et 8%). Notons qu'ils sont effectués sur la fraction inférieure à  $425\mu m$  du sol étudié et après une heure de réaction d'hydratation entre la chaux et l'argile humide. Tous les sols doivent être humidifiés pendant 24h avant de faire les essais.

La limite de liquidité (LL) est tout d'abord déterminée grâce à l'appareil de Casagrande (figure 4.3). Le sol humide est placé dans une coupelle et est séparé en 2 parties par une rainure. On referme la rainure par des chocs à la coupelle avec l'appareil de Casagrande. Nombre de coups nécessaires pour refermer la rainure sur une longueur de 1cm ainsi que la teneur en eau correspondante sont mesurées. On répète la manipulation 5 fois pour 5 teneurs en eau différentes choisies de manière à ce que le nombre de chocs pour refermer la rainure soit compris entre 15 et 35 coups. Enfin, la droite obtenue dans le repère  $w = f(\log N)$  est



FIGURE 4.3 – Dispositifs d'essai des limites d'Atterberg

tracée et LL correspond graphiquement à 25 chocs.

La limite de plasticité (LP) est aisément déterminée en roulant à la main 10 - 15g de pâte issue de l'essai servant au calcul de limite de liquidité jusqu'à observer des ruptures apparaissant sur le cylindre formé. La teneur en eau à cet instant correspond à LP.

#### Méthode d'Eades et Grim

La mesure du pH du sol naturel et des sols traités est réalisé conformément à la norme **ASTM D6276** dans le laboratoire des matériaux de construction (LMC) par pH meter (figure 4.4) sous la responsabilité de Madame Libioule Fabienne.



FIGURE 4.4 – Mesure de pH du sol par pH meter

Comme pour la détermination des limites d'Atterberg, les mesures de pH du sol sont également effectuées sur la fraction inférieure à  $425\mu\text{m}$ . Les solutions analysées sont composées de 25g du sol étudié, 100ml d'eau déminéralisée et respectivement 0%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6% et 8% de chaux. Une solution de 20g de la chaux et 100ml de l'eau déminéralisée est également préparée pour mesurer le pH de la chaux propre.

### Détermination de la chaux libre par titrage

L'essai de titrage est également réalisé au LMC afin de déterminer la quantité de chaux libre à différents instants après le mélange (1 jour, 7 jours, 28 jours) de 3 types d'échantillons du sol traité (2%, 4% et 8%). La quantité de la chaux consommée à la fin du temps de cure est déterminée à partir de la quantité d'acide ajoutée pour neutraliser la solution sol - chaux - eau (pH = 7). Pour ce faire, on doit déterminer précisément la quantité de chaux initiale (CaO) dans le mélange par la formule suivante :

$$m_1 = \frac{m_i}{1+w} \cdot \frac{x}{100+x} \cdot 95,2\% \quad (4.2)$$

Où :

- $m_1$  - masse de la chaux initiale présente dans 15g de mélange
- $w$  - teneur en eau
- $x$  - pourcentage de la chaux ajoutée
- 95,2 - pourcentage de CaO dans notre chaux

Il est également possible de calculer la quantité de chaux dans le sol en solution qui n'a pas réagit avec l'argile à la fin du temps de cure :

$$m_2 = \frac{v_{HCL}}{2} \cdot 56 \cdot 10^{-4} \quad (4.3)$$

Où :

- $m_2$  - masse de la chaux libre dans le mélange
- $v_{HCL}$  - volume en millilitres d'acide chlorhydrique de concentration 0,1mol/l ajouté pour obtenir une solution neutre (pH = 7)

Le facteur supplémentaire présent dans l'équation ci-dessus correspond à la masse molaire de la chaux vive (CaO). Le volume d'acide chlorhydrique est divisé par deux dans la formule 4.3 car il faut deux ions Cl pour neutraliser un ion  $Ca^{2+}$ .

### 4.2.3 Essai de diffraction des rayons X

#### Diffraction des rayons X - DRX

Les corps cristallins peuvent être considérés comme des assemblages de plans réticulaires plus ou moins denses. Les plans contiennent les atomes : certains plans contiennent bien plus d'atomes que d'autres en fonction de la formule chimique du minéral. Ces plans réticulaires sont séparés par des distances caractéristiques ( $d$ ) selon la nature du cristal ou du minéral considéré. Trois ou quatre distances réticulaires bien choisies permettent une reconstitution du réseau cristallin du minéral.

La diffraction des rayons X est une méthode adaptée à l'identification de la composition minéralogique des assemblages argileux. Elle consiste à appliquer un rayonnement d'une longueur d'onde du domaine des rayons X (entre 0,1 et 10 nm) sur un échantillon orienté ou non. L'analyse des phases cristallines est rendue possible grâce aux périodicités de l'arrangement atomique des cristaux. Ces périodicités sont dues à un empilement de plans identiques dans un cristal et sont décrites par des longueurs correspondant aux distances entre les plans d'empilement. Cette distance entre les plans réticulaires est nommée distance réticulaire (figure 4.5).

Ainsi, lorsque le rayonnement pénètre le cristal, une partie de l'énergie est absorbée entraînant l'excitation des atomes et l'émission de radiations par les plans atomiques. Le faisceau

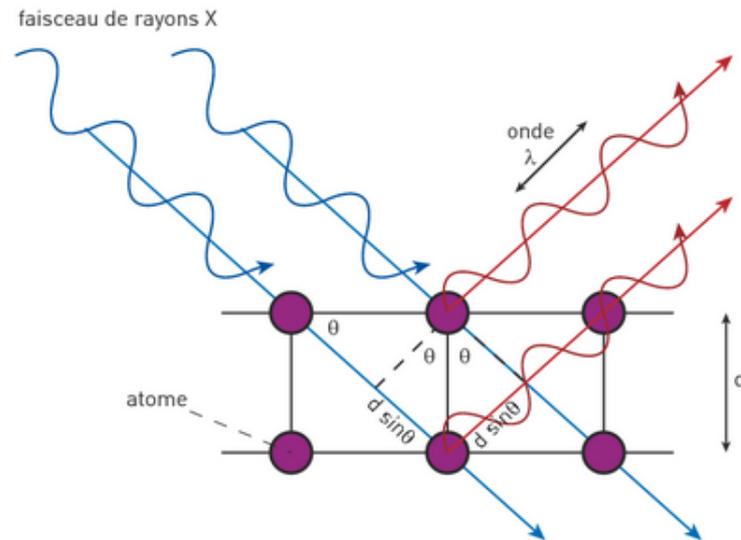


FIGURE 4.5 – Schéma de la diffraction des rayons X par une famille de plan réticulaire

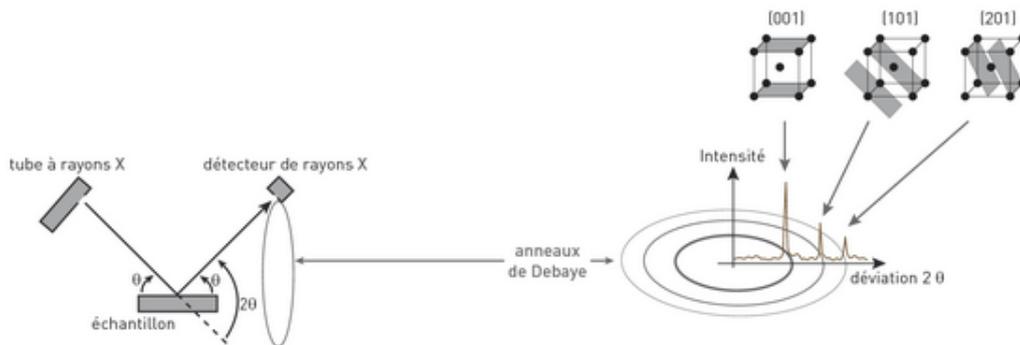


FIGURE 4.6 – L'intensité du signal observé dépend du type d'atomes qui constituent ces plans

diffraqué mesuré résulte de l'ensemble des interactions constructives des rayons émis par les atomes d'un même plan. Selon la loi de Bragg :

$$2.d.\sin\theta = n.\lambda \tag{4.4}$$

n - nombre entier correspondant à l'ordre de diffraction

λ - longueur d'onde du rayonnement

d - distance réticulaire

θ - angle de diffraction

Après la diffraction, on obtient un diffractogramme du faisceau diffracté en fonction de l'angle de diffraction  $2\theta$  ou de la distance réticulaire d (figure 4.6). L'identification des phases présentes dans un échantillon se fait par comparaison de son diffractogramme (positions et intensités des raies diffractées) avec des diffractogrammes de phases connues.

## Objectif

L'analyse par DRX nous permet d'identifier la composition minéralogique de notre sol (argile de Soignie) et de sa partie argileuse. Les résultats d'analyse sont aussi une base importante aidant à interpréter partiellement les résultats des autres essais.

L'analyse par DRX joue le rôle primordial dans cette étude, elle nous permet d'observer les changements dans la composition minéralogique, la texture, ainsi que des nouvelles phases minéralogiques dans les sols traités à 4% de la chaux à différents instants (1 jour, 7 jours et 28 jours) après le mélange. Les résultats obtenus sont la base d'interprétation pour l'amélioration des propriétés mécaniques après le traitement comme ce qui est déjà documenté dans la littérature.

## Mode opératoire

Tous les analyses DRX de cette étude ont été effectuées dans le laboratoire d'analyse en phase liquide au département de géologie B18 sous la responsabilité de Monsieur Joël OTTEN.

### Analyse de la fraction argileuse ( $< 2 \mu m$ ) : préparation d'un agrégat orienté

Principe : La préparation consiste à orienter les particules argileuses afin de renforcer leur réflexion principale.

- Prélever une aliquote de l'échantillon brut (quelques cc) et sécher à l'étuve à  $40^{\circ}C$ .
- Broyer manuellement l'échantillon (mortier en agate).
- Mettre en suspension dans de l'eau déminéralisée.
- Tamiser à 63 microns (tamis métallique et/ou en nylon). Choisir la maille du tamis selon la matrice sédimentaire (tamisage à 30 microns si diatomées). La fraction  $< 63 \mu m$  est récupérée dans un erlenmeyer de 500 ml. Le refus de tamis est séché à l'étuve et stocké.

*Prétraitements éventuels en fonction de l'analyse sédiment total :*

Si présence de carbonates : Décarbonater l'échantillon en ajoutant HCl dilué (0,1 N), travailler sous hotte et sous légère agitation magnétique (ajouter un barreau aimanté). Utiliser éventuellement de l'HCl 1N si échantillon riche en carbonates. Vérifier le pH de la solution (papier pH) et ajouter de petites quantités d'acide tant que la solution n'est pas acide (i.e., réaction incomplète). Lorsque la solution devient acide, attendre et vérifier à nouveau que la réaction soit complète. Retirer l'erlenmeyer de la plaque d'agitation magnétique, retirer le barreau aimanté (le rincer), ajouter de l'eau déminéralisée et laisser décanter la solution. Vider le surnageant clair. Centrifuger au moins deux fois afin de rincer correctement l'échantillon (utiliser de l'eau déminéralisée).

Si présence de sulfates : remplir l'erlenmeyer d'eau chaude (le gypse est soluble dans l'eau à partir de  $60^{\circ}C$ ), laisser décanter, vider le surnageant transparent, rincer au moins 3 fois. Centrifuger au moins deux fois pour rincer correctement l'échantillon et utiliser de l'eau déminéralisée.

Si présence de matière organique : laisser réagir l'échantillon avec de l'eau oxygénée (10%) sous hotte, répéter l'ajout d' $H_2O_2$  tant que l'effervescence se poursuit ensuite rincer l'excès d' $H_2O_2$  avec de l'eau déminéralisée. Centrifuger au moins deux fois pour rincer correctement l'échantillon et utiliser de l'eau déminéralisée.

1. Après les prétraitements éventuels, transférer la solution dans un pilulier, déposer le pilulier sur la table désolidarisée du sol, agiter et laisser décanter, si la suspension décanter rapidement : soit la solution est encore acide et il faut rincer à nouveau ; soit la quantité d'échantillon est trop importante et il faut la diluer.
2. Lorsque les particules restent en suspension, agiter le pilulier jusqu'à défaire d'éventuels agrégats, retirer le couvercle, déposer le pilulier sur la table et laisser sédimenter pendant 50 minutes.
3. Après 50 minutes de décantation, le 1<sup>er</sup> cm de solution ne contient plus que des particules  $< 2 \mu\text{m}$  selon la Loi de Stokes : la fraction argileuse est prélevée en enfonçant la pipette jusqu'au trait noir et est déposée délicatement sur une lamelle de verre.
4. Laisser sécher à l'air (1 nuit).
5. Indiquer le nom de l'échantillon au crayon sur la lame de verre et mettre l'agrégat orienté sur le porte-objet.
6. Passer les échantillons au diffractomètre. Demander à une personne autorisée de charger les échantillons dans le passeur. Définir le job, choisir la procédure spectre normal pour une analyse entre  $2 - 30^\circ 2\theta$  vérifier l'acquisition du spectre avant de passer à l'étape suivante.
7. Transférer l'échantillon dans un porte-objet en Al, le placer dans une cloche avec de l'éthylène-glycol, fermer la cloche, faire le vide en allumant la pompe quelques minutes, fermer le robinet de la cloche, éteindre la pompe à vide et vérifier l'étanchéité, laisser les échantillons maximum 24h.
8. Après maximum 24h, ouvrir la cloche, remettre les échantillons sur le porte-objet. Passer les échantillons au diffractomètre (max 4 à la fois, laisser les autres en attente dans la cloche). Choisir la procédure « spectre EG » pour une analyse entre  $2 - 23^\circ 2\theta$ . Vérifier l'acquisition du spectre avant l'étape suivante.
9. Retirer les lames des porte-objets, les disposer sur une plaque réfractaire, mettre les échantillons au four.
10. Allumer le four : vérifier la température souhaitée ( $500^\circ\text{C}$ ) et la température de sécurité ( $+50^\circ\text{C}$  par rapport à la température souhaitée), tourner le bouton en position 1, appuyer sur le bouton rouge pour mettre en marche (entendre un clic), vérifier que la température augmente (aiguille), quand la température est atteinte, mettre les échantillons dans le four (gants) et les laisser 4h.
11. Après 4h, éteindre le four (tourner le bouton sur 0), attendre 10 minutes avant d'ouvrir légèrement la porte, ouvrir complètement la porte et laisser refroidir les lames, retirer la plaque réfractaire du four avant des gants et la poser sur les supports (pas directement sur la table), attendre avant de remettre les lames sur les porte-objets en plexiglas. Passer les échantillons au diffractomètre. Choisir la procédure « spectre H » pour une analyse entre  $2 - 15^\circ 2\theta$ . Vérifier l'acquisition correcte du spectre.

#### **Analyse de la fraction argileuse totale : préparation d'un agrégat orienté total**

1. Prélever une aliquote de l'échantillon brut (quelques cc) et sécher à l'étuve à  $40^\circ\text{C}$ .
2. Broyer manuellement l'échantillon (mortier en agate).
3. Mettre en suspension dans de l'eau déminéralisée.
4. Centrifuger quelques minutes la suspension à 2500 rpm.
5. Vider le surnageant et étaler à la spatule le culot sur une lame de verre rainurée (ou lame de verre dont deux côtés ont été réhaussés avec du papier collant).
6. Laisser sécher à l'air (1 nuit).

7. Indiquer le nom de l'échantillon au crayon sur le bord de la lame de verre et mettre l'agrégat orienté total sur le porte-objet.
8. Passer les échantillons au diffractomètre (D8-Advance, Bruker) selon la séquence spectre normal (i.e., séché à l'air libre un nuit), puis solvaté (i.e., laisser maximum 24h dans une cloche sous vide avec de l'éthylène glycol) et enfin chauffé 4h au four à  $500^{\circ}\text{C}$ , vérifier l'acquisition correcte du spectre avant de passer à l'étape suivante.

#### Analyse de la minéralogie totale : préparation d'une poudre

1. Prélever une aliquote de l'ordre de 1 g de sédiment total et sécher à  $40^{\circ}\text{C}$  à l'étuve.
2. Broyer manuellement l'échantillon au mortier à agate.
3. Tamiser à sec à 250 microns (tamis métallique).
4. Placer le porte échantillon à l'envers sur une lame de verre dépolie nettoyée, remplir le porte-échantillon à l'aide d'une spatule, compacter régulièrement et délicatement la poudre afin de limiter toute orientation préférentielle des minéraux (Méthode de Moore et Reynolds 1989), poser le disque de plexiglas en vérifiant qu'il s'adapte parfaitement (même niveau) au porte-échantillon, fixer le support arrière noir, retourner la préparation, indiquer le  $n^{\circ}$  de l'échantillon au crayon sur le support en plexiglas.
5. Passer les échantillons au diffractomètre (D8-Advance, Bruker). *Demander à une personne autorisée de charger le passeur d'échantillon.* Rentrer le « job », choisir la procédure « poudre sans rotation » pour une analyse en routine entre 2 à  $45^{\circ}2\theta$ . Vérifier l'acquisition du spectre avant interprétation.

Interprétation (estimation semi-quantitative) est obtenue en appliquant à l'intensité mesurée un facteur correctif multiplicatif. Les intensités corrigées sont sommées et le pourcentage relatif de chaque minéral est calculé par rapport à une somme ramenée à 100%.

#### 4.2.4 Essai Proctor et CBR

##### Essai Proctor

L'essai est réalisé pour déterminer les caractéristiques de compactage Proctor (optimum Proctor) du sol initial et des sols traités à la chaux. Le mode opératoire est conforme à la norme **NF P94-093**. On a utilisé un système automatique de compactage avec la dame modifiée et le moule CBR dans cette étude (figure 4.8). Les sols sec ont été initialement humidifiés et conservés pendant 24h dans les seaux inversés (figure 4.7) pour l'homogénéité d'humidité dans les échantillons. Les pourcentages de chaux sont respectivement ajoutée 0%, 2%, 4%, 8% dans les échantillons de sol humide. Notons que tous les sols utilisés doivent passer au tamis de 2mm et les mélanges sol-chaux doivent être conservés pendant 2h avant de les compacter [CRR, 2010].

Les teneurs en eau initialement estimées pour le sol naturel et sols traités à la chaux sont les suivant :

- 6%, 8%, 10%, 12%, 14% pour le sol naturel ;
- 8%, 10%, 12%, 14%, 16% pour le sol traité à 2% de chaux ;
- 10%, 12%, 14%, 16%, 18% pour le sol traité à 4% de chaux ;
- 12%, 14%, 16%, 18%, 20% pour le sol traité à 8% de chaux ;

##### Essai CBR

L'essai CBR immédiat a été réalisé après l'essai Proctor terminé selon la norme **NF P 94-078** pour mesurer la résistance au poinçonnement du sol étudié. Il caractérise l'aptitude



FIGURE 4.7 – Conservation des échantillons dans les seaux inversés

du sol à permettre la circulation en phase de chantier.

L'indice CBR (indice de portance immédiate - IPI) exprime en % le rapport entre les pressions produisant dans le même temps un enfoncement donné dans le sol étudié d'une part et dans un matériau type d'autre part. Par définition, cet indice correspond à la plus grande des deux valeurs suivantes :



FIGURE 4.8 – Compacteur automatique CBR



FIGURE 4.9 – Système de CBR

$$IPI_{25} = \frac{\text{Pression (MPa)} \text{ } 2,54\text{mm d'enfoncement}}{6,89\text{MPa}} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

$$IPI_{50} = \frac{\text{Pression (MPa)} \text{ } 5,08\text{mm d'enfoncement}}{10,33\text{MPa}} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

$$IPI = \max(IPI_{25}, IPI_{50}) \quad (4.7)$$

Les éprouvettes sont effectuées dans le moule CBR par essai de compactage Proctor et sont mises dans le système de presse CBR (figure 4.2.4) avec une vitesse d'enfoncement de 1,27 mm/min. On obtient des courbes de la pression en fonction de l'enfoncement. Les courbes

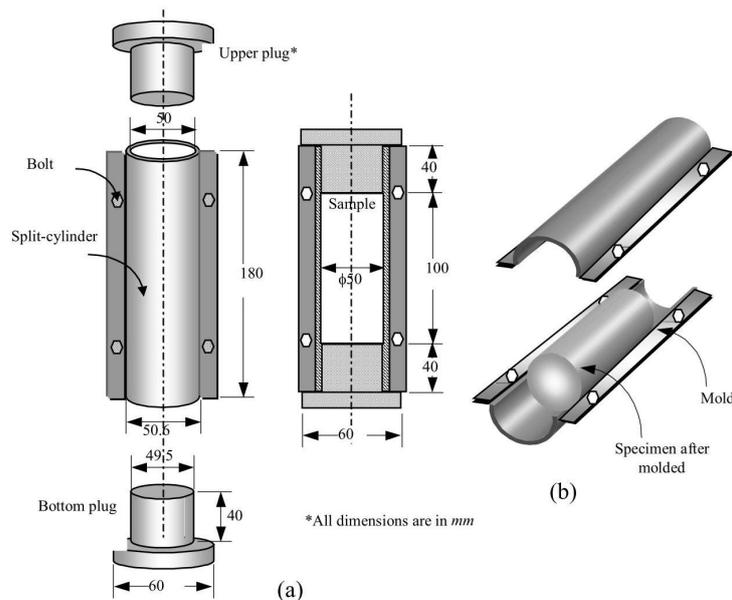


FIGURE 4.10 – Moule de compression statique préparant les éprouvettes UCS ; a) Dimensions du moule b) Éprouvettes, [Muntohar, 2005]

sont éventuellement corrélées. Enfin, l'indice de CBR immédiat est calculée selon les formules (4.5, 4.6, 4.7).

#### 4.2.5 Essai de compression simple

Les essais de compression simple ont été réalisés conformément à la norme **NF P94-077** pour évaluer l'évolution au cours du temps de la résistance des sols traités ainsi que de l'influence de la quantité de chaux ajoutée sur le traitement. Le gain de résistance des sols traités est le critère primordial pour évaluer l'efficacité du traitement.

Les échantillons ont été préparés à l'optimum Proctor de chaque traitement et conservés pendant 2h comme pour l'essai Proctor avant les mettre dans un moule cylindrique spécial de 50x100 mm (figure 4.10) pour confectionner des éprouvettes.

Les éprouvettes ont été conservées dans des petits seaux bien étanches pour empêcher la carbonatation de la chaux libre dans les éprouvettes. Aux différents instants voulus après traitement, les éprouvettes ont été mises sur un système de compression simple avec une vitesse de mise en charge statistique. La déformation et la force appliquée sur les éprouvettes au cours d'essai sont mesurées par des capteurs. Pour chaque mesure, on a testé deux éprouvettes, la moyenne a été prise pour présenter les caractéristiques en compression simple des sols.

#### 4.2.6 Essai triaxial

Dans cette étude, l'essai triaxial a été réalisé afin de déterminer l'évolution au cours du temps l'angle de frottement et de la cohésion du sol après le traitement. Le type d'essai triaxial non-consolidé et non-drainé (UU) a été proposé pour éviter la réaction entre la chaux et l'eau dans la cellule triaxiale.

Les éprouvettes ont été préparées et conserées dans les mêmes conditions que celles de l'essai de compression simple. On a 4 lots d'éprouvettes (traitées à 0%, 2%, 4%, 8%). L'essai



FIGURE 4.11 – Conservation des éprouvettes



FIGURE 4.12 – Système de compression simple

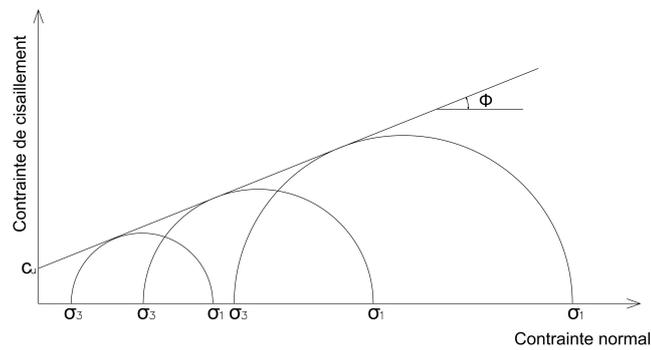


FIGURE 4.13 – Courbe intrinsèque de l'essai triaxial

consiste à faire croître le déviateur de contrainte ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) à vitesse de déformation constante jusqu'à la rupture de l'éprouvette, en maintenant  $\sigma_3$  constante. Les paramètres de cisaillement non consolidé et non drainé  $\phi_u$  et  $c_u$  sont mesurés par la droite intrinsèque de contrainte de cisaillement  $\tau_{max}$  selon le critère de Mohr - Coulomb :  $\tau = \pm(c_u + \sigma_n \cdot tg\phi_u)$ . La détermination de cette droite nécessite 3 éprouvettes dans le même lot pour déterminer  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  à leur rupture. La droite intrinsèque  $\tau_{max}$  du mélange (solide + eau) est tracée par ces contraintes (figure 4.13).

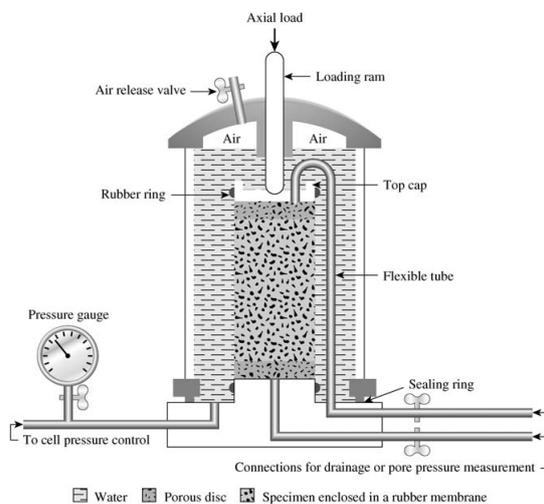


FIGURE 4.14 – Schéma d'appareil triaxial



FIGURE 4.15 – Cellule triaxiale au laboratoire

# Chapitre 5

## Résultats et discussion

### 5.1 Identification du sol étudié de la ville de Soignies

#### 5.1.1 Classification du sol étudié

La classification du sol naturel est effectuée selon la norme **NF P11-300** en basant sur les résultats obtenus des essais granulométrique et les limites d'Atterberg.

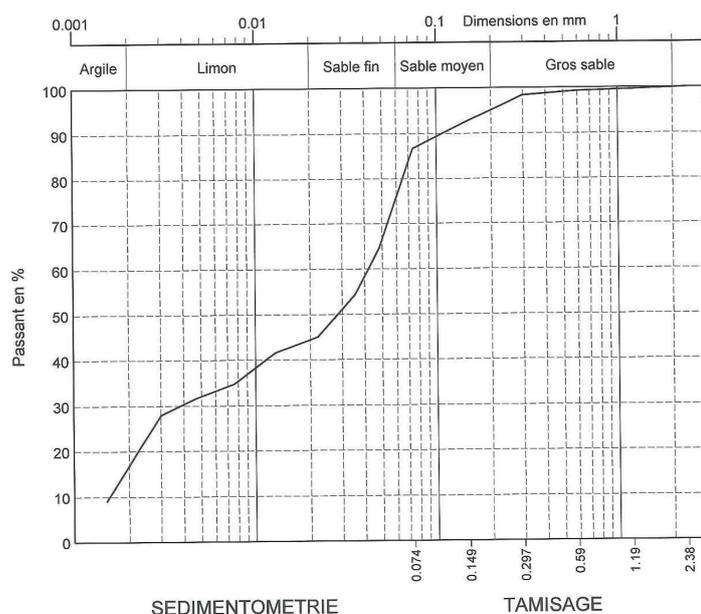


FIGURE 5.1 – Courbe granulométrique du sol naturel

TABLE 5.1 – Synthèse de l'analyse granulométrique

$< 2\mu m$	$< 75\mu m$	$< 80\mu m$	$\rho_s$	W	$C_u$	$C_c$
[–]	[–]	[–]	$[kg/m^3]$	[%]	[–]	[–]
16,9	87,5	88,2	2,69	3,0	26,9	0,2

Sur la figure 5.1 on trouve que le passant à  $80\mu m$  du sol étudié est de 88%. De plus, son indice de plasticité (IP) obtenu à partir l'essai des limites d'Atterberg vaut 18,6. Donc notre sol est classé dans le groupe  $A_2$  sur la figure 5.2 et le tableau 5.2 identifie qu'il s'agit d'un sable argileux peu plastique.

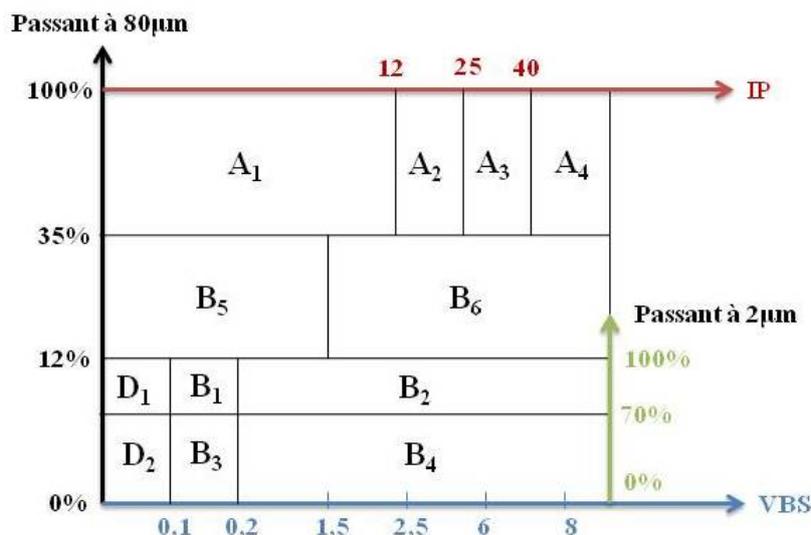
FIGURE 5.2 – Classification des sols dont  $D_{max} < 50mm$  selon la norme NF P11-300

TABLE 5.2 – Classification des sols - NF P11-300

$D_{max}$	Classe	Sous classe	Nature
$\leq 50mm$	A-Sols fins	$A_1$	Limons peu plastiques, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques
		$A_2$	sables fins argileux, limons argileux et marnes peu plastiques, arènes
		$A_3$	Argiles et argiles marneuses, limon très plastiques
		$A_4$	Argiles et argiles marneuses très plastiques
	B Sols sableux et graveleux avec fines	$B_1$	Sables silteux
		$B_2$	Sables argileux (peu argileux)
		$B_3$	Graves silteuses
		$B_4$	Graves argileuses (peu argileuses)
		$B_5$	Sables et graves très silteux
		$B_6$	Sables et graves argileux à très argileux

Notre sol caractérisé par un  $I_P = 18,6$  et 86% de passant à  $75\mu m$ , satisfait la condition d'un sol approprié au traitement à la chaux que [Dallas, 2000] a proposé ( $I_P > 10$  et au moins 25% de passant à  $75\mu m$ ).

### 5.1.2 Détermination de la composition minéralogique

Deux méthodes d'investigation par diffraction des rayons X ont été utilisées pour identifier la composition minéralogique du sol étudié. Dans un premier temps, une analyse sur la poudre totale fournit le résultat d'une semi-quantification de tous les minéraux présents et notamment la fraction totale regroupant minéraux phyllosilicates. D'autre part, l'analyse de la fraction argileuse (inférieure à  $2\mu m$ ) extraite du matériau est préparée sous forme de lames orientées. Elle fournit une bonne estimation des divers composants argileux grâce à l'application de trois diagnostics : « normal », avec l'éthylène glycol et enfin après chauffage ( $500^\circ C$ ).

## Analyse DRX sur la poudre totale du sol naturel

La figure 5.3 présente le résultat d'analyse DRX sur la poudre totale du sol naturel. La détermination des minéraux présents est basée sur le tableau 5.3.

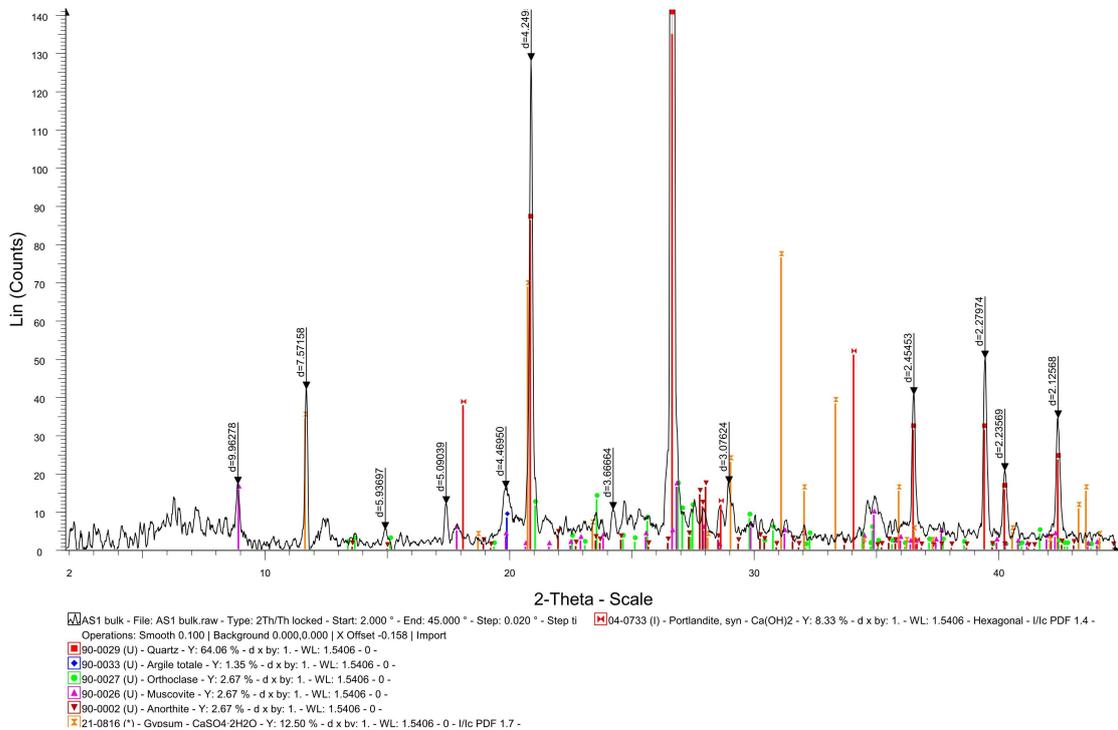


FIGURE 5.3 – Diffractogramme de la poudre totale du sol naturel

L'estimation semi-quantitative de quantité des minéraux est obtenue en appliquant à l'intensité mesurée figure (5.3) un facteur correctif (table 5.3) multiplicatif déterminé par [Boski et al., 1998].

TABLE 5.3 – Caractérisation des principaux minéraux et facteurs correctifs associés, [Boski et al., 1998]

Minéral	Réflexion utilisée	Facteur correctif
Gypse	$d = 7,5\text{\AA}$	0,4
Argile totale	$d = 4,5\text{\AA}$	20
Quartz	$d = 3,33\text{\AA}$	1
Calcite	$d = 3,03\text{\AA}$	1,65
Micas	$d = 10,2 - 9,72\text{\AA}$	6
Feldspath-K	$d = 3,21 - 3.26\text{\AA}$	4,3
Plagioclase	$d = 3,16 - 3,20\text{\AA}$	2.8
Dolomite	$d = 2,87 - 2,90\text{\AA}$	1,53

Les intensités corrigées sont sommées et le pourcentage relatif de chaque minéral est calculé par rapport à une somme ramenée à 100% qui est présenté dans le tableau 5.4.

L'analyse de la poudre totale du sol étudié nous permet de déterminer le pourcentage respectif de chaque composant minéralogique. On constate que le quartz et les argiles sont deux composants dominants dans notre sol représentant 74% (37% pour chacun) du total. Par conséquent, ces deux composants déterminent les propriétés physico-chimique dans le

TABLE 5.4 – Estimation semi-quantitative des minéraux dans le sol étudié

Minéral	Intensité	Facteur correctif	Intensité corrigée	Pourcentage
Quartz	316	1	316	37
Argile	16	20	320	37
Gypse	42	0,4	16,8	2
Mica	18	6	108	13
Feldspath-K	12	4,3	51,6	6
Plagioclase	10	2,8	28	3
Dolomite	5	1,53	7,65	1
Calcite	5	1,65	8,25	1

traitement à la chaux.

### Analyse DRX sur la partie argileuse

Il faut bien faire attention qu'il existe du gypse dans notre sol. C'est un élément perturbateur pour l'analyse de la partie argileuse. Il faut donc éliminer cet élément avant d'effectuer l'analyse DRX. Les spectres de cet analyse sont illustrées sur la figure 5.4.

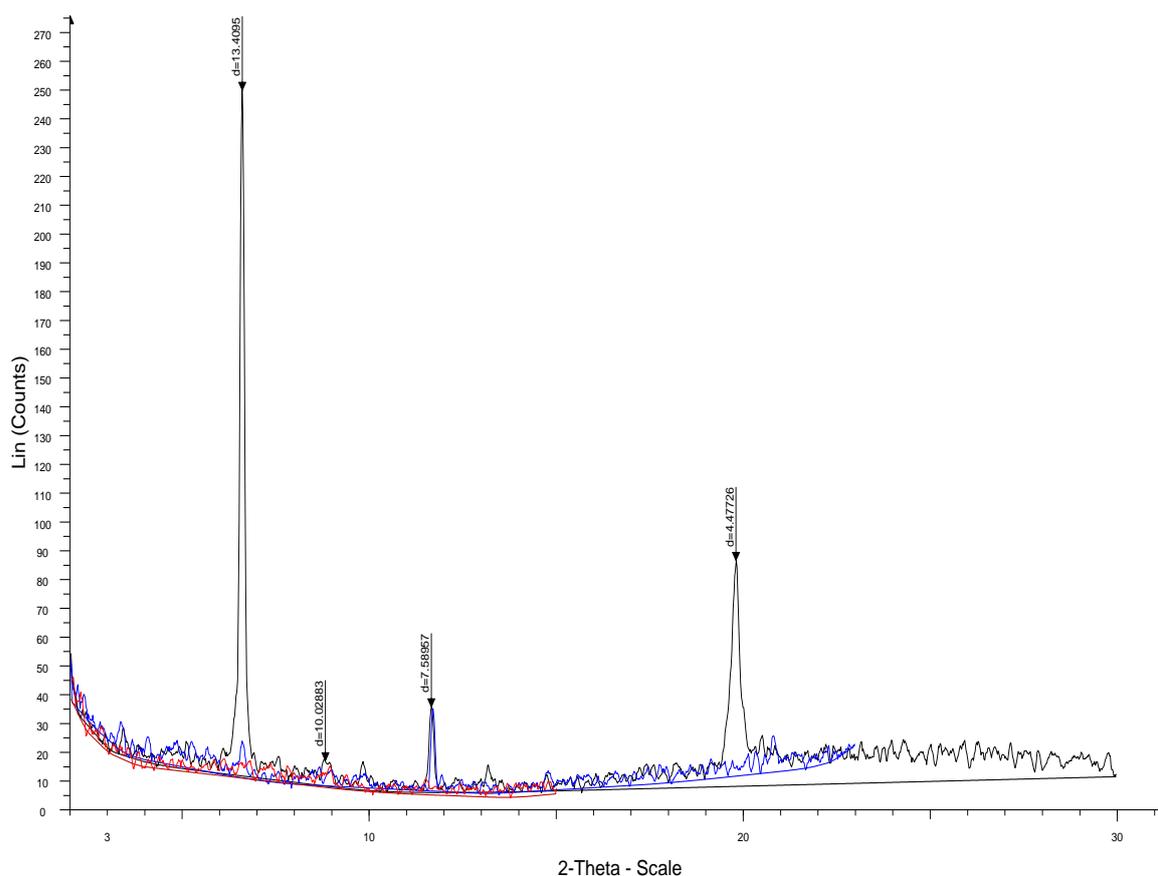


FIGURE 5.4 – Analyse DRX de la partie argileuse du sol naturel

On ne peut pas donner aucune interprétation claire sur les types de minéraux présents dans la partie argileuse du sol naturel. Cette analyse a été effectuée sur les parties argileuses du sol traité à 7 jours et à 28 jours. Pourtant, on peut seulement conclure que les minéraux

argileux soit des vermiculites, soit des smectites ainsi que l'absence de chlorite et de kaolinite.

## 5.2 Estimation de la consommation initiale de la chaux

La consommation initiale en chaux donne la quantité minimale de la chaux ajoutée pour l'échange cationique ou l'affinité du sol [Bell, 1996] et ceci induit, par conséquent, un changement significatif des propriétés du sol traité à court terme. La littérature propose plusieurs méthodes pour estimer cette quantité de chaux comme : le pH, la pression de gonflement, le changement de la plasticité et dans la composition minéralogique, la teneur en chaux libre à court terme.

Dans cette étude, on a utilisé le pH, le changement de la plasticité et la teneur en chaux libre à court terme pour déterminer cette quantité de la chaux ajoutée.

### 5.2.1 Méthode d'Eades & Grim

Les résultats des mesures pH des échantillons de sols traités aux différents pourcentages de chaux sont présentés dans la figure 5.5 suivante.

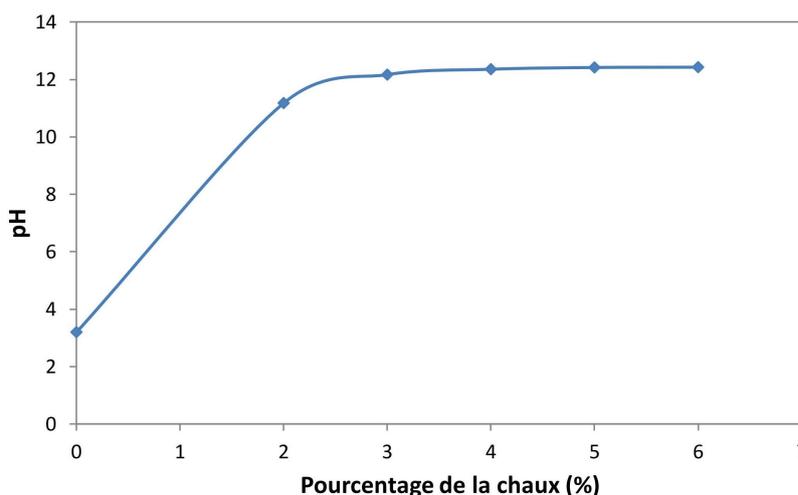


FIGURE 5.5 – Évolution du pH en fonction de la quantité de chaux ajoutée

On observe, sur la figure 5.5, que le sol naturel est très acide avec un pH équivalent à 3. La chaux fait augmenter fortement le pH du mélange aux premiers pourcentages de chaux (0 - 3%). À partir de 4%, on a obtenu un palier, le pH augmente très faiblement jusqu'à la valeur du pH de la solution de chaux propre (pH = 12,55). La valeur du pH de 12,4 correspond à 4% de chaux ajoutée. D'après Eades et Grim, cette quantité est suffisante pour activer la réaction pouzzolanique. Ainsi, il semble que la teneur en chaux optimale est de 4%.

### 5.2.2 Essai de limites d'Atterberg

La figure 5.2.2 donne l'évolution des limites d'Atterberg des sols traités aux différents pourcentages en chaux.

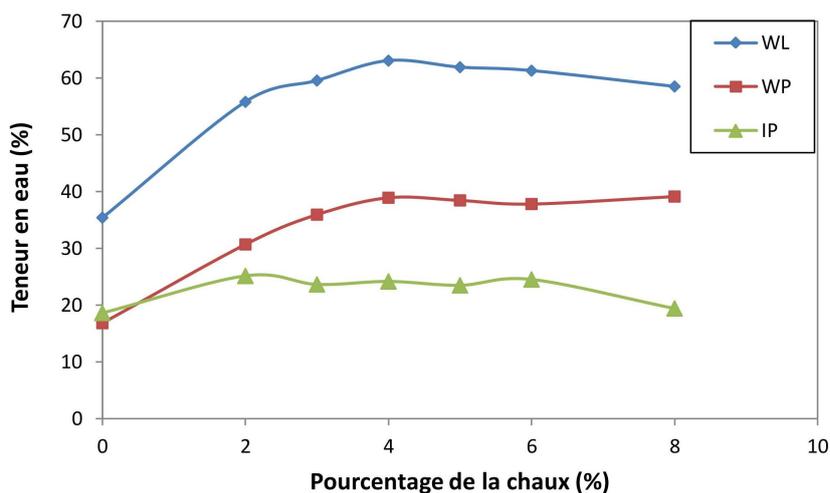


FIGURE 5.6 – Évolution des limites d'Atterberg du traitement

On constate une anomalie dans l'évolution des limites d'Atterberg du sol traité. Normalement, on obtient une réduction de la plasticité (IP) déduite par diminution de la limite de liquidité (LL) et augmentation de la limite de plasticité (LP). La réduction de la plasticité pourrait être expliquée, dans la littérature, par la réaction de floculation à cause de la présence de  $Ca^{++}$  et  $OH^-$  qui jouent un rôle important en diminuant l'épaisseur de la double couche. Cependant, comme ce que l'on a mentionné dans la section 3.3.2, Bell [1996] et Dash and Hussain [2011] ont montré qu'on obtiendrait l'augmentation dans quelques cas particuliers. Bell [1996] a rapporté que la plasticité augmente en présence de quartz, de kaolinite et diminue pour le montmorillonite. Dash and Hussain [2011] ont également indiqués la même chose. Ils ont rapporté que l'on obtiendrait l'augmentation de la plasticité dans les sols riches en silice ( $Si^{2+}$  est l'ion principal dans le quartz et la kaolinite).

Dans notre cas, on obtient un pourcentage significatif de quartz (37%) à l'aide de l'analyse DRX. Ce résultat associé avec des conclusions précédentes, pourraient expliquer notre réduction de la plasticité du sol traité à la chaux.

On constate aussi que le changement maximal dans la plasticité est obtenu à 4% de chaux ajoutée. Pour le critère de changement dans la plasticité, on désigne donc 4% de la teneur en chaux nécessaire pour la réaction à court terme.

### 5.2.3 Détermination de la quantité de chaux libre

Le pourcentage de chaux libre est déterminé par le volume de HCl 0,1N nécessaire pour neutraliser la solution du mélange sol - chaux. Le tableau 5.5 ci-dessous présente l'évolution de quantité de chaux libre (CaO libre) et de chaux consommée (CaO conso) au cours du temps (voir les calculs intermédiaires de l'essai en annexe).

Après 1 jour, le mélange avec 2, 4 et 8% de chaux initiale (correspondant respectivement à 1,902 3,804 et 7,608% CaO) nous donne respectivement 1,56 ; 2,43 et 3,94% de CaO consommé par le sol étudié.

En résumé, les 3 méthodes nous donnent une quantité de chaux consommée à court terme autour de 4% de CaO. Ainsi, on peut suggérer que 4% de chaux est la consommation initiale de la chaux. On propose cette valeur pour des travaux d'amélioration du sol de la ville de

TABLE 5.5 – Détermination de la quantité CaO libre par titrage HCL 0,1N

CaO initiale [%]	1 Jour		7 Jours		28 Jours	
	CaO libre [%]	CaO conso [%]	CaO libre [%]	CaO conso [%]	CaO libre [%]	CaO conso [%]
1,902	0,340	1,562	0,064	1,838	0,970	0,932
3,804	1,370	2,434	1,780	2,024	0,750	3,054
7,608	3,670	3,938	3,710	3,898	3,230	4,378

Soignies par traitement à la chaux.

### 5.3 Essais de compactage Proctor et CBR immédiat

#### 5.3.1 Compactage Proctor

La figure 5.7 donne l'évolution de l'optimum Proctor du sol traité à la chaux. En accord avec la littérature, la chaux fait diminuer le poids volumique sec maximal et augmenter la teneur en eau optimale.

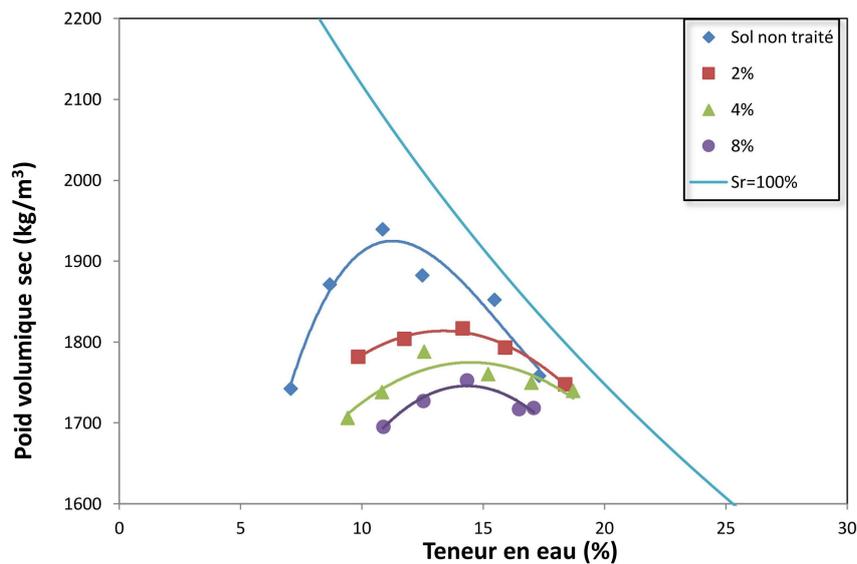


FIGURE 5.7 – Essai Proctor des sols traités à la chaux

TABLE 5.6 – Optimum Proctor du sol après traitement à la chaux

Chaux [%]	Optimum Proctor	
	W [%]	$\rho_d$ [ $kg/m^3$ ]
0	11,3	1924,97
2	13,4	1813,63
4	14,5	1774,85
8	14,3	1745,8

On constate également que la courbe devient plus plate après le traitement. Cela explique que la chaux réduit aussi la sensibilité à l'eau du sol, ce qui assure qu'un pourcentage donné de la densité peut être réalisé sur une gamme beaucoup plus large de teneurs en eau. La

figure 5.7 et le tableau 5.6 nous donne le changement maximal dans les caractéristiques de l'optimum Proctor du sol traité correspondant à 4% de la chaux ajoutée. Ça veut dire que 4% de chaux est la teneur en chaux optimale pour le compactage Proctor du traitement à la chaux du sol étudié.

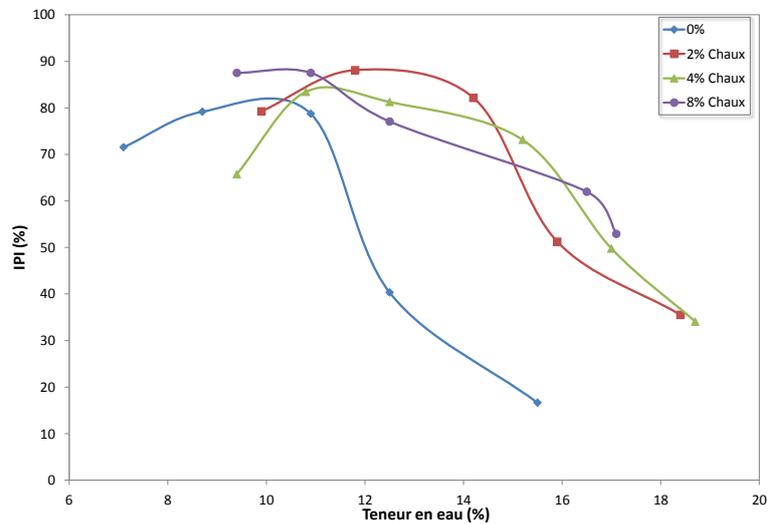


FIGURE 5.8 – Évolution des valeurs CBR en fonction de la teneur en eau

### 5.3.2 Valeurs IPI

L'indice de portance immédiate (IPI) du sol en fonction de la teneur en eau est présentée sur la figure 5.8. Pour une teneur en eau donnée, l'IPI du sol traité est toujours plus élevée que celle du sol naturel. Ça signifie que l'effet de la chaux augmente les valeurs de l'IPI après le traitement (figure 5.9). On observe également que l'IPI maximale d'un sol est donné à la teneur en eau de l'optimum Proctor.

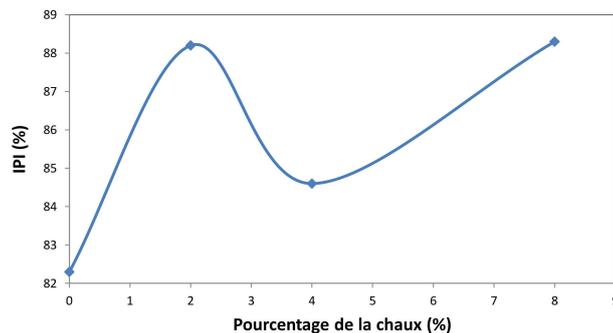


FIGURE 5.9 – Évolution de l'IPI en fonction de la quantité de chaux ajoutée

Normalement les valeurs de l'IPI augmentent parallèlement à l'augmentation de la quantité de chaux ajoutée. Cependant, la relation entre l'IPI et pourcentage de la chaux ajoutée sur la figure 5.9 ne nous donne pas la même tendance. L'IPI minimale est obtenue à 4% de chaux plutôt qu'à 2%, comme habituellement.

## 5.4 Changement dans la structure du sol traité à la chaux

### 5.4.1 Phénomène de floculation & agglomération

Le phénomène de floculation et agglomération des sols traités résulte de l'échange cationique entre le sol et la chaux ajoutée à court terme. Ce phénomène du sol traité après un jour de maturation est bien observé sur la figure 5.10.

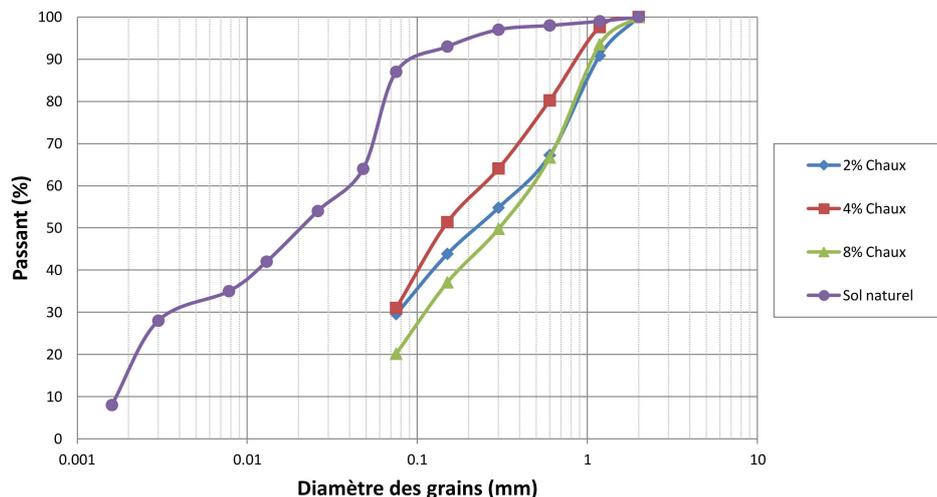


FIGURE 5.10 – Floculation et agglomération des sols à un jour après le traitement

On observe l'augmentation du pourcentage de gros grains et la réduction de la proportion des grains de faible diamètre. S'il existe des désaggrégations au cours de broyage, cela montre que la proportion réelle des gros grains est plus élevée que celle observée sur la figure 5.10.

### 5.4.2 Changement dans la composition minéralogique

La figure 5.11 donne le résultat de l'analyse DRX sur la poudre totale du sol traité à 4% de chaux après 7 jours de maturation.

L'interprétation de ce diffractogramme est présentée dans le tableau 5.7 ci-dessous. Il y a des changements évidents dans la composition minéralogique, y compris une augmentation de gypse de 2% à 15% et une réduction de l'argile de 37% à 26% ainsi que la présence de portlandite ( $Ca(OH)_2$ ) et la présence d'ettringite par rapport à la composition minéralogique du sol naturel (tableau 5.4). Des changements dans les autres minéraux sont négligeables.

La figure 5.12 donne le résultat DRX du sol traité à 4% de chaux après 28 jours de maturation.

Le tableau 5.8 présente l'interprétation du diffractogramme sur la figure 5.12. On trouve encore une réduction du pourcentage des minéraux argileux par rapport au cas de 7 jours. Les autres minéraux ne changent pas significativement leur pourcentage en comparaison avec le sol traité à 7 jours.

L'augmentation importante de gypse et la présence d'ettringite après 7 jours de conservation peut être expliquée par la nature des sulfates du sol étudié avec la transformation de la

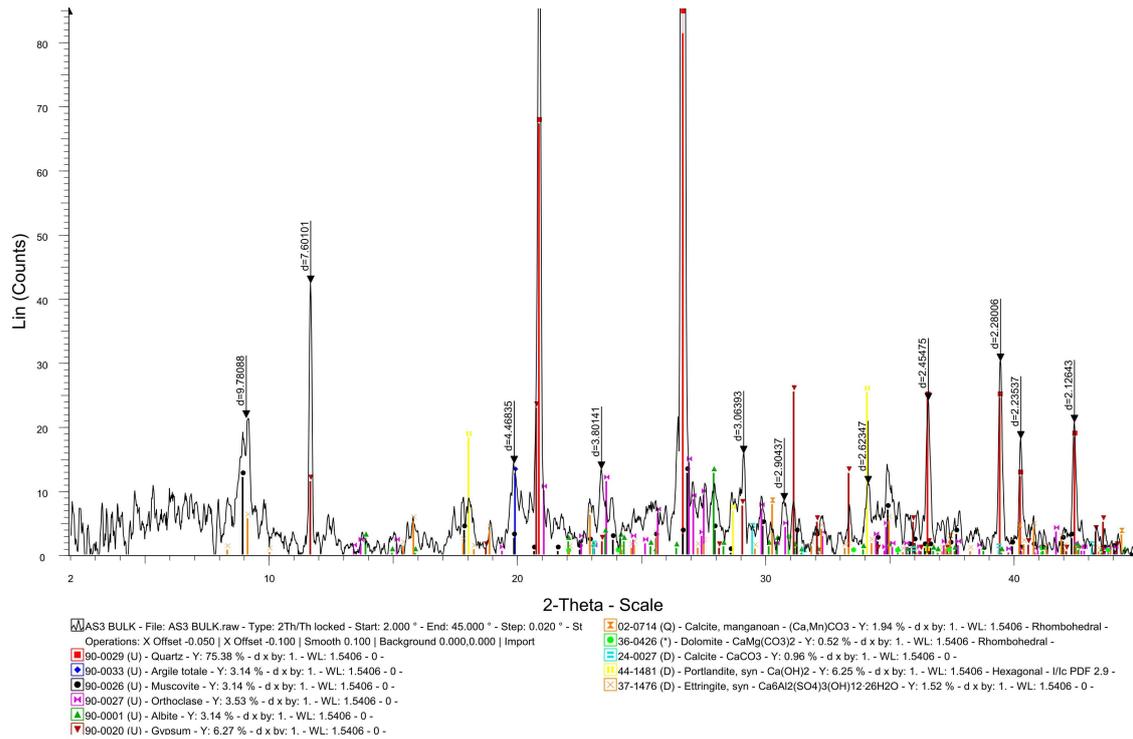
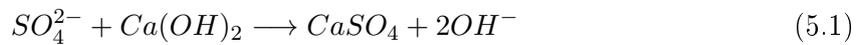


FIGURE 5.11 – Diffractogramme sur la poudre totale du sol traité à 4% de la chaux après 7 jours de cure

portlandite en gypse insoluble selon l'équation 5.1.



À 28 jours, on obtient le même pourcentage de gypse par apport à 7 jours. Cela contribue à démontrer que l'équation de transformation de porlandite en gypse 5.1 est déjà complète après 7 jours.

On a abordé le problème important du sol hautement en sulfates traité à la chaux à la section 3.4.2. Ce sont des produits de la réaction de la chaux dans le sol sulfaté (ettringite et thaumasite) qui sont gonflants. De plus, on a bien observé la présence d'ettringite sur des diffractogrammes. Ainsi, on peut dire que c'est la raison pour laquelle des fissures apparaissant sur les éprouvettes (figure 5.13).

TABLE 5.7 – Composition minéralogique du sol traité à 4% de chaux après 7 jours de cure

Minéral	Intensité	Facteur correctif	Intensité corrigée	Pourcentage
Quartz	407	1	407	39
Argile	14	20	280	26
Gypse	407	0,4	162,8	15
Mica	20	6	120	11
Feldspath-K	10	4,3	43	4
Plagioclase	11	2,8	30,8	3
Dolomite	0	1,53	0	0
Calcite	5	1,65	8,25	1
Portlandite	3	1,65	4,95	0,5

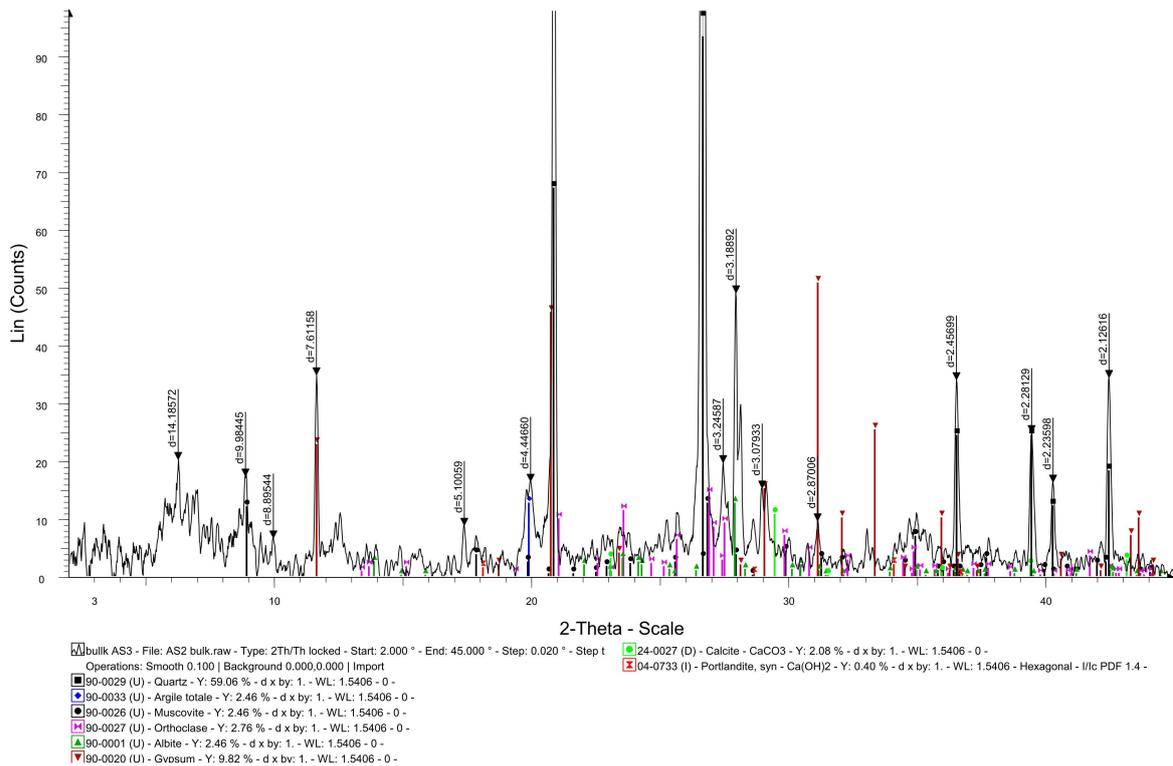


FIGURE 5.12 – Diffractogramme sur la poudre totale du sol traité à 4% la chaux après 28 jours de cure

## 5.5 Développement de la résistance du sol traité à la chaux

### 5.5.1 Essai de compression simple

Les figures 5.14, 5.16, 5.15, 5.17 présentent l'évolution de la résistance en compression simple ainsi que le module d'élasticité des sols traités à 2%, 4% et 8% à différents instants après traitement.

La littérature propose que normalement, la résistance en compression simple ( $R_c$ ) et le module d'élasticité ( $E_c$ ) du sol traité à la chaux augmentent au cours du temps dus aux réactions pouzzolaniques. Cependant, on n'obtient pas cette augmentation dans les évolutions de ( $R_c$ ) et ( $E_c$ ) des sols traités aux 2% 4% et 8% de la chaux au cours de 28 jours après le mélange.

TABLE 5.8 – Composition minéralogique du sol traité à 4% de chaux après 28 jours de cure

Minéral	Intensité	Facteur correctif	Intensité corrigée	Pourcentage
Quartz	520	1	520	38
Argile	16	20	320	23
Gypse	520	0,4	208	15
Mica	17	6	102	7
Feldspath-K	19	4,3	81,7	6
Plagioclase	46	2,8	128,8	9
Dolomite	0	1,53	0	0
Calcite	6	1,65	9,9	1
Portlandite	5,5	1,65	9,075	1

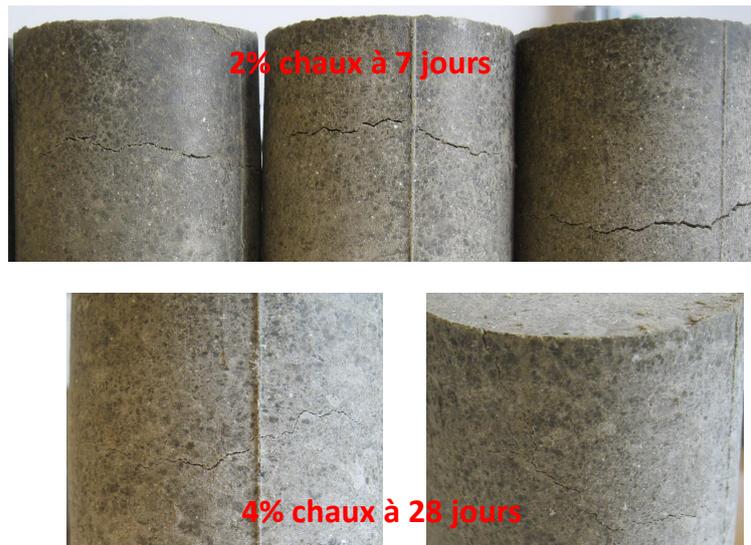


FIGURE 5.13 – Fissures apparaissant sur des éprouvettes

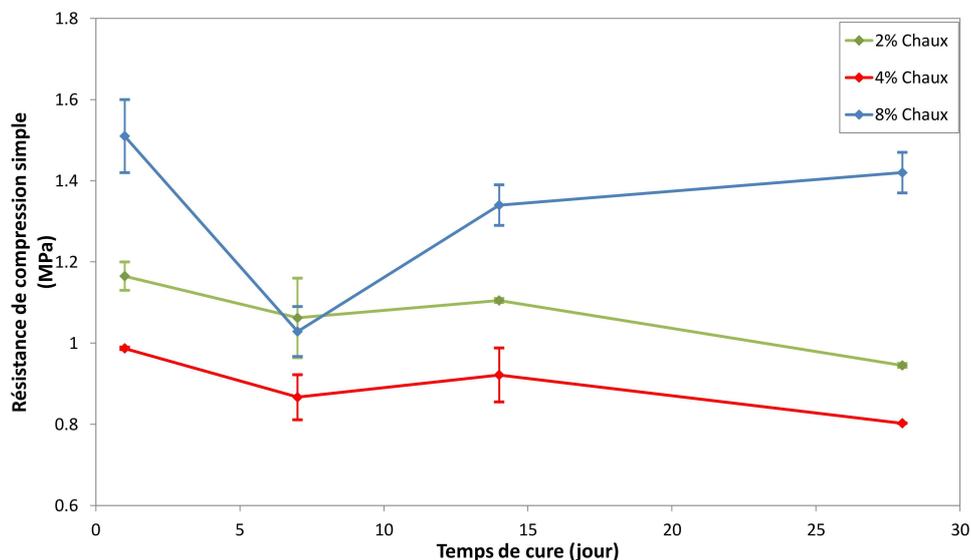


FIGURE 5.14 – Évolution de la résistance en fonction du temps de cure

Sur la figure 5.14, on observe la diminution des ( $R_c$ ) après 7 jours de cure. Plus de la chaux est ajoutée, plus la résistance en compression diminue. En effet, les changements dans la résistance en compression simple à 7 jours par rapport à 1 jour sont négligeables pour 2% et 4% de chaux ajoutée. Pourtant, on obtient une réduction très forte de la résistance pour 8% de chaux, avec ( $R_c$ ) qui diminue de 1,51 MPa à 1,03 MPa (31,8 % de réduction) après 7 jours de maturation. Par contre, de 7 jours à 14 jours de maturation, ( $R_c$ ) augmente pour tous les 3 pourcentages de la chaux. On obtient également un changement important pour 8% de chaux (de 1,03 MPa à 1,34 MPa équivalent à 30,1 % d'augmentation). L'augmentation à 2% et 4% de chaux est négligeable. De 14 jours à 28 jours de maturation, la résistance en compression simple continue à augmenter légèrement pour 8% de chaux. Par contre, ( $R_c$ ) des sols traités à 2% et 4% de chaux diminue significativement, de 1,11 MPa à 0,95 MPa pour 2% de chaux et de 0,92 MPa à 0,80 MPa pour 4%.

La figure 5.15 illustre l'évolution du module d'élasticité pendant 28 jours de cure. On

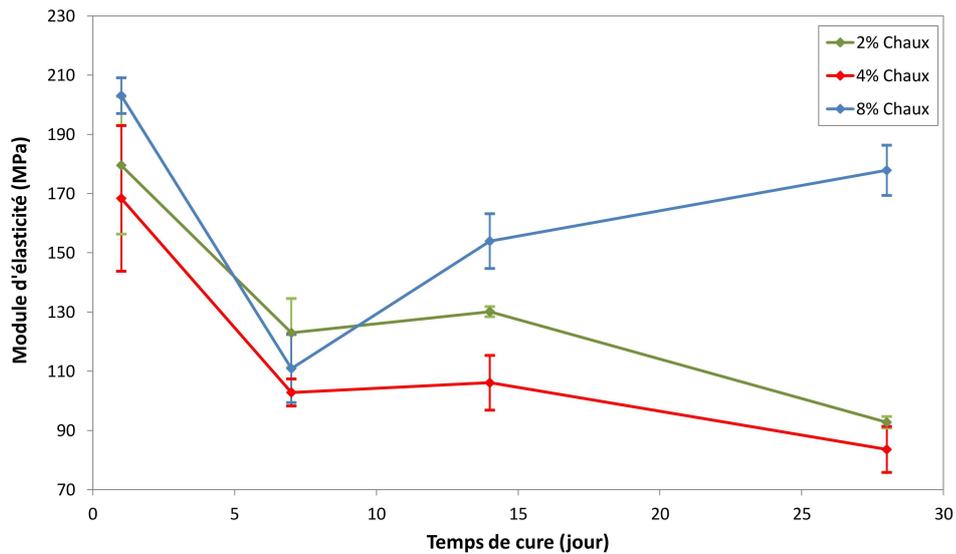


FIGURE 5.15 – Évolution du module d'élasticité en fonction du temps de cure

obtient également la même tendance de réduction et d'augmentation qui pour la résistance en compression simple présentée à la figure 5.14. Toutefois, ces changements sont, au niveau d'intensité, plus significatifs que dans le cas de la résistance en compression simple. En fait, ( $E_c$ ) diminue fortement pendant les sept premiers jours de cure pour tous les 3 pourcentages de chaux ajoutée.

D'autre part, les changements dans la relation entre les propriétés du sol de l'essai de compression simple ( $R_c$  et  $E_c$ ) et les pourcentages de chaux aux différents instants après le mélange sont également observés sur les deux figures 5.16 et 5.17.

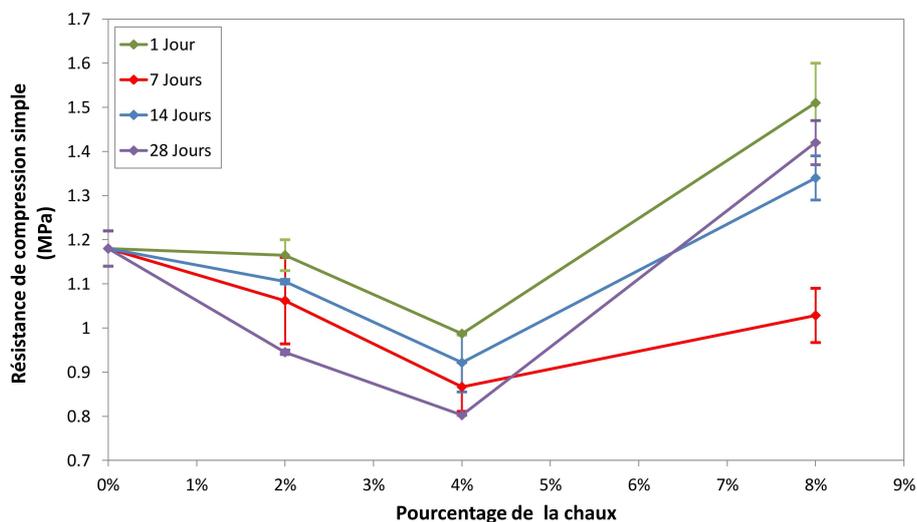


FIGURE 5.16 – Évolution de la résistance en fonction de la chaux ajoutée

La figure 5.16 présente l'évolution de la résistance à la compression simple en fonction de la chaux ajoutée aux différents instants après le traitement. On constate que le traitement des sols de la ville de Soignies à 4% de chaux réduit la résistance en compression simple de 1,18 MPa pour le sol naturel à 0,87 MPa pour le sol traité à 4% après 7 jours de cure. C'est

la valeur minimale observée pendant 28 jours de maturation pour tous les 3 pourcentages de la chaux. Malgré la réduction à 2% et 4%, le traitement à 8% nous donne une augmentation de résistance en compression simple après 28 jours, de 1,18 MPa pour le sol naturel à 1,42 MPa pour le sol traité à 8% de chaux.

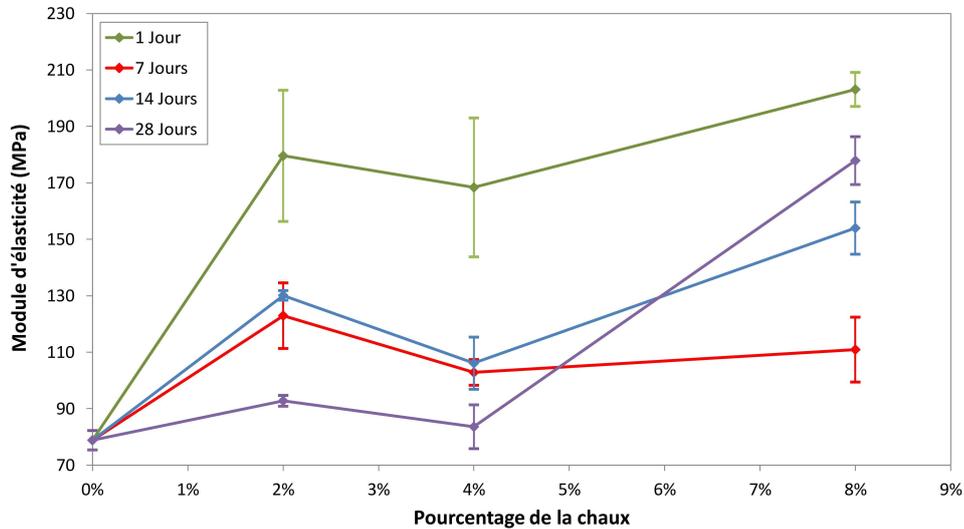


FIGURE 5.17 – Évolution du module d'élasticité en fonction de la chaux ajoutée

La relation entre le module d'élasticité et les quantités de chaux ajoutées illustrée sur la figure 5.17 nous donne des changements un peu différents que dans le cas de résistance en compression simple. On observe également la valeur de 91,33 MPa de  $E_c$  qui est la valeur minimale des sols traités pendant 28 jours de maturation à 28 jours de 4%. Cependant, cette valeur est encore plus importante que celle du sol naturel. Pour 2% de la chaux, contrairement au cas de résistance de compression simple, on obtient une augmentation significative. Généralement, la chaux améliore le module d'élasticité du sol étudié. Toutes les valeurs mesurées sont plus importantes que celles du sol naturel. L'amélioration de  $E_c$  est plus forte à 1 jour de cure, 8% de chaux nous donne aussi l'augmentation maximale de  $E_c$  qui est atteinte à 169,38 MPa à 28 jours après le traitement.

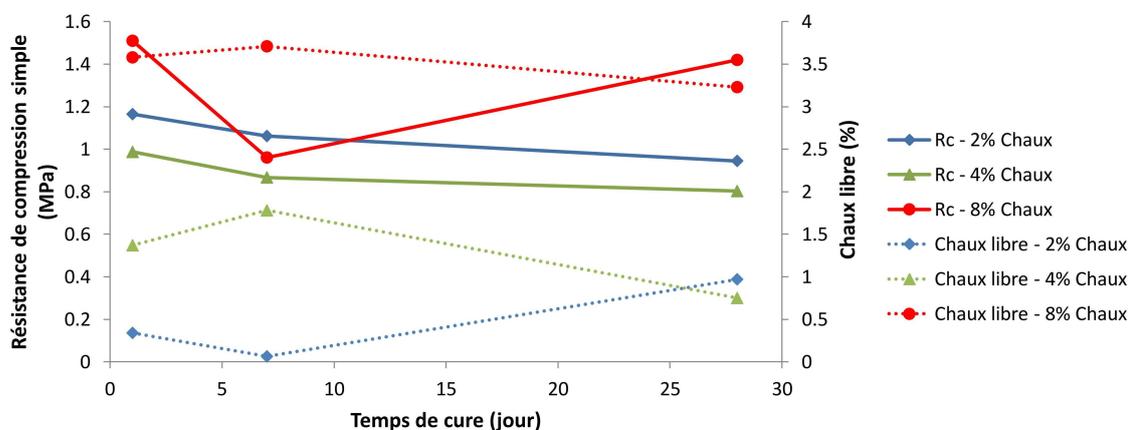


FIGURE 5.18 – Corrélation entre la résistance en compression simple et la chaux libre au cours du temps

Ces résultats inhabituels obtenus dans l'évolution de la rigidité des sols traités sont vérifiés

encore une fois par l'essai de titrage à l'HCl 0,1N pour déterminer la quantité de chaux libre au cours du temps. La figure 5.18 présente, à la fois, des évolutions de la résistance de compression simple et de la quantité de chaux libre. En principe, la quantité de chaux libre évolue inversement par rapport à la résistance de compression simple. Cependant on trouve seulement que 8% de la chaux ajoutée marche bien selon ce principe. C'est donc impossible de trouver une bonne corrélation entre  $R_c$  et la quantité de chaux libre.

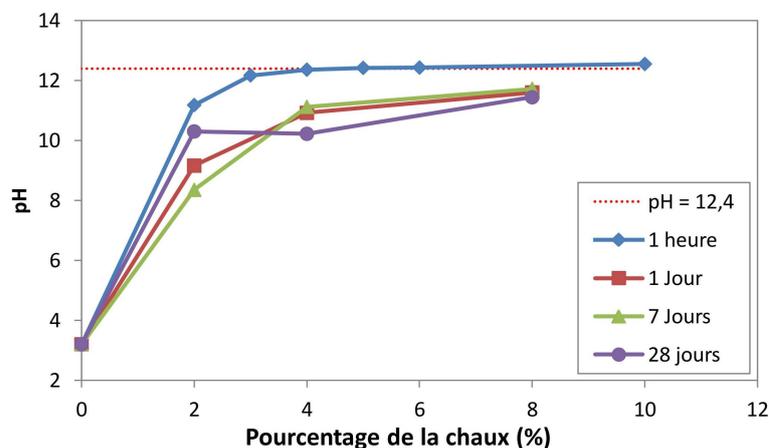


FIGURE 5.19 – pH du mélange sol - chaux avec le temps de cure pour différentes quantités de la chaux

On suppose qu'il existe des éléments perturbateurs dans notre sol comme une quantité significative d'acides humiques, ce qui cause une valeur de pH de 3. En effet, la figure 5.19 illustre l'évolution de pH du mélange avec le temps de cure. Bien que une quantité significative de 8% de chaux soit ajoutée, ça ne peut pas fournir de milieu basique suffisant à pH supérieur à 12 pour favoriser la réaction pouzzolanique [Eades and Grim, 1966; Diamond et al., 1963; Choquette et al., 1987].

Associant avec l'absence des produits de la réaction pouzzolanique (CSH et CAH) sur des diffractogramme DRX, on suppose que la réaction pouzzolanique entre l'argile de la ville de Soignies et la chaux ajoutée ne se produit pas. L'amélioration légère obtenue de la rigidité du sol étudié traité à la chaux peut provenir de l'amélioration de la granulométrie par le phénomène de floculation et agglomération.

Pour confirmer que les résultats inhabituels obtenus ci-dessus proviennent de la nature du sol étudié, on a utilisé une autre chaux (chaux de Bruxelles) pour la traitement. Des éprouvettes traitées à 8% de chaux sont conduites à l'essai de compression simple. En raison du manque de temps, on a seulement compressé des éprouvettes à 1 jour et à 4 jours après le traitement. Les résultats obtenus sont présentés au tableau 5.9.

TABLE 5.9 – Essai de compression simple du traitement à la chaux de Bruxelles

Éprouvette	Résistance de compression simple [Mpa]		Module d'élasticité [Mpa]	
	1 Jour	5 Jours	1 Jour	5 Jours
1	1,29	1,28	140	119,82
2	1,03	1,07	86,62	79,35
Moyenne	1,16	1,18	113,31	99,59

On trouve que le changement de la résistance en compression simple est négligeable après

5 jours de maturation, tandis que le module d'élasticité diminue significativement. Donc on peut supposer que la réaction pouzzolanique ne se produit pas encore après 5 jours de maturation. De plus, la tendance du développement de rigidité est pareil que dans le cas de notre chaux.

### 5.5.2 Essai triaxial

En raison du manque de temps, on a seulement réalisé l'essai triaxial à 21 jours après le traitement pour 3 types d'éprouvette. Des éprouvettes du sol naturel sont analysées avec le type d'essai triaxial consolidé et non-drainé (CU) pour mesurer la pression d'eau. Les paramètres de cisaillement sont présentés au tableau 5.10. Des figures présentant les calculs plus détaillés sont mises à l'annexe.

TABLE 5.10 – Essais triaxiaux des sols traités à 21 jours après le traitement

Paramètres	0% chaux	2% chaux	4% chaux	8% chaux
$c$ [KPa]	14	383	501	501
$\varphi$ [°]	23,4	26,5	26,7	33

L'évolution des paramètres  $c$  et  $\varphi$  est illustrée sur la figure 5.20. On constate que la cohésion des sols traités à la chaux augmente très fort, tandis que l'angle de frottement augmente légèrement. 8% de chaux donne une amélioration la plus significative.

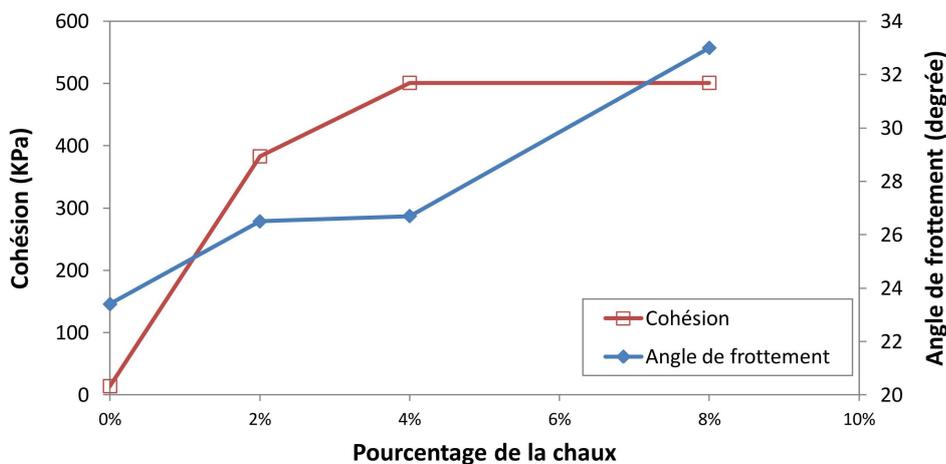


FIGURE 5.20 – Évolution des paramètres de cisaillement des sols traités à 21 jours

En général, la chaux change significativement les paramètres de cisaillement du sol, notamment pour la cohésion. Une petite quantité de chaux (par exemple 2%) peut transformer notre sol quasi non-cohérent en un sol cohésif. Cette amélioration correspond à un effet du phénomène de floculation et agglomération qui résulte de l'échange cationique.

# Chapitre 6

## Conclusion

L'étude présentée dans ce travail a pour objectif d'évaluer l'efficacité du traitement à la chaux pour un type de sol (argile de Soignies) de la ville de Soignies, Belgique. Pour ce faire, un travail expérimental comprenant une série d'essais a été examiné. Les résultats expérimentaux sont résumés ci-dessous :

1. L'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie a permis de classer notre sol dans le groupe  $A_2$  - sable argileux ou limon argileux dans la norme NF P11-300.
2. La consommation initiale de la chaux est estimée par les limites d'Atterberg, le pH du mélange et la quantité de chaux libre. Basant sur les résultats de ces mesures, on a proposé 4% de chaux qui est la consommation initiale de la chaux du sol étudié. En outre, le pH de 3 du sol naturel présente une quantité importante d'acide dans le sol.
3. Des caractéristiques de compactage au Proctor modifié et valeurs de l'IPI ont été déterminées pour le sol naturel et pour les sols traités aux trois différents pourcentages de chaux : 2%, 4% et 8%. Ce sont des pourcentages de chaux utilisés pour évaluer la qualité du traitement. Les résultats obtenus étaient en accord avec la littérature. La chaux augmente la teneur en eau optimale et diminue le poids volumique sec maximal. Elle augmente aussi les valeurs de l'IPI après le traitement.
4. Le phénomène de floculation et agglomération caractérisant la réaction de la chaux et du sol à court-terme était bien observé par l'analyse granulométrique. La chaux améliore la courbe granulométrique du sol en augmentant la proportion de gros grains et diminuant la quantité de petites grains. Des changements dans la composition minéralogique observés par l'analyse diffraction des rayons X présentent la diminution faible des minéraux argileux et l'augmentation de gypse avec la présence négligeable de porlandites.
5. L'évolution de la rigidité du sol après le traitement est examinée par les essais de compression simple et triaxiaux. Pour les essais de compression simple, des relations rigidité - temps de cure et rigidité - chaux ajoutée sont établies. Ces relations sont vraiment surprenantes en comparaison avec la littérature. À savoir, la rigidité du sol traité diminue significativement après 7 jours et augmente légèrement jusqu'à 28 jours de cure. Tandis que 4% de chaux ajoutée réduit fortement la rigidité du sol et 8% de chaux améliore faiblement le sol étudié après 28 jours de cure.

Ces résultats nous permettent de supposer que le sol initial est constitué d'une quantité importante d'acide humique et de sulfates. Ce sont des éléments perturbateurs les plus com-

muns dans le traitement à la chaux qui sont mentionnés dans la section 3.4. Ils peuvent être des causes de l'augmentation de gypse, des fissures apparaissant sur les éprouvettes ainsi que de la diminution du pH vers des valeurs inférieure à 12 du mélange , ce qui diminue fortement la dissolution d'alumine et de silice favorisant la réaction pouzzolanique. C'est la raison pour laquelle la chaux n'améliore pas significativement notre sol après 28 jours de cure dans le développement de la rigidité.

En résumé, la chaux est inefficace pour améliorer l'argile la ville de Soignies à court terme. Cependant, des études plus longues et plus complètes sont nécessaires pour évaluer plus précisément l'efficacité à long terme du traitement à la chaux pour l'argile de Soignies comme les suivants :

- Comportement du sol traité à long terme.
- Composition chimique précise du sol naturel et du sol traité.
- Analyse DRX effectuée pour plus de pourcentage de chaux ajoutée.
- Considération de la température affectant sur le changement des caractéristiques physico-mécaniques du sol traité.

# Bibliographie

- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A. and Alcover, J.-F. [2010a], 'Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C', *Applied clay science* **50**(2), 191–198.
- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A. and Alcover, J.-F. [2010b], 'Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 50°C', *Applied clay science* **50**(2), 199–203.
- Arabi, M. and Wild, S. [1986], 'Microstructural development in cured soil-lime composites', *Journal of materials science* **21**(2), 497–503.
- Association, N. L. [2006], 'Mixture design and testing procedures for lime stabilized soil', *Technical Brief*.
- Association, N. L. et al. [2004], 'Lime-treated soil construction manual : Lime stabilization & lime modification', *National Lime Association* pp. 1–41.
- Basma, A. and Tuncer, E. [1991], 'Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays', *Transportation research record* (1295).
- Bell, F. [1989], 'Lime stabilisation of clay soils', *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* **39**(1), 67–74.
- Bell, F. [1996], 'Lime stabilization of clay minerals and soils', *Engineering geology* **42**(4), 223–237.
- Boardman, D., Glendinning, S. and Rogers, C. [2001], 'Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes', *Geotechnique* **51**(6), 533–543.
- Boski, T., Pessoa, J., Pedro, P., Thorez, J., Dias, J. and Hall, I. [1998], 'Factors governing abundance of hydrolyzable amino acids in the sediments from the nw european continental margin', *Progress in oceanography* **42**(1), 145–164.
- 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, PhD thesis, Ph. D. These, Docteur de l'Université Jean Monnet et de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de St-Etienne, France.
- Chew, S., Kamruzzaman, A. and Lee, F. [2004], 'Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays', *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* **130**(7), 696–706.
- 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* **2**(3), 215–232.
- Clare, K. and Cruchley, A. [1957], '\* laboratory experiments in the stabilization of clays with hydrated lime', *Geotechnique* **7**(2), 97–111.

- Collin, C. [2003], Un code de bonne pratique belge pour l'amélioration des terres, Technical report, Centre de Recherche Routière (CRR).
- CRR [2010], 'Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques recommandations', *CRR R81/10. Centre de Recherches Routières, Bruxelles*.
- 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* **117**(3), 229–235.
- Dallas, N. L. [2000], 'Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates'.
- Dash, S. K. and Hussain, M. [2011], 'Lime stabilization of soils : Reappraisal', *Journal of Materials in Civil Engineering* **24**(6), 707–714.
- Diamond, S., White, J. L. and Dolch, W. L. [1963], 'Transformation of clay minerals by calcium hydroxide attack : Technical paper'.
- Eades, J. L. and Grim, R. E. [1960], 'Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization', *Highway Research Board Bulletin*.
- Eades, J. L. and Grim, R. E. [1966], 'A quick test to determine lime requirements for lime stabilization', *Highway research record*.
- Gaily, A. H. M. [2012], 'Engineering behavior of lime treated high sulfate soils'.
- Guney, Y., Sari, D., Cetin, M. and Tuncan, M. [2007], 'Impact of cyclic wetting–drying on swelling behavior of lime-stabilized soil', *Building and Environment* **42**(2), 681–688.
- Harvey, O. R., Harris, J. P., Herbert, B. E., Stiffler, E. A. and Haney, S. P. [2010], 'Natural organic matter and the formation of calcium-silicate-hydrates in lime-stabilized smectites : A thermal analysis study', *Thermochimica Acta* **505**(1), 106–113.
- Hilt, G. H. and Davidson, D. [1960], 'Lime fixation in clayey soils', *Highway Research Board Bulletin*.
- Hunter, D. [1988], 'Lime-induced heave in sulfate-bearing clay soils', *Journal of geotechnical engineering* **114**(2), 150–167.
- Ingles, O. G. and Metcalf, J. B. [1972], Soil stabilization principles and practice, Technical report.
- Kavak, A. and Akyarlı, A. [2007], 'A field application for lime stabilization', *Environmental Geology* **51**(6), 987–997.
- Kavak, A. and Baykal, G. [2012], 'Long-term behavior of lime-stabilized kaolinite clay', *Environmental Earth Sciences* pp. 1–13.
- Khatab, S., Al-Mukhtar, M. and Fleureau, J.-M. [2007], 'Long-term stability characteristics of a lime-treated plastic soil', *Journal of materials in civil engineering* **19**(4), 358–366.
- Kota, P. B., Hazlett, D. and Perrin, L. [1996], 'Sulfate-bearing soils : problems with calcium-based stabilizers', *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* **1546**(1), 62–69.
- Le Borgne, T. [2010], Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL.

- Little, D. N. [1995], *Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime*.
- Little, D. N., Nair, S. and Herbert, B. [2009], 'Addressing sulfate-induced heave in lime treated soils', *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* **136**(1), 110–118.
- Locat, J., Bérubé, M.-A. and Choquette, M. [1990], 'Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays : shear strength development', *Canadian Geotechnical Journal* **27**(3), 294–304.
- Marcoen, J. M., Tessier, D., Thorez, J., Monjoie, A. and Schroeder, C. [2000], 'Manuel relatif aux matières naturelles pour barrières argileuses ouvragées pour cet (centres d'enfouissement technique) et réhabilitation de dépotoirs en région wallonne.'
- McDowell, C. [1959], 'Stabilization of soils with lime, lime-flyash, and other lime reactive materials', *Highway Research Board Bulletin* .
- McNally, G. H. [1998], *Soil and rock construction materials*, CRC PressI Llc.
- Mitchell, J. K., Soga, K. et al. [1976], *Fundamentals of soil behavior*, Wiley New York.
- Molard, J., Camps, J. and Laquerbe, M. [1987], 'Etude de l'extrusion et de la stabilisation par le ciment d'argiles monominérales', *Materials and Structures* **20**, 44–50.
- Muntohar, A. S. [2005], 'The influence of molding water content and lime content on the strength of stabilized soil with lime and rice husk ash', *Civil Engineering Dimension* **7**(1), pp–1.
- Osinubi, K. J. [1998a], 'Influence of compactive efforts and compaction delays on lime-treated soil', *Journal of transportation engineering* **124**(2), 149–155.
- Osinubi, K. J. [1998b], 'Permeability of lime-treated lateritic soil', *Journal of transportation engineering* **124**(5), 465–469.
- Osula, D. [1996], 'A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite', *Engineering Geology* **42**(1), 71–81.
- Prusinski, J. R. and Bhattacharja, S. [1999], 'Effectiveness of portland cement and lime in stabilizing clay soils', *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* **1652**(1), 215–227.
- Rajasekaran, G. [2005], 'Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays', *Ocean engineering* **32**(8), 1133–1159.
- Rao, S. M. and Shivananda, P. [2005], 'Role of curing temperature in progress of lime-soil reactions', *Geotechnical and Geological Engineering* **23**(1), 79–85.
- Rao, S. N. and Rajasekaran, G. [1996], 'Reaction products formed in lime-stabilized marine clays', *Journal of geotechnical engineering* **122**(5), 329–336.
- Rogers, C. D. and Glendinning, S. [2000], 'Lime requirement for stabilization', *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* **1721**(1), 9–18.
- Rou [2004], *Le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques pour l'exécution des remblais et des couches de forme*, l'industrie cimentière française edn.
- Saussaye, L. [2012], *Traitement des sols aux liants hydrauliques : aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification*, PhD thesis, Université de Caen.

- Sherwood, P. [1993], *Soil stabilization with cement and lime*.
- Stoltz, G., Cuisinier, O., Masrouri, F., Anagnostopoulos, A., Pachakis, M., Tsatsanifos, C. et al. [2011], Influence of wetting and drying cycles on the hydromechanical behaviour of a lime treated expansive clayey soil., *in* 'Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Geotechnics of hard soils-weak rocks. Part 1 to 3.', IOS Press, pp. 671–676.
- Tang, A.-M., Vu, M., Cui, Y.-J. et al. [2011], 'Effects of the maximum soil aggregates size and cyclic wetting-drying on the stiffness of a lime-treated clayey soil', *Géotechnique* **61**(5), 421–429.
- Thagesen, B. [1996], 'Tropical rocks and soils', *Highway and traffic engineering in developing countries : B*, Thagesen, ed. Chapman and Hall, London .
- Tremblay, H., Duchesne, J., Locat, J. and Leroueil, S. [2002], 'Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement', *Canadian geotechnical journal* **39**(3), 535–546.
- Venstermans, D., Guelton, B. and Verfaillie, D. M. J. [2001], Amélioration des sols à la chaux, *in* 'Bulletin CRR - Numéro 47'.

# Annexe

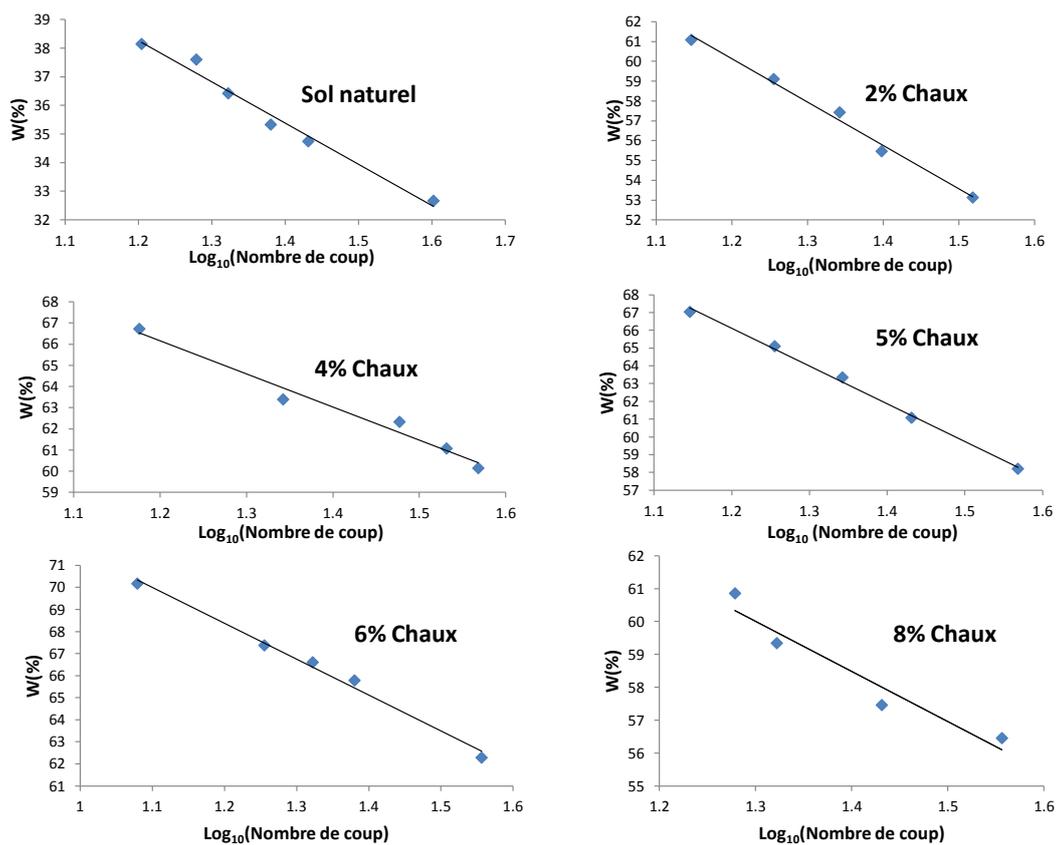


FIGURE 6.1 – Détermination des limites de liquidité des sols traités à la chaux

TABLE 6.1 – Résultats des mesures du pH du sol selon la méthode d'Eades et Grim

Chaux ajoutée [%]	Valeur pH [–]
0	3
2	11,18
3	12,17
4	12,40
5	12,42
6	12,44
7	12,45
Chaux propre	12,55

TABLE 6.2 – Essai Proctor du sol naturel

<b>Détermination des W</b>						
W estimée	4%	6%	8%	10%	13%	16%
$P_h + T$ [g]	3450	4955	4300	5172	4356	5051
$P_s + T$ [g]	3239.7	4581	3904.8	4627	3808	4346
T [g]	265.5	272.5	265	265	265.5	272.5
W [%]	7.07	8.68	10.86	12.50	15.47	17.31
<b>Détermination des <math>\rho_d</math></b>						
$P_h + T$ [g]	14649	15039	15309	15234	15283	15106
T [g]	10321	10321	10321	10321	10321	10321
$P_h$ [g]	4328	4718	4988	4913	4962	4785
V [ $dm^3$ ]	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32
$\rho$ [ $kg/m_3$ ]	1865.5	2033.6	2150.0	2117.7	2138.8	2062.5
$\rho_d$ [ $kg/m^3$ ]	1742.3	1871.2	1939.4	1882.5	1852.3	1758.2

TABLE 6.3 – Essai Proctor du sol traité à 2% de chaux

<b>Détermination des W</b>					
W estimée	8%	10%	12%	14%	16%
$P_h + T$ [g]	1317.8	2966.5	5069.0	2741.6	2212.4
$P_s + T$ [g]	1223.4	2683.2	4474.0	2401.8	1911.3
T [g]	265.0	272.5	271.0	265.5	273.1
W [%]	9.85	11.75	14.16	15.91	18.38
<b>Détermination des <math>\rho_d</math></b>					
$P_h + T$ [g]	14862	14998	15133	15143	15121
T [g]	10321	10321	10321	10321	10321
$P_h$ [g]	4541	4677	4812	4822	4800
V [ $dm^3$ ]	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32
$\rho$ [ $kg/m_3$ ]	1957.3	2015.9	2074.1	2078.4	2069.0
$\rho_d$ [ $kg/m^3$ ]	1781.8	1804.0	1816.9	1793.2	1747.7

TABLE 6.4 – Essai Proctor du sol traité à 4% de chaux

<b>Détermination des W</b>						
W estimée	8%	10%	12%	14%	16%	18%
$P_h + T$ [g]	3605.5	3661.4	3428.2	3468.9	2285.4	2836
$P_s + T$ [g]	3317.7	3329.3	3075	3043.5	1987	2432
T [g]	261.6	262.6	265	246.1	230.8	272.5
W [%]	9.42	10.83	12.57	15.21	16.99	18.71
<b>Détermination des <math>\rho_d</math></b>						
$P_h + T$ [g]	14652	14790	14991	1502.6	15070	15112
T [g]	10321	10321	10321	10321	10321	10321
$P_h$ [g]	4331	4469	4670	4705	4749	4791
V [ $dm^3$ ]	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32
$\rho$ [ $kg/m_3$ ]	1866.8	1926.3	2012.9	2028.0	2047.0	2065.1
$\rho_d$ [ $kg/m^3$ ]	1706.1	1738.1	1788.2	1760.3	1749.7	1739.6

TABLE 6.5 – Essai Proctor du sol traité à 8% de chaux

<b>Détermination des W</b>					
W estimée	12%	14%	16%	18%	20%
$P_h + T$ [g]	3306.4	3461.7	3223.9	3145.7	2799.6
$P_s + T$ [g]	3007.5	3105.2	2852.9	2739.2	2424.8
T [g]	262.6	261.6	265	272.6	230.8
W [%]	10.89	12.54	14.34	16.48	17.08
<b>Détermination des <math>\rho_d</math></b>					
$P_h + T$ [g]	14682	14830	14970	14961	14989
T [g]	10321	10321	10321	10321	10321
$P_h$ [g]	4361	4509	4649	4640	4668
V [ $dm^3$ ]	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32
$\rho$ [ $kg/m^3$ ]	1879.7	1943.5	2003.9	2000.0	2012.1
$\rho_d$ [ $kg/m^3$ ]	1695.2	1727.0	1752.6	1717.0	1718.5

TABLE 6.6 – Essai CBR immédiat du sol naturel

Pénétration [mm]	$P_{standard}$ [MPa]	4% Eau [MPa]	6% Eau [MPa]	8% Eau [MPa]	10% Eau [MPa]	13% Eau [MPa]	16% Eau [MPa]
0.63		1.04	0.08	0.14	0.16	0.11	0.11
1.27		2.68	0.27	1.18	1.06	0.41	0.14
1.9		3.90	1.88	2.79	1.82	0.71	0.21
2.54	6.89	4.70	3.57	4.29	2.41	0.95	0.28
5.08	10.33	6.79	7.13	7.50	3.87	1.63	0.47
7.62	13.08	8.29	9.09	9.14	4.81	2.10	0.60
10.16	15.83	9.55	10.69	10.48	5.51	2.43	0.71
12.7	17.9	10.72	12.09	11.63	6.01	2.62	0.77

TABLE 6.7 – CBR immédiat du sol traité à 2% de la chaux

Pénétration [mm]	$P_{standard}$ [MPa]	8% Eau [MPa]	10% Eau [MPa]	12% Eau [MPa]	14% Eau [MPa]	16% Eau [MPa]
0.63		0.71	1.52	1.22	0.96	0.80
1.27		2.08	3.44	3.08	2.08	1.55
1.9		3.68	4.89	4.42	2.84	2.07
2.54	6.89	4.91	5.87	5.37	3.44	2.45
5.08	10.33	7.77	8.27	7.69	5.02	3.49
7.62	13.08	9.63	9.93	9.33	6.19	4.31
10.16	15.83	11.25	11.36	10.76	7.18	5.00
12.7	17.9	12.75	12.72	12.07	8.00	5.62

TABLE 6.8 – CBR immédiat du sol traité à 4% de chaux

Pénétration [mm]	$P_{standard}$ [MPa]	8% Eau [MPa]	10% Eau [MPa]	12% Eau [MPa]	14% Eau [MPa]	16% Eau [MPa]	18% Eau [MPa]
0.63		1.01	0.79	1.17	0.79	0.49	0.79
1.27		2.54	2.45	2.81	2.53	1.80	1.45
1.9		3.63	4.04	4.34	3.80	2.54	1.94
2.54	6.89	4.34	5.24	5.29	4.67	3.09	2.32
5.08	10.33	6.19	8.21	7.86	6.80	4.70	3.52
7.62	13.08	7.67	10.16	9.71	8.33	5.92	4.48
10.16	15.83	9.01	11.79	11.32	9.66	7.01	5.30
12.7	17.9	10.29	13.23	12.78	10.89	7.94	6.08

TABLE 6.9 – CBR immédiat du sol traité à 8% de la chaux

Pénétration [mm]	$P_{standard}$ [MPa]	12% Eau [MPa]	14% Eau [MPa]	16% Eau [MPa]	18% Eau [MPa]	20% Eau [MPa]
0.63		1.34	1.40	0.95	1.10	1.18
1.27		3.33	3.24	2.53	2.43	2.29
1.9		4.77	4.58	3.91	3.47	3.09
2.54	6.89	5.76	5.84	4.97	4.18	3.65
5.08	10.33	8.32	7.77	7.65	6.19	5.19
7.62	13.08	10.18	9.47	9.53	7.70	6.30
10.16	15.83	11.71	11.00	11.13	8.98	7.26
12.7	17.9	13.26	12.39	12.55	10.12	8.14

TABLE 6.10 – Essai de titrage à l'HCl 0,1N

Chaux [%]	$v_{HCL}$ (ml)			$m_2$ (g)			CaO libre (%)		
	1 jour	7 jours	28 jours	1 jour	7 jours	28 jours	1 jour	7 jours	28 jours
2	17.6	3.3	50.2	0.05	0.01	0.14	0.34	0.06	0.97
4	71	92	39	0.20	0.26	0.11	1.37	1.78	0.75
8	185	192	167	0.52	0.54	0.47	3.58	3.71	3.23

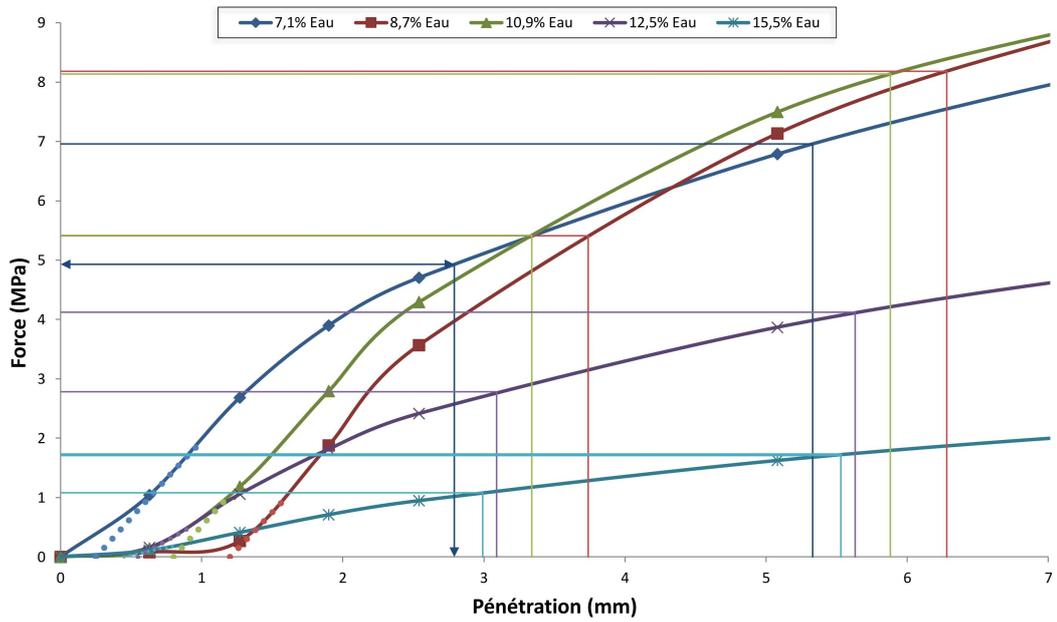


FIGURE 6.2 – Courbes de l'essai CBR immédiat du sol naturel

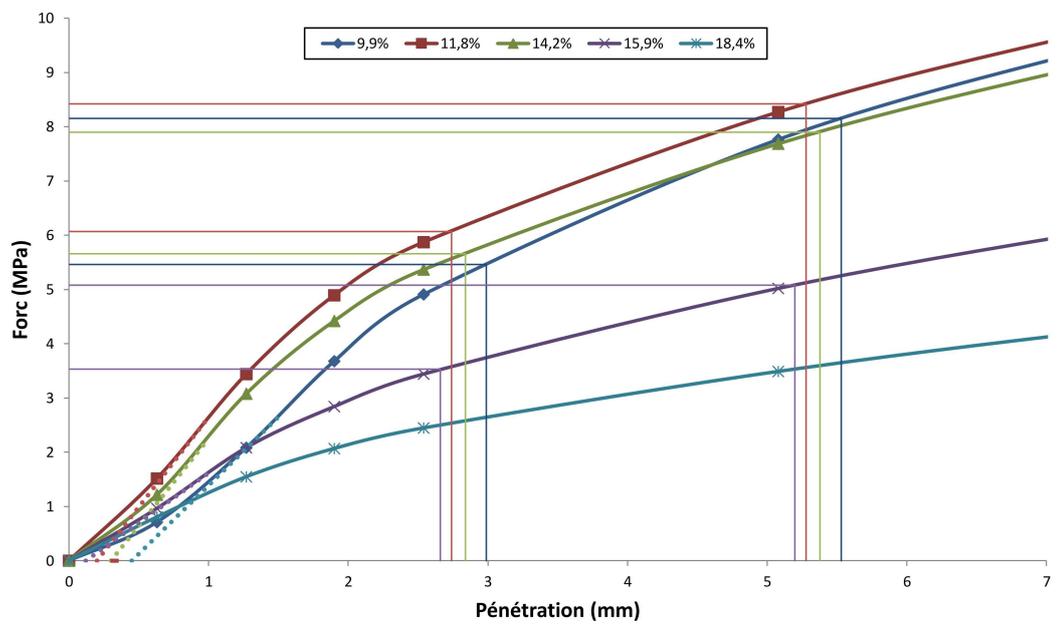


FIGURE 6.3 – Courbes de l'essai CBR immédiat du sol traité à 2% de chaux

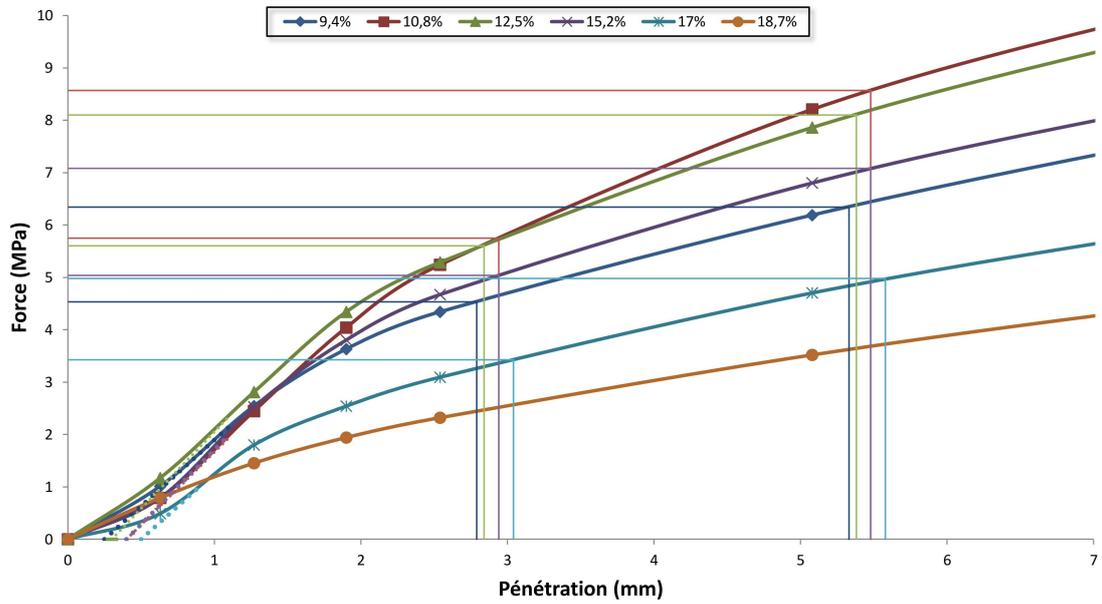


FIGURE 6.4 – Courbes de l'essai CBR immédiat du sol traité à 4% de chaux

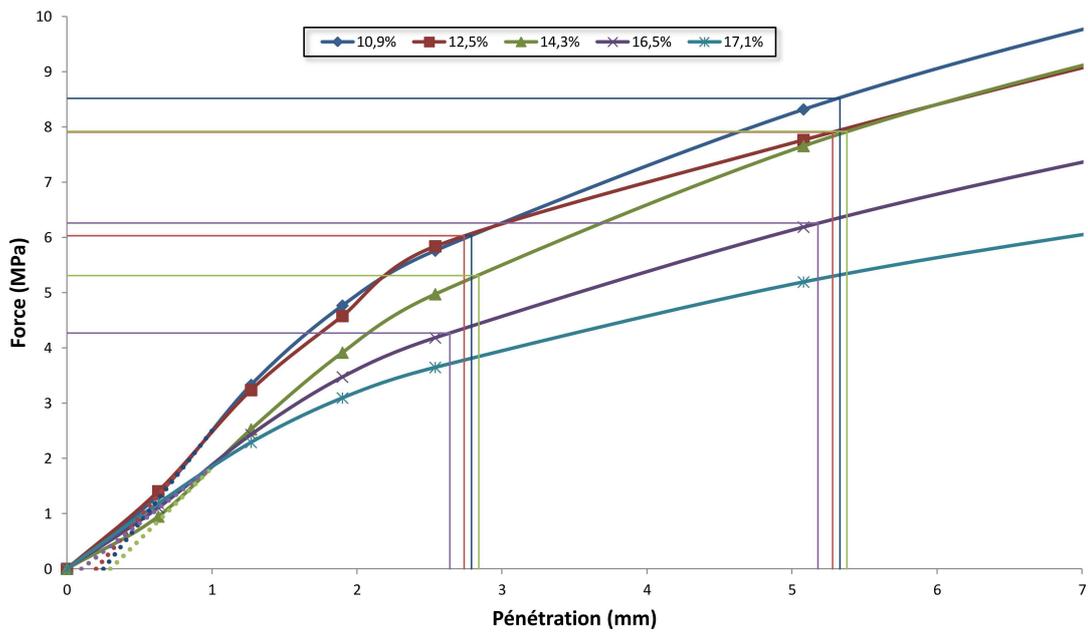


FIGURE 6.5 – Courbes de l'essai CBR immédiat du sol traité à 8% de chaux

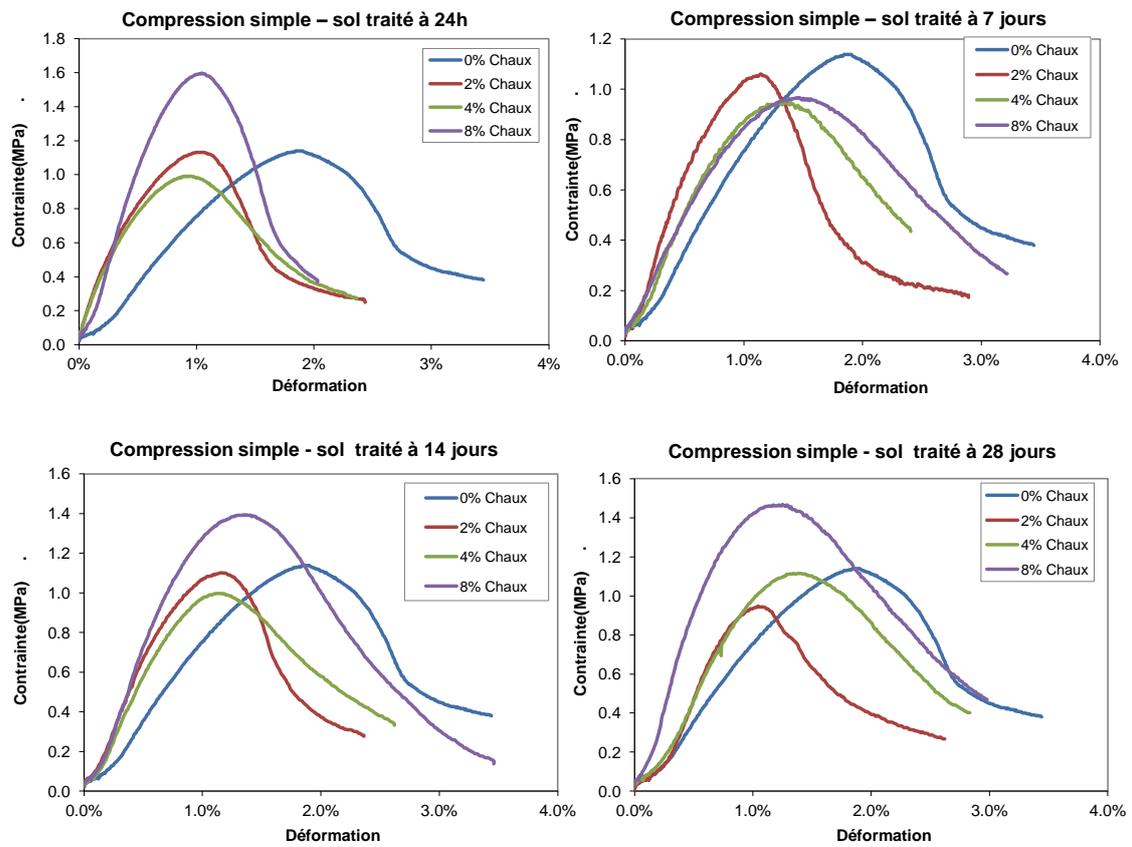


FIGURE 6.6 – Essais de compression simple des sols