



HAL
open science

**Durabilité du limon de Jossigny traité à la chaux et
soumis à différentes sollicitations hydriques :
comportements hydraulique, microstructural et
mécanique**

Barbara Le Runigo

► **To cite this version:**

Barbara Le Runigo. Durabilité du limon de Jossigny traité à la chaux et soumis à différentes sollicitations hydriques : comportements hydraulique, microstructural et mécanique. Mécanique des solides [physics.class-ph]. Ecole Centrale de Nantes (ECN)/ Université de Nantes, 2008. Français. NNT : . tel-00962599

HAL Id: tel-00962599

<https://theses.hal.science/tel-00962599>

Submitted on 23 Feb 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE DOCTORALE

SCIENCES POUR L'INGENIEUR GEOSCIENCES ARCHITECTURE (0367) EX M.T.GC

Année 2008

N° B.U. :

Thèse de DOCTORAT

*Diplôme délivré conjointement par
L'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes*

Spécialité : GÉNIE CIVIL

Présentée et soutenue publiquement par :

BARBARA – LE RUNIGO

le 23 Octobre 2008

au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Bouguenais

TITRE

**DURABILITÉ DU LIMON DE JOSSIGNY TRAITÉ À LA CHAUX ET
SOU MIS À DIFFÉRENTES SOL LICITATIONS HYDRIQUES :
COMPORTEMENTS HYDRAULIQUE, MICROSTRUCTURAL ET
MÉCANIQUE**

JURY

Jean-Marie FLEUREAU (rapporteur)

Frédéric VILLIERAS (rapporteur)

Pierre-Yves HICHER (examineur)

Daniel PUIATTI (examineur)

Directeur de thèse : Yu-Jun CUI

Laboratoire : École Nationale des Ponts et Chaussées, UR Navier - CERMES

Co-encadrants : Olivier CUISINIER, Dimitri DENELE, Valéry FERBER

Laboratoire : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

N° ED 0367

Résumé en français

La pérennité des améliorations apportées par la chaux à un sol limoneux utilisé pour la construction d'ouvrages hydrauliques ou de remblais en zone inondable vis-à-vis des sollicitations hydriques auxquelles ces derniers peuvent être soumis (immersion, circulation d'eau) est encore débattue. Dans ce contexte, ce travail s'est attaché à simuler expérimentalement puis à décrire l'effet de ces sollicitations sur les propriétés géotechniques d'un sol limoneux compacté traité à la chaux (perméabilité, résistance mécanique).

Il a été établi que le maintien des améliorations mécaniques est fortement lié à la perméabilité des sols : plus leur perméabilité est forte, plus les pertes de performances mécaniques sont rapides. Ces pertes de performances peuvent être attribuées à une dissolution partielle de la chaux non consommée mais aussi à la décalcification des produits cimentaires formés suite à l'ajout de chaux. L'ampleur de ces processus s'avère être une fonction de la perméabilité, une forte perméabilité les accélérant à l'inverse d'une faible perméabilité.

Enfin, une étude a été conduite sur l'effet des conditions initiales sur la microstructure et la perméabilité des sols traités à la chaux afin de déterminer les états initiaux à privilégier en terme de durabilité. Il a été montré que l'ajout d'un faible dosage en chaux et qu'un compactage à une faible énergie pouvait induire, au contraire d'un fort dosage et d'un compactage du côté humide, de fortes perméabilités. Ainsi, un fort dosage en chaux et un compactage du côté humide pourraient permettre de maintenir dans le temps les améliorations apportées par la chaux aux sols limoneux exposés à des sollicitations hydriques.

Mots-clés : limon de Jossigny, traitement à la chaux, durabilité, sollicitations hydriques, physico-chimie, comportements mécanique, hydraulique et microstructural.

Titre et résumé en anglais

DURABILITY OF THE LIME-TREATED JOSSIGNY SILT UNDER DIFFERENT HYDRAULIC STRESSES:

Assessment of the mechanical, hydraulic, microstructural behaviour

The effects of the different hydraulic stresses (i.e. immersion and water circulation) to which lime-treated silty soil can be exposed to when used for the construction of hydraulic earth structures or embankments situated in areas liable to flooding, on the durability of the improvements brought by lime is still uncertain. In this context, the present work aimed at experimentally simulating and assessing the effects of such stresses on the geotechnical properties of a compacted lime-treated silty soil (permeability, mechanical performance).

It was established that the maintenance of the mechanical improvements is highly related to the soil permeability: the higher the permeability, the higher and the faster the loss of mechanical performances. The decrease in mechanical performances can be attributed to the partial dissolution of unconsumed lime, but also to the decalcification of the cementitious compounds formed after the addition of lime. The extent of these physico-chemical processes is a function of the soil permeability, a high permeability fastening them in contrast to a low permeability.

Finally, a study was conducted on the effect of initial conditions on the soil fabric and permeability so as to determine the initial states to favour in term of durability. It was demonstrated that the addition of low lime contents and that compaction at a low energy can entail, in contrast to the use of high lime contents and compaction on the wet side, a strong permeability. To conclude, high lime contents as well as compaction on the wet side appear as means to maintain at longer term the mechanical performances of lime-treated silty soils exposed to hydraulic stresses.

Key-words: Jossigny silt, lime stabilization, durability, hydraulic stresses, physico-chemistry, mechanical, hydraulic and microtextural behaviour.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I – COMPORTEMENT DES SOLS TRAITÉS À LA CHAUX ET SOUMIS À UNE CIRCULATION D’EAU : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	4
I.1. Introduction.....	4
I.2. Les sols dans les terrassements	4
<i>I.2.1. Introduction</i>	<i>4</i>
<i>I.2.2. Les minéraux argileux.....</i>	<i>5</i>
<i>I.2.3. Charges des surfaces argileuses et notion de double couche.....</i>	<i>6</i>
I.2.3.1 Charges des surfaces argileuses	6
I.2.3.2 Théorie de la double couche	6
<i>I.2.4. Capacité d’échange cationique</i>	<i>7</i>
I.3. Traitement des sols à la chaux : principes d’action.....	8
<i>I.3.1. Processus physico-chimiques induits par la présence de chaux.....</i>	<i>8</i>
I.3.1.1. Hydratation et ionisation de la chaux.....	8
I.3.1.2. Échanges cationiques	9
I.3.1.3. Réactions pouzzolaniques	10
a) Principe général.....	10
b) Conditions d’initiation des réactions pouzzolaniques	12
I.3.1.4. Carbonatation.....	13
<i>I.3.2. Effets des processus physico-chimiques induits par la chaux sur les propriétés des sols.....</i>	<i>14</i>
I.3.2.1. Effets sur les propriétés des sols traités avant compactage.....	14
a) Floculation/agrégation des particules argileuses.....	14
b) Modification de la capacité d’échange cationique	15
c) Modification des limites d’Atterberg.....	15
d) Modification de la granulométrie	16
I.3.2.2. Effets sur les propriétés de compactage des sols traités	17
I.4. Modifications des propriétés des sols traités à la chaux après compactage	17

<i>1.4.1. Effets de la chaux sur la microstructure des sols après compactage</i>	18
I.4.1.1. Effets à court terme de la chaux sur la microstructure des sols après compactage.....	18
I.4.1.2. Effets à long terme de la chaux sur la microstructure des sols après compactage.....	18
I.4.1.3. Effets des conditions de compactage sur la microstructure des sols après compactage.....	19
I.4.1.4. Conclusion	21
<i>1.4.2. Effets de la chaux sur les caractéristiques mécaniques</i>	21
I.4.2.1. Résistance à la compression.....	22
a) <i>États des connaissances</i>	22
b) <i>Conclusion</i>	25
I.4.2.2. Résistance au cisaillement	25
a) <i>États des connaissances</i>	25
b) <i>Conclusion</i>	28
<i>1.4.3. Effets de la chaux sur la perméabilité des sols</i>	29
I.4.3.1. Effets de la chaux sur la perméabilité des sols compactés.....	29
I.4.3.2. Effets de l'état initial des sols traités à la chaux sur leur perméabilité	30
I.4.3.3. Conclusion	32
I.5. Effets d'une circulation d'eau sur le comportement physico-chimique, mécanique et hydraulique des sols traités à la chaux	33
<i>1.5.1. Introduction</i>	33
<i>1.5.2. Analogie ciments et sols traités à la chaux soumis à une circulation d'eau</i>	34
I.5.2.1. Mécanisme d'hydrolyse et stabilité des composés cimentaires	34
I.5.2.2. Effets de la circulation d'eau sur la porosité et la résistance à la compression des ciments	36
a) <i>Effet de la circulation d'eau sur la porosité des ciments</i>	36
b) <i>Effet de la circulation d'eau sur la résistance à la compression simple des ciments</i>	36
I.5.2.3. Conclusion	37
<i>1.5.3. Comportement physico-chimique, mécanique et hydraulique des sols traités à la chaux soumis à une circulation d'eau</i>	38
I.5.3.1. Matériaux et méthodes expérimentales pour simuler les circulations d'eau ...	39
a) <i>Matériaux</i>	39

<i>b) Méthodes expérimentales</i>	40
I.5.3.2. Effets d'une circulation d'eau sur le comportement physico-chimique des sols traités à la chaux	41
I.5.3.3 Effets d'une circulation d'eau sur le comportement géotechnique des sols traités à la chaux	45
<i>a) Évolution des propriétés mécaniques des sols traités</i>	45
<i>b) Évolution de la perméabilité des sols traités</i>	47
I.6. Conclusion	48
CHAPITRE II – MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES	50
II.1. Matériaux	50
<i>II.1.1. Chaux</i>	50
<i>II.1.2. Sol</i>	50
<i>II.1.3. Préparation, compactage et caractéristiques des éprouvettes de sol non traité et traité</i>	52
II.2. Procédures expérimentales	57
<i>II.2.2. Sollicitations étudiées</i>	57
II.2.2.1. Contact à l'eau	57
II.2.2.2. Circulation d'eau	58
<i>II.2.3. Suivi du comportement physico-chimique, microstructural et géotechnique</i>	61
II.2.3.1. Analyses physico-chimiques	61
II.2.3.2. Essais de caractérisation de la microstructure	64
II.2.3.3. Essais géotechniques	66
CHAPITRE III – COMPORTEMENT PHYSICO-CHIMIQUE DU LIMON DE JOSSIGNY TRAITÉ À LA CHAUX ET SOUMIS À UNE CIRCULATION D'EAU ...	69
III.1. Présentation de l'article	69
III.2. Conclusion	95
CHAPITRE IV – MICROSTRUCTURE ET COMPORTEMENT HYDRAULIQUE DU LIMON DE JOSSIGNY TRAITÉ À LA CHAUX ET SOUMIS À UNE CIRCULATION D'EAU	98
IV.1. Introduction	98
IV.2. Observations au microscope électronique à balayage	99

IV.3. Article 2	102
IV.3. Conclusion	133
 CHAPITRE V – COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU LIMON DE JOSSIGNY TRAITÉ À LA CHAUX ET SOUMIS À DIFFÉRENTES SOLlicitATIONS HYDRIQUES	
137	137
V.1. Présentation de l'article	137
V.2. Conclusion	162
 CHAPITRE VI – SYNTHÈSE : OPTIMISATION DU TRAITEMENT À LA CHAUX DES SOLS LIMONEUX À COURT ET LONG TERME	
165	165
VI.1. Effets du dosage en chaux et des conditions de compactage sur l'efficacité du traitement à court terme	166
VI.1.1. Effets du dosage en chaux	166
VI.1.1.1. Performances mécaniques.....	166
VI.1.1.2. Perméabilité	168
VI.1.2. Effets des conditions de compactage	170
VI.1.2.1. Performances mécaniques.....	170
VI.1.2.2. Perméabilité	171
VI.1.3. Conclusion	172
VI.2. Effets du dosage en chaux et des conditions de compactage sur la durabilité du traitement à la chaux	173
VI.2.1. Immersion	173
VI.2.2. Circulation d'eau	174
VI.2.2.1. Lien entre durabilité et processus physico-chimiques	174
VI.2.2.1. Effets du dosage en chaux.....	176
VI.2.2.1. Effets des conditions de compactage	179
VI.2.3. Conclusion	179
VI.3. Conclusion	180
VI.3. Conclusion	181
 CONCLUSION GÉNÉRALE	182
 BIBLIOGRAPHIE	186

Introduction générale

La mise en œuvre des sols pour la construction d'ouvrages en terre (remblais ou encore ouvrages hydrauliques tels que les digues ou barrages) est marquée par une étape de compactage. Cette étape a pour but d'augmenter la densité du matériau (c'est-à-dire réduire l'indice des vides du matériau) et par le même biais ses performances mécaniques. Elle permet, par ailleurs, de limiter les déformations pouvant intervenir à long terme dans les ouvrages.

La mise en œuvre des sols fins est souvent rendue difficile par leur forte humidité et/ou leur forte argilosité. Dans ces cas là, les sols fins ont longtemps été substitués par des matériaux dits « nobles » (matériaux présentant de bonnes caractéristiques mécaniques tels que les granulats). Toutefois, cette logique n'est plus en adéquation avec les exigences du développement durable. En effet, le domaine des terrassements est aujourd'hui marqué par un besoin croissant de réutiliser les matériaux rencontrés dans l'emprise même des projets, ce quels que soient leur nature et état, de façon à respecter l'objectif « zéro emprunt, zéro déchet ». Le traitement à la chaux apparaît comme une des techniques permettant de pallier, suite au développement de différents processus physico-chimiques, les faibles caractéristiques mécaniques et la mauvaise maniabilité présentées par les sols fins.

Bien que cette technique d'amélioration soit, en France, largement utilisée pour la construction d'ouvrages en terre courants, de nombreuses questions persistent quant à l'utilisation de ces sols traités à la chaux pour la construction d'ouvrages hydrauliques (barrages, digues, berges de canaux, etc.) ou de remblais en zone inondable. En effet, la fonction première des ouvrages hydrauliques étant de retenir l'eau, il apparaît nécessaire de s'assurer que ces sols présentent, une fois traités à la chaux et compactés, une perméabilité suffisamment faible. Or l'effet de la chaux sur la perméabilité de ces sols reste mal connu. Par ailleurs, la pérennité de ces ouvrages construits en sols traités à la chaux reste aussi sujette à de nombreuses interrogations. En effet, ceux-ci sont soumis, une fois construits, à différentes sollicitations, et notamment à des sollicitations hydriques telles que des contacts prolongés à l'eau, voire des circulations d'eau. Bien que les améliorations mécaniques apportées par la chaux semblent suffisantes pour que l'utilisation de ces sols soit envisagée pour la construction de tels ouvrages, les effets à long terme de ces sollicitations sur leurs

performances mécaniques restent mal connus. Par ailleurs, l'évolution de leur perméabilité dans le temps suite à ces sollicitations reste aussi sujette à discussion.

Dans ce contexte, les principaux objectifs de ce travail de recherche sont de préciser l'effet de la chaux sur la perméabilité des sols, mais surtout, d'évaluer la durabilité du traitement à la chaux, et donc l'évolution des performances mécaniques et de la perméabilité des sols limoneux traités à la chaux, face à de telles sollicitations hydriques. Pour ce faire, ce travail a été abordé en étudiant les relations entre comportement physico-chimique, microstructural et géotechnique. En effet, il a paru indispensable de ne pas dissocier ces trois aspects pour expliquer de façon globale l'évolution du comportement des sols limoneux traités à la chaux face à un contact prolongé à l'eau ou à une circulation d'eau.

Le premier chapitre donne un aperçu des connaissances actuelles sur le traitement à la chaux. La première partie de ce chapitre rappelle les principaux mécanismes physico-chimiques à l'origine de l'amélioration des sols traités à la chaux ainsi que leur influence sur leurs propriétés géotechniques et microstructurales avant et après compactage. Ce chapitre consiste ensuite en une revue des principaux résultats existants à ce jour sur le comportement physico-chimique, microstructural et géotechnique des sols traités exposés à une circulation d'eau. Compte tenu du petit nombre d'études disponibles sur ce sujet et des analogies présentées entre un ciment et un sol traité à la chaux, le comportement des ciments face à une circulation, qui est mieux connu, est aussi abordé dans cette partie. Ceci permet de se faire une meilleure idée du comportement que pourrait présenter un sol traité à la chaux face à une circulation d'eau.

Le second chapitre est consacré à la présentation des matériaux utilisés (chaux et sol) et aux différentes conditions et procédures expérimentales employées au cours de ce travail. Ce chapitre présente également les dispositifs expérimentaux mis au point et qui ont permis, d'une part, de simuler à long terme les deux sollicitations hydriques auxquelles peuvent être soumis les ouvrages hydrauliques ou remblais construits en zone inondable (contact prolongé à l'eau et circulation d'eau), et d'autre part, de suivre le comportement hydraulique et mécanique du sol étudié traité à la chaux. Ce chapitre est aussi l'occasion de présenter les différentes techniques d'essais et d'analyses employées au cours de ce travail pour suivre au cours de temps (avant, pendant et après sollicitations) l'évolution du comportement physico-chimique (pH et distribution du calcium dans le sol, suivi du pH et des concentrations en calcium, silicium et aluminium des lixiviats), microstructural (observations microscopiques et essais de porosimétrie au mercure), et géotechnique (perméabilité, résistances à la compression simple et au cisaillement) du sol traité.

Le troisième chapitre est dédié à l'évolution du comportement physico-chimique du sol traité à la chaux au cours d'une circulation d'eau. Les résultats obtenus et présentés dans ce chapitre sont ensuite utilisés dans les quatrième et cinquième chapitres afin d'expliquer l'origine de l'évolution du comportement microstructural, hydraulique et mécanique du sol traité à la chaux face à une circulation d'eau et à une immersion. Ces trois chapitres se présentent sous la forme d'articles en anglais soumis à différentes revues scientifiques.

Enfin, le dernier chapitre s'inscrit dans une optique d'optimisation de la réutilisation des sols limoneux traités à la chaux. L'objet de ce chapitre est de spécifier l'influence de certains paramètres pouvant être contrôlés sur chantier (dosage en chaux, conditions de compactage) sur l'efficacité du traitement à court terme, mais surtout sur sa durabilité face aux sollicitations hydriques auxquelles peuvent être soumis les ouvrages hydrauliques et remblais en zone inondable. Ce chapitre rassemble ainsi les différents résultats relatifs à ces sujets présentés de façon disparate dans les chapitres précédents, pour conclure quant aux conditions initiales à favoriser pour optimiser les effets du traitement à la chaux à court et long terme.

Chapitre I – Comportement des sols traités à la chaux et soumis à une circulation d'eau : synthèse bibliographique

I.1. INTRODUCTION

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter l'état des connaissances sur le comportement physico-chimique, mécanique et hydraulique des sols fins traités à la chaux avant, pendant, et après exposition à une circulation d'eau à long terme. Pour ce faire, on rappellera succinctement dans un premier paragraphe les principales caractéristiques des sols fins utilisés dans le domaine des terrassements. On donnera ensuite, dans une seconde partie, les principes d'action de la chaux dans les sols et les effets de la chaux sur les propriétés des sols avant compactage. On détaillera, dans une troisième partie, l'effet du traitement à la chaux sur les caractéristiques des sols après compactage. Enfin, dans une dernière partie, on présentera l'état des connaissances sur le comportement à long terme des sols traités à la chaux et soumis à une circulation d'eau.

I.2. LES SOLS DANS LES TERRASSEMENTS

I.2.1. Introduction

Les sols sont des matériaux composés de trois phases distinctes : solide (particules minérales ou organiques), liquide (eau interstitielle chargée en éléments solubles) et gazeuse. La nature minérale des constituants des sols est très variable. Les familles minérales les plus représentées sont : les silicates, représentant 95% des constituants de l'écorce terrestre, puis les carbonates, et enfin les sulfates, phosphates, sulfures, chlorures, oxydes, et métaux.

Les minéraux silicatés les plus courants sont le quartz, les feldspaths, les amphiboles, les pyroxènes et les phyllosilicates, parmi lesquels figurent les micas et les minéraux argileux. Les minéraux argileux présentent des propriétés physico-chimiques qui se démarquent très nettement des autres minéraux, ce qui explique leur influence prépondérante dans le

comportement des sols¹. Il est donc essentiel de s'intéresser à leur structure et propriétés physico-chimiques afin de mieux comprendre l'origine et le rôle des différents mécanismes physico-chimiques intervenant lors du traitement des sols à la chaux.

I.2.2. Les minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des phyllosilicates d'aluminium hydratés formés par l'association de feuillets élémentaires. Ces feuillets sont constitués de couches octaédriques, O ($\text{Al}(\text{OH})_6$), et de couches tétraédriques, T (SiO_4), reliées par des atomes d'oxygène et d'hydrogène (fig. 1).

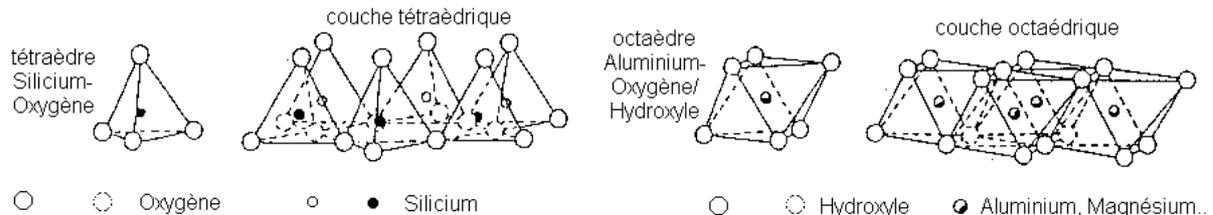


Figure 1. Structure des couches composant les feuillets argileux.

La minéralogie de chaque argile est définie par le motif ou structure du feuillet, c'est-à-dire par l'assemblage des couches octaédriques et tétraédriques. On distingue ainsi deux grands types de structures : une structure TO qui résulte de la liaison entre une couche tétraédrique et une couche octaédrique et une structure TOT qui correspond à une couche octaédrique encadrée par deux couches tétraédriques.

Dans la classification des argiles, on distingue les kaolinites, qui sont constituées d'une succession de feuillets TO, et qui sont caractérisées par une distance interfoliaire (distance entre chaque feuillet) de 7 Å. Les smectites et illites, sont elles, constituées d'une succession de feuillets TOT. La distance entre chaque feuillet est de l'ordre de 10 Å. Les couches tétraédriques de ces deux minéraux argileux ont la particularité de pouvoir présenter une substitution partielle des atomes de silicium par des atomes d'aluminium ou de fer. Ces substitutions (par ex. substitution de Si^{4+} par Al^{3+} ou Fe^{3+} qui sont des cations de valence plus

¹ Pour plus de détail sur les minéraux argileux et leurs propriétés se référer à Caillère *et al.* (1982)

faibles) entraînent un déficit en charges positives des feuillets. Des cations, appelés « cations interfoliaires » sont alors introduits, par compensation de ce déficit, dans l'espace interfoliaire. La nature des cations interfoliaires diffère selon le type d'argile : les smectites sont, le plus souvent, caractérisées par des cations interfoliaires Ca^{2+} ou Na^+ , les illites présentent des cations interfoliaires K^+ .

I.2.3. Charges des surfaces argileuses et notion de double couche

I.2.3.1 Charges des surfaces argileuses

Les minéraux argileux se caractérisent par une surface électrique non neutre. Deux types de charges peuvent être distinguées :

- une charge permanente ou structurelle négative, liée principalement aux substitutions ioniques (Al^{3+} ou Fe^{3+} pour Si^{4+} dans les couches T, et Mg^{2+} ou Fe^{2+} pour Al^{3+} dans les couches O).
- une charge de surface variable, liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux selon le pH du milieu environnant. Cette charge de surface est associée à l'ionisation des groupes Si-OH et Al-OH le long des surfaces des particules argileuses. Les équations (1) et (2) permettent d'illustrer ce phénomène. À faible pH les particules argileuses sont caractérisées par une charge de surface positive. Au contraire, à pH élevé elles présentent une charge de surface négative.



où X est représentée la structure du minérale

I.2.3.2 Théorie de la double couche

La distribution des cations à la surface des particules argileuses est modélisée par la théorie de la double couche. Celle-ci décrit le comportement des argiles en solution, et donc,

les interactions existantes entre la surface des argiles, les cations interfoliaires, l'eau interfoliaire et les solutions environnantes.

Du fait de la charge permanente négative des argiles en surface, il est observé, en présence d'une solution contenant des cations, une attraction des cations par la surface des argiles pour atteindre un nouvel équilibre. Un gradient s'établit et les cations vont avoir tendance à diffuser vers la solution. Une situation d'équilibre est toutefois atteinte, pour laquelle la concentration en cation diminue avec la distance jusqu'à ce que la concentration égale celle de la solution. Deux couches s'individualisent :

- une couche négative à la surface des argiles
 - une couche positive juste à côté
- } d'où la notion de double couche

L'épaisseur de la double couche dépend de la charge de la surface argileuse, de la salinité de la solution, de la nature du fluide, de l'électrolyte, etc.

I.2.4. Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC) est la capacité d'une argile à échanger des cations. Les argiles présentent deux types de sites d'échanges : des sites d'échanges permanents, et des sites d'échanges dépendant du pH. Les sites d'échanges permanents (cas des smectites et illites) sont caractérisés par les substitutions pouvant intervenir au sein des couches octaédriques et tétraédriques. En effet, ces substitutions résultent en un déséquilibre électrique qui est compensé par l'adsorption, au niveau des espaces interfoliaires, de cations dits interfoliaires tels que Na^+ , Ca^{2+} , Li^+ , K^+ , Fe^{2+} . Les sites d'échanges dépendants du pH sont associés à la charge variable existant à la surface des argiles en fonction du pH du milieu environnant. Ces sites d'échanges concernent principalement les kaolinites qui ne disposent pas de cations interfoliaires.

La cinétique d'échange des cations dépend de la nature de l'argile, des concentrations d'ions, de la température, etc. Toutefois, en général, les réactions d'échanges dans les minéraux kaolins (CEC entre 3-15 meq/100g) sont quasiment instantanées, les sites étant facilement accessibles puisque principalement sur les bords des particules argileuses. Dans les illites (CEC entre 10-40 meq/100g), quelques heures sont nécessaires avant la fin des réactions, car une partie des sites d'échanges est située entre les feuillets. Enfin, concernant les smectites (CEC entre 80-150 meq/100g), un temps beaucoup plus long est nécessaire car

la majeure partie de leur sites d'échanges est située dans les régions interfoliaires (Mitchell, 1993).

I.3. TRAITEMENT DES SOLS À LA CHAUX : PRINCIPES D'ACTION

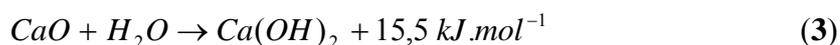
L'addition de chaux à un sol conduit au développement de différents processus physico-chimiques. Trois grands processus peuvent être cités : l'hydratation et l'ionisation de la chaux, les réactions d'échanges cationiques menant à la floculation/agrégation des particules argileuses, et les réactions pouzzolaniques. En plus de ces processus, un autre mécanisme non recherché peut se produire : il s'agit de la carbonatation de la chaux. Ce mécanisme n'est pas systématique et dépend des conditions dans lesquelles le traitement est réalisé.

Dans la première partie de ce paragraphe, on s'attachera à présenter ces différents mécanismes physico-chimiques. Puis dans une seconde partie, on discutera des effets de ces mécanismes sur les propriétés des sols avant compactage. L'effet de la chaux sur les caractéristiques de compactage des sols traités sera aussi abordé dans cette partie.

I.3.1. Processus physico-chimiques induits par la présence de chaux

I.3.1.1. Hydratation et ionisation de la chaux

L'ajout de chaux vive, CaO, à un sol humide peut entraîner une réaction exothermique (3). Celle-ci conduit à la formation d'hydroxyde de calcium, Ca(OH)₂, lorsque les conditions nécessaires à sa formation sont atteintes (pH de 12,4 et concentration en calcium de la solution de 22 mmol.L⁻¹). L'ampleur de cette réaction d'hydratation, c'est-à-dire la quantité de chaux vive s'hydratant reste toutefois indéterminée.



Une fois formé l'hydroxyde de calcium, ou portlandite, peut être dissout selon la réaction d'ionisation suivante (4) :



Le caractère exothermique de la réaction d'hydratation conduit en une baisse immédiate de la teneur en eau du sol traité. Dans la pratique, il est généralement admis qu'une addition de 1 % de chaux (en pourcentage massique rapporté à la masse sèche de sol humide traité) entraîne une baisse de teneur en eau du sol humide traité d'environ 1 %. La réaction d'ionisation de la portlandite mène quant à elle à une libération d'ions calcium, Ca^{2+} , et d'ions hydroxydes, OH^- . Ces derniers sont à l'origine d'une augmentation immédiate du pH du sol. L'ampleur de l'augmentation du pH est fonction du pH initial du sol et de la quantité de chaux ajoutée. Il est généralement admis, que plus la quantité de chaux ajoutée est importante, plus le pH sera fort (par ex. Horn, 1968 ; Danyluk, 1986 ; McCallister, 1990 ; Rao & Shivananda, 2005). Toutefois, ces auteurs indiquent qu'au-delà d'une certaine quantité de chaux, le pH des sols atteint une valeur maximale souvent équivalente à celle obtenue pour une solution saturée en portlandite, soit environ 12,4.

I.3.1.2. Échanges cationiques

Le contact d'une particule argileuse avec un fluide ayant une composition cationique différente de la sienne conduit à un déséquilibre chimique. Celui-ci résulte en des échanges cationiques entre le fluide et l'argile. Ces échanges sont gouvernés par plusieurs paramètres tels que la nature des cations interfoliaires de l'argile, la nature des cations présents dans le fluide et leurs concentrations. La valence des cations apparaît comme un des facteurs déterminant de ces échanges. En effet, d'après les séries lyotropiques (5), les cations présentant de faibles valences peuvent être facilement remplacés par les cations présentant de fortes valences (par ex. Little, 1995). Ainsi les ions sodium, monovalents, peuvent être remplacés par des ions calcium, bivalents, pouvant eux mêmes être remplacés par des ions aluminium, trivalents. Ces lois sont, par ailleurs, modulées par la taille relative de l'ion hydraté. Ainsi, pour des cations présentant des valences identiques, plus l'ion est gros, plus sa capacité de remplacement sera grande. La concentration des cations en solution joue aussi un rôle important. En effet, un cation de faible valence peut extraire un cation de forte valence si la concentration du premier dans la solution est plus importante.



le remplacement des cations se fait de la gauche vers la droite

L'ajout de chaux mène à la libération d'une grande quantité d'ions Ca^{2+} qui peut conduire, en fonction des cations initialement adsorbés à la surface de l'argile, à des échanges cationiques. Toutefois, dans le cas de sols déjà saturés en calcium, Holtz (1999) note que les échanges cationiques sont quasi, voire totalement, inexistantes. Il peut donc être considéré que les sols en Europe sont peu sujets à ce processus d'échange, puisque déjà en majorité saturés en calcium.

I.3.1.3. Réactions pouzzolaniques

a) Principe général

La libération des ions hydroxyles, OH^- , suite à l'ajout de chaux dans un sol conduit à une augmentation du pH qui peut, lorsque la quantité de chaux ajoutée est suffisante, approcher la valeur du pH d'une solution saturée en portlandite, soit environ 12,4. Ce fort pH favorise la dissolution de la silice (SiO_2) et de l'alumine (Al_2O_3) contenues dans les particules du sol (fig. 2). La mise en solution de ces deux espèces minérales entraîne, par combinaison avec les ions calcium apportés par la chaux, la formation de produits cimentaires. Ces produits cimentaires viennent lier les particules de sols entre elles.

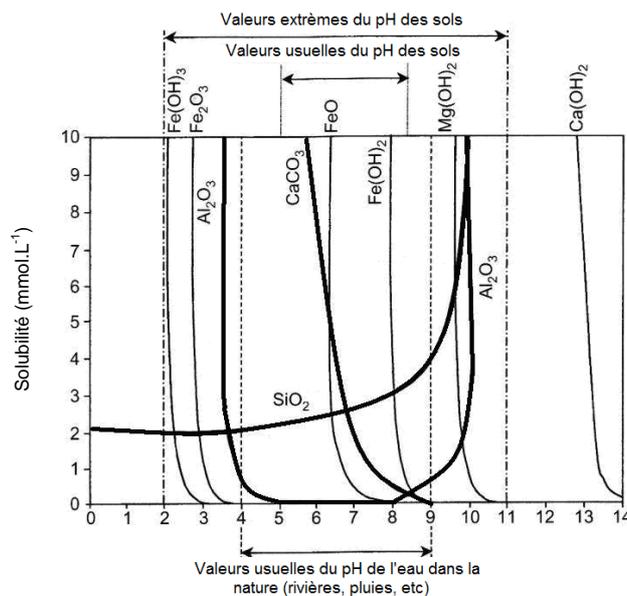


Figure 2. Solubilité de plusieurs espèces minérales en fonction du pH (d'après Loughnan, 1969).

De nombreuses études (par ex. Golberg & Klein, 1952 ; Eades & Grim, 1960 ; Glenn & Handy 1963 ; Ormsby; 1973 ; Arabi & Wild ; 1989 ; Bell, 1996 ; Rao & Shivananda, 2001) ont montré, à travers des analyses de diffraction des rayons X (DRX), thermogravimétriques (ATG) ou des observations au microscope électronique à balayage (MEB), que la nature des produits formés est similaire aux produits formés lors de l'hydratation des ciments : silicates de calcium hydratés (C-S-H), aluminates de calcium hydratés, (C-A-H) et silicates d'aluminate de calcium hydratés (C-A-S-H). Toutefois, l'ensemble de ces études souligne, du fait de la faible cinétique de formation des produits cimentaires dans les sols, que leur mise en évidence est souvent délicate. En effet, ceux-ci sont souvent mal cristallisés (présents sous forme de gel) ou présents en trop faible quantité pour être détectables. Ces études montrent que, plus le temps de cure (temps écoulé après l'ajout de chaux) est long et plus la quantité de chaux ajoutée est forte, plus la mise en évidence de ces produits de cimentation est aisée. Les auteurs associent ce phénomène au fait que la quantité de produits cimentaires formés augmente avec ces deux paramètres. La formation croissante de produits cimentaires au cours du temps est d'ailleurs confirmée par l'évolution du pH des sols au cours du temps. En effet, Rao & Shivananda (2005) et Boardman *et al.* (2001) notent que le fort pH induit par l'ajout de chaux diminue avec le temps de cure. Ces auteurs associent cette baisse de pH à la consommation des ions OH⁻ pour la formation des composés cimentaires. Il peut être supposé à partir des observations de ces auteurs, qu'au bout d'un certain temps le pH atteint n'est plus suffisant pour entraîner la formation de produits cimentaires. Toutefois, ce seuil reste à ce jour indéterminé. Enfin, un long temps de cure conduit aussi, comme dans le cas des ciments, à une évolution des composés cimentaires. Celle-ci aboutit à des composés mieux cristallisés.

Les mécanismes de formation des produits cimentaires restent, dans le cas du traitement des sols traités à la chaux, mal connus. Les travaux de Ingles (1970) suggèrent que les réactions pouzzolaniques pourraient être initiées par la dissolution des contours des feuillettes argileux en contact avec l'eau du sol. Il y aurait alors mise en solution de la silice, et, précipitation de C-S-H sur les bords des argiles. Ces réactions seraient, selon lui, poursuivies jusqu'à épuisement de l'eau contenue dans les pores. De leur côté Boardman *et al.* (2001) supposent, compte tenu des différentes positions relatives des éléments silicium et aluminium dans les minéraux argileux, que la nature des produits cimentaires formés pourrait varier en fonction de la nature des minéraux argileux. Ainsi d'après eux, une montmorillonite mènerait, au contraire d'une kaolinite, à la formation de C-S-H plutôt qu'à la formation de C-A-H.

b) Conditions d'initiation des réactions pouzzolaniques

De nombreux travaux (par ex. Hilt & Davidson, 1960 ; Eades & Grim, 1966 ; Locat *et al.*, 1990 ; Little, 1995) suggèrent qu'il existerait une quantité minimale de chaux, appelée « point de fixation de la chaux » (PFC), à ajouter à un sol pour initier les réactions pouzzolaniques. Ces auteurs considèrent, en effet, que pour un dosage en chaux inférieur à ce seuil, seuls les mécanismes d'échanges cationiques interviennent, la quantité de chaux ajoutée n'étant pas suffisante pour satisfaire complètement ces processus. En revanche, lorsque le dosage en chaux ajouté est supérieur au PFC, une partie de la chaux ajoutée est utilisée pour satisfaire les échanges cationiques. L'autre partie permet d'initier les réactions pouzzolaniques. Ces hypothèses restent controversées. Tout d'abord, comme il a été souligné précédemment, la majorité des sols est déjà saturée en calcium (du moins en Europe). Il apparaît ainsi vraisemblable que la chaux ajoutée, même en faible quantité, ne participe aucunement aux échanges cationiques, ceux-ci étant à priori inexistantes. Ces hypothèses impliquent, par ailleurs, que les réactions d'échanges cationiques et les réactions pouzzolaniques ne pourraient se produire en même temps, mais qu'elles seraient successives. Ceci est contredit par les travaux de Diamond & Kinter (1965) et de Stocker (1974) qui suggèrent que les réactions d'échanges cationiques pourraient se produire simultanément à la précipitation de portlandite et de produits cimentaires.

Plusieurs normes ont été développées pour déterminer le PFC des sols (ASTM D 6276-99a et BS 1924). Ces normes sont basées sur le test pH proposé par Eades & Grim (1966). Ce dernier repose sur l'hypothèse que le pH de la solution interstitielle doit atteindre le pH d'une solution saturée en portlandite, soit 12,4, pour initier les réactions pouzzolaniques. La méthode de détermination du PFC à partir de ces normes est toutefois remise en cause par les travaux de Rogers & Glendinning (2000). En effet, ces auteurs montrent que cette méthode présente de nombreux inconvénients, et, qu'elle conduit souvent à une surestimation de la quantité de chaux nécessaire au développement des résistances mécaniques, et donc, à l'initiation des réactions pouzzolaniques. Ainsi, ils notent une forte variabilité du PFC des sols selon le pH-mètre utilisé pour la mesure du pH de la solution interstitielle, ou la qualité de la chaux (taux d'hydratation et de carbonatation). Ils soulignent par ailleurs que le pH de la solution interstitielle de certains sols, et en particulier des sols sodiques, n'atteint parfois jamais, quelle que soit la quantité de chaux ajoutée, le pH d'une solution saturée en portlandite. L'hypothèse avancée par les auteurs pour expliquer ce phénomène repose sur la sensibilité croissante des électrodes de pH aux ions H^+ et aux ions

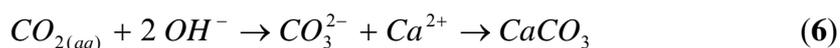
Na^+ libérés au fur et à mesure des échanges cationiques. En effet, celle-ci viendrait fausser les mesures de pH qui apparaîtrait plus acide qu'en réalité.

Finalement, la notion de PFC ainsi que la méthode utilisée pour sa détermination restent sujettes à controverse. Cette notion doit donc être considérée avec prudence. Toutefois, le PFC déterminé à partir de l'essai pH peut être utilisé comme une première indication de la quantité de chaux à ajouter pour traiter un sol et améliorer ses performances mécaniques. Néanmoins, un suivi des performances mécaniques du sol en fonction du dosage en chaux ajouté s'avère nécessaire pour confirmer le résultat de l'essai pH.

I.3.1.4. Carbonatation

Selon Thompson (1966), la carbonatation de la chaux peut être considérée comme un mécanisme négatif puisqu'il conduit à la consommation d'une partie de la chaux pour la formation de carbonates de calcium.

Le mécanisme de carbonatation de la chaux dans les sols traités peut être décrit par la succession de deux réactions (6). Le dioxyde de carbone une fois dissout dans l'eau interstitielle réagit avec les ions hydroxydes, OH^- , libérés suite à l'ajout de chaux pour former des ions carbonates. Ces derniers peuvent alors se combiner avec les ions Ca^{2+} apportés par la chaux pour former du carbonate de calcium.



Un grand nombre d'études montrent que l'ajout de chaux mène à la précipitation de calcite (par ex. Golberg & Klein, 1952 ; Glenn & Handy, 1963 ; Bell 1996 ; De Bel, 2005). Toutefois, ces études ne permettent pas de conclure quant à l'ampleur de ce processus et de sa cinétique. En effet, la présence de carbonates est mise évidence, dans ces études, à l'aide de techniques qui ne permettent pas de quantifier les carbonates formés (analyses DRX ou observations au MEB). Ces essais sont par ailleurs conduits à des temps de cure très différents allant de 7 jours à plusieurs mois.

Les conditions nécessaires à la formation des carbonates, dans les sols traités à la chaux, restent aussi mal connues. L'étude de Bagonza *et al.* (1987), qui ont travaillé sur un sol argileux calcaire ($w_L = 29 \%$, $\text{IP} = 20 \%$ et $\text{CaCO}_3 = 16 \%$), a toutefois permis de préciser certains de ces points. Leurs travaux indiquent que, lorsqu'aucune précaution n'est prise pour éviter le contact des échantillons de sol traité avec le dioxyde de carbone de l'air (paraffinage,

film cellophane ou plastique), les éprouvettes présentent des signes de carbonatation, et leurs performances mécaniques sont entre 30 % et 80 % plus faibles que celles observées pour les échantillons non carbonatés. Leur étude montre aussi que le phénomène de carbonatation peut être ralenti ou accéléré en fonction des conditions dans lesquelles se trouvent les sols. Ainsi, un environnement riche en dioxyde de carbone, à forte température, ou forte hygrométrie favorise le phénomène de carbonatation. Au contraire, un environnement à faible hygrométrie semble le ralentir.

I.3.2. Effets des processus physico-chimiques induits par la chaux sur les propriétés des sols

I.3.2.1. Effets sur les propriétés des sols traités avant compactage

a) Floculation/agrégation des particules argileuses

Dans le cas d'une argile sodique, les échanges cationiques se produisant entre les ions interfoliaires Na^+ et Ca^{2+} apportés par la chaux, peuvent conduire, selon l'état d'hydratation des ions Na^+ , en une réduction de la double couche. Par ailleurs, quelle que soit la nature de l'argile, la grande quantité d'ions calcium libérés suite à l'ajout de chaux, conduit aussi à une réduction de la charge nette négative des particules argileuses via un phénomène appelé en anglais « crowding effect ». Ce phénomène correspond à un amassement des ions calcium à la surface des particules argileuses (par ex. Little, 1995). La réduction de la charge nette entraîne une diminution des forces de répulsion entre les particules argileuses. Ces phénomènes résultent en la floculation des particules argileuses (par ex. Eades & Grim, 1966 ; Locat *et al.*, 1990). Cette floculation serait à l'origine de l'agrégation des particules argileuses.

Toutefois, certains auteurs (Diamond & Kinter, 1965 ; Stocker, 1974 ; Verhasselt, 1990) remettent en cause ces hypothèses et s'interrogent sur l'origine réelle du phénomène d'agrégation. Les travaux de Diamond & Kinter (1965) et de Stocker (1974) suggèrent qu'il pourrait être expliqué par la précipitation immédiate entre les particules de sol de portlandite et de matériaux cimentaires venant lier les particules de sol entre elles. De son côté, Verhasselt (1990) conclut qu'elle pourrait résulter, non pas de la précipitation de ces composés, mais de la formation de liaisons hydrogène et hydroxyle entre les groupes

fonctionnels hydroxyles de la chaux, et les groupes fonctionnels oxygènes et hydroxyles des particules argileuses.

Compte tenu du petit nombre d'études sur ce sujet, il ne semble pas possible de conclure à l'heure actuelle quant à la prédominance d'une de ces hypothèses par rapport aux autres.

b) Modification de la capacité d'échange cationique

Les études de Bell (1996) et de Mathew & Rao (1997) indiquent que l'ajout de chaux entraîne une modification immédiate de la capacité d'échange cationique (CEC) du matériau (tab. 1). Cette modification varie en fonction de la nature du sol et de la quantité de chaux ajoutée. Ainsi, dans le cas d'une kaolinite, l'ajout de chaux conduit généralement à une augmentation de sa CEC, alors que dans le cas d'une montmorillonite, on observe plutôt une baisse de sa CEC. L'origine de ces différences de comportement reste mal connue. Toutefois, il peut être avancé, que la baisse de CEC observée dans le cas d'une kaolinite est liée à l'augmentation de la quantité de sites d'échanges provoquée par l'élévation du pH du sol suite à l'ajout de chaux. La baisse de CEC observée dans le cas d'une montmorillonite dont la quantité de sites d'échanges est moins sujette au pH du milieu environnant, celle-ci comptant un grand nombre de sites d'échanges permanents, pourrait être expliquée par des substitutions entre les cations initialement adsorbés à la surface des argiles (sites d'échanges cationiques permanents) et les ions Ca^{2+} apportés par la chaux.

Tableau 1. Évolution de la CEC d'une kaolinite et d'une montmorillonite en fonction de la quantité de chaux (d'après Bell, 1996).

Teneur en chaux (%)	Capacité d'échange cationique (meq/100g)	
	Kaolinite	Montmorillonite
0	4	88
2	12	80
4	9	56
6	9	66
8	10	62

c) Modification des limites d'Atterberg

De nombreux travaux (par ex. Hilt & Davidson, 1960 ; Brandl, 1981 ; Rogers & Glendinning, 1996) indiquent que l'ajout de chaux entraîne une modification des limites d'Atterberg du sol (tab. 2). Cette modification se traduit généralement par une diminution de

l'indice de plasticité des sols, qui s'explique, par une forte augmentation de la limite de plasticité (w_p) et une plus faible augmentation de la limite de liquidité (w_L). Toutefois, dans le cas particulier des minéraux kaolins, l'ajout de chaux entraîne une augmentation de l'indice de plasticité. Cette différence de comportement peut être associée, par opposition aux autres types d'argiles, à l'augmentation de leur capacité d'échange cationique avec l'ajout de chaux. Ces auteurs notent que l'ampleur des modifications de plasticité ne dépend pas du temps de cure, mais de la quantité de chaux ajoutée. Ce résultat peut aussi être relié aux variations de CEC observées en fonction de la quantité de chaux ajoutée.

Tableau 2. Évolution de l'indice de plasticité des sols en fonction de la nature du sol et de la teneur en chaux ajoutée (d'après Rogers & Glendinning, 1996)

	CaO (%)	w_p (%)	w_L (%)	I_p (%)
English China Clay kalonite pure cristallisée	0	35	61	26
	0,5	39	68	29
	1,0	40	74	34
	1,5	41	72	31
	2,5	39	71	32
London Clay illite, kaolinite et smectite	0	19	52	33
	1,0	26	66	40
	2,0	36	66	30
	3,0	38	67	29
	7,0	39	65	26

d) Modification de la granulométrie

Certains auteurs (par ex. Tuncer & Basma, 1991 ; Osula, 1996) se sont intéressés à l'effet de la chaux sur la granulométrie des sols après malaxage et avant compactage. Les résultats de ces auteurs indiquent que l'ajout de chaux induit une diminution des particules inférieures à 2 μm , et une augmentation des particules de plus grande taille. Ces modifications sont amplifiées avec l'ajout de fortes quantités de chaux. Ce phénomène peut être associé à la floculation/agrégation des particules argileuses. Enfin, les résultats d'Osula (1996) soulignent que les modifications de granulométrie sont aussi dépendantes du temps. En effet, il apparaît que plus le temps de cure est long, plus la réduction de la quantité de fines est importante. Cette observation suggère que le processus de floculation/agrégation pourrait, comme l'indique certains auteurs (Diamond & Kinter, 1965 ; Stocker, 1974), être relié à la formation de produits cimentaires.

I.3.2.2. Effets sur les propriétés de compactage des sols traités

L'ajout de chaux mène en une modification des caractéristiques de compactage des sols traités. En effet, l'aptitude des sols à être compactés est généralement plus faible après le traitement à la chaux (par ex. Ormsby, 1973 ; Brandl, 1981 ; Osula, 1996). En effet, les sols traités présentent une densité à l'optimum plus faible que celle des sols naturels, et leur teneur en eau de compactage optimale est décalée vers des teneurs en eau plus fortes (fig. 3). Les auteurs attribuent la diminution de densité à la réorganisation des particules argileuses causée par le phénomène de floculation/agrégation. Enfin, l'ampleur de ces modifications dépend de la quantité de chaux ajoutée. Il est ainsi admis que plus la quantité de chaux ajoutée est grande, plus la teneur en eau optimale sera décalée vers les fortes teneurs en eau, et plus leur densité sèche optimale sera faible (fig. 3).

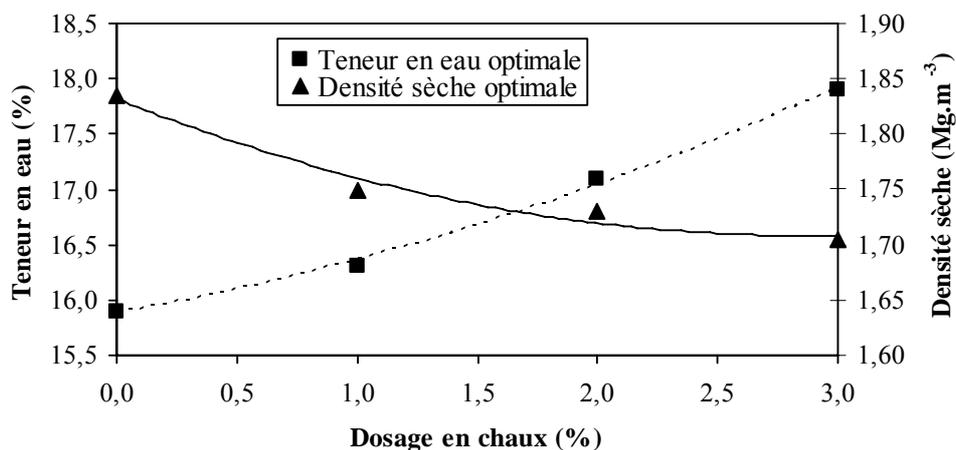


Figure 3. Modification des caractéristiques de compactage d'un sol argileux en fonction de la teneur en chaux (d'après Osula, 1995).

I.4. MODIFICATIONS DES PROPRIÉTÉS DES SOLS TRAITÉS À LA CHAUX APRÈS COMPACTAGE

On s'attachera dans cette partie aux modifications apportées par la chaux, et donc par les différents processus physico-chimiques (décrits dans la partie précédente), une fois les sols traités compactés. La première partie de ce paragraphe a pour but de décrire les effets de la chaux sur la microstructure des sols traités compactés. On développera dans une seconde partie, les modifications apportées par la chaux sur les résistances mécaniques des sols.

L'effet de la chaux sur la perméabilité des sols après compactage sera abordé dans la dernière partie de ce paragraphe.

I.4.1. Effets de la chaux sur la microstructure des sols après compactage

On considérera successivement, dans ce paragraphe, les effets de la chaux sur la microstructure des sols compactés à court terme, puis les effets de la chaux sur la microstructure des sols compactés à long terme. Enfin, on donnera quelques résultats permettant d'apprécier l'effet des conditions de compactage sur la microstructure des sols traités.

I.4.1.1. Effets à court terme de la chaux sur la microstructure des sols après compactage

Seuls les travaux de Bin *et al.* (2007), qui ont travaillé sur plusieurs sols traités à différentes teneurs en chaux (sols plastiques sans plus d'information), permettent de se faire une idée de l'effet de la chaux sur la microstructure des sols à court terme, c'est-à-dire quelques heures après le compactage. Ces auteurs ont montré, grâce à des essais d'adsorption et de désorption à l'azote liquide, que l'ajout de chaux menait, à court terme, en une augmentation de la quantité de pores de diamètre supérieur à 200 Å. Leurs résultats suggèrent par ailleurs, que cette augmentation semble associée à une réduction de la quantité de pores de diamètre inférieur à 30 Å. Les auteurs attribuent ces modifications au phénomène de floculation/agrégation décrit précédemment. Enfin, ils constatent que plus la quantité de chaux ajoutée est forte plus l'ampleur de ces modifications est importante.

I.4.1.2. Effets à long terme de la chaux sur la microstructure des sols après compactage

Wild *et al.* (1986), Choquette *et al.* (1987) et Locat *et al.* (1990) se sont intéressés à l'évolution du réseau poreux de matériaux argileux traités à la chaux en fonction du temps de cure. Ces auteurs constatent, à l'aide d'essais de porosimétrie par intrusion de mercure, que la quantité de gros pores (pores de diamètre supérieur à 0,1 µm) diminue au cours de la cure au profit de l'augmentation de la quantité de petits pores (fig. 4). Ils expliquent ce phénomène

par la précipitation croissante de produits cimentaires au cours du temps venant combler de plus en plus les gros pores (produits cimentaires mis en évidence par Choquette *et al.* (1987) à l'aide d'observations au MEB). La figure 5 proposée par Locat *et al.* (1990) permet d'illustrer ce phénomène de comblement au cours du temps.

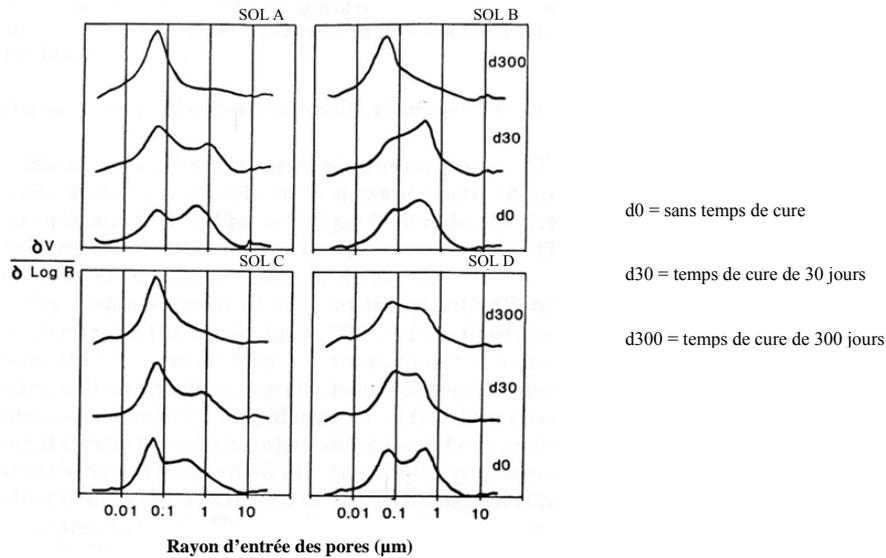


Figure 4. Évolution du réseau poreux de quatre argiles traitées à 4 % de chaux en fonction du temps de cure (d'après Choquette *et al.*, 1987).

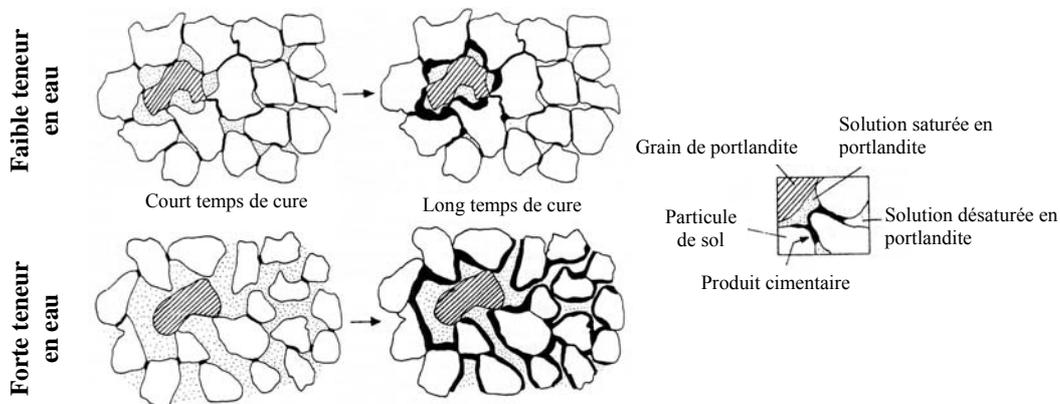


Figure 5. Schéma de l'évolution du réseau poreux observée dans les sols argileux traités à la chaux en fonction du temps de cure pour deux teneurs en eau de compactage (d'après Locat *et al.*, 1990).

I.4.1.3. Effets des conditions de compactage sur la microstructure des sols après compactage

Rallings (1971) s'est intéressé à l'effet de la méthode de préparation et d'humidification des éprouvettes de sol sur la microstructure d'un sol argileux ($w_L = 55\%$ et

$I_p = 24 \%$) traité à différents dosages en chaux après 7 jours de cure. Deux procédures de préparation différentes ont été considérées par l'auteur. La première méthode consiste à humidifier le sol jusqu'à sa teneur en eau optimale de compactage du sol, soit 20 %, puis à le traiter et enfin à le compacter. La seconde méthode consiste à humidifier le sol à une teneur en eau inférieure à celle de sa teneur en eau optimale de compactage du sol (jusqu'à 6 % de moins), à le traiter, puis à ajuster sa teneur en eau en ajoutant de l'eau et en malaxant manuellement de façon à obtenir sa teneur en eau de compactage optimale, et enfin à le compacter. L'auteur constate que ces deux méthodes de préparation conduisent à des densités différentes. La densité la plus forte est observée pour la méthode 2 : $1,57 \text{ Mg.m}^{-3}$ au lieu de $1,49 \text{ Mg.m}^{-3}$. L'auteur note par ailleurs que la microstructure des sols diffère selon la méthode de préparation. La méthode de préparation 1 conduit à une microstructure constituée d'agrégats distincts entre lesquels existe une grande quantité de vide. Au contraire, la méthode de préparation 2 mène à une microstructure plus homogène. Il peut être avancé dans le cas de la méthode de préparation 2, que la réorganisation induite par la floculation/agrégation des particules est moins efficace, compte tenu de la plus faible quantité d'eau ajoutée au départ. L'effet de la chaux serait donc moins marqué avec cette méthode de préparation, d'où une densité plus forte et une microstructure plus homogène.

Les travaux de Locat *et al.* (1990) et de Khattab *et al.* (2001) permettent de préciser quant à eux l'effet de la teneur en eau de compactage sur la microstructure des sols traités à la chaux. Locat *et al.* (1990) indiquent que la quantité de produits cimentaires formés au fur et à mesure du temps pourrait être plus importante pour une forte teneur en eau (fig. 6). L'hypothèse avancée par les auteurs pour expliquer ce phénomène repose sur le fait que la répartition de la chaux serait plus homogène que celle obtenue avec un compactage à l'optimum, compte tenu de la plus forte porosité du matériau : les conditions favorables à la formation des produits cimentaires seraient donc ainsi plus homogène au sein du matériau. Leur hypothèse suppose que le comblement des pores serait d'autant plus marqué pour une forte teneur en eau. Khattab *et al.* (2001) ont comparé les distributions porales obtenues via des essais de porosimétrie au mercure, sur des échantillons de FoCa traitée à 4 % de chaux après 7 jours de cure, et des échantillons non traités compactés à différentes teneurs en eau mais sous une densité sèche constante de $1,30 \text{ Mg.m}^{-3}$ (fig. 6). Leurs résultats montrent que la distribution porale des échantillons traités semble moins affectée par une variation de teneur en eau que pour le sol non traité. Les auteurs en concluent, par opposition à Locat *et al.* (1990) que la teneur en eau de compactage semble avoir un effet négligeable sur la microstructure des sols traités. Ces conclusions contradictoires pourraient être expliquées, en

partie, par le temps de cure très court employé par Khattab *et al.* (2001), pour lequel les composés cimentaires pourraient ne pas avoir eu le temps de se former en grand nombre (faible cinétique des réactions pouzzolaniques).

Aucune étude ne permet d'apprécier l'effet de la densité sur la microstructure des sols traités.

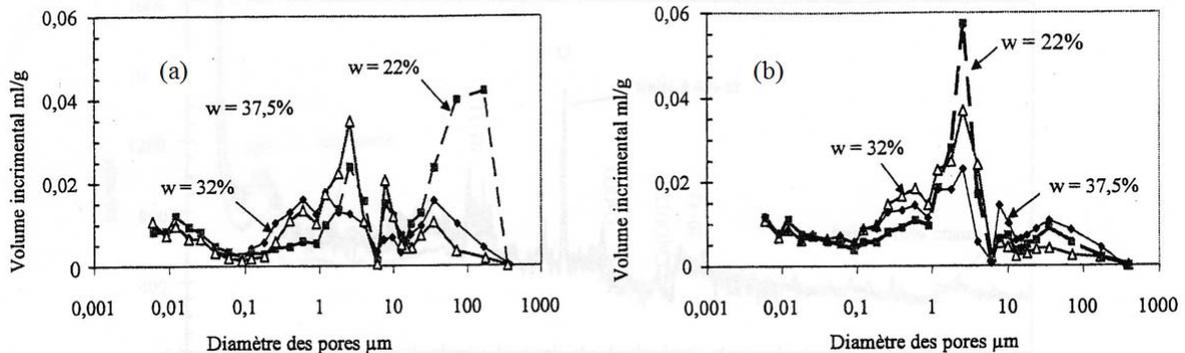


Figure 6. Effet de la chaux et de la teneur en eau de compactage sur la distribution porale d'échantillons de Foca compactés à une même densité (1.30 Mg.m^{-3}): (a) non traités, (b) traités à 4 % de chaux (Khattab *et al.*, 2001).

I.4.1.4. Conclusion

Les données issues d'essais de porosimétrie au mercure montrent que l'ajout de chaux conduit à une augmentation des pores présentant un diamètre supérieur à 200 \AA . Cette augmentation est associée à une diminution des pores de diamètre inférieur à 30 \AA . L'ensemble de ces modifications peut être attribué à la réorganisation des particules argileuses induite par le phénomène de floculation/agrégation. La taille moyenne des pores semble aussi diminuer avec le temps de cure, suite à la précipitation croissante de produits cimentaires venant boucher progressivement les pores. Il ressort également de cette partie, que les conditions de compactage et le mode de préparation du sol ont une forte influence sur la microstructure des sols traités. Toutefois, l'influence exacte de la teneur en eau reste discutée, celle de la densité reste inconnue.

I.4.2. Effets de la chaux sur les caractéristiques mécaniques

On s'intéressera dans ce paragraphe aux améliorations apportées par la chaux sur les résistances à la rupture : résistance à la compression simple et résistance au cisaillement. On

s'attachera en premier lieu à préciser l'effet de la chaux sur chacune de ces caractéristiques mécaniques. L'influence de différents paramètres initiaux tels que la nature du sol, le dosage en chaux, le temps de cure et les conditions de compactage sur ces résistances seront détaillés dans une seconde partie.

I.4.2.1. Résistance à la compression

a) États des connaissances

L'ajout de chaux conduit à une augmentation de la résistance à la compression simple (R_C) des sols compactés. Cette augmentation est associée à la formation des produits cimentaires (par ex. Perret, 1979 ; Brandl, 1981 ; Balasubramaniam & Buensuceso, 1989 ; Bell, 1996 ; Little, 1995).

L'ampleur de cette augmentation dépend de différents paramètres. Tout d'abord, bien que l'ajout de chaux conduise pour l'ensemble des minéraux argileux en une augmentation des performances mécaniques, certains minéraux sont plus réactifs. Il est ainsi considéré que les minéraux les plus réactifs au traitement à la chaux sont les montmorillonites (par ex. Eades & Grim, 1960 ; Little, 1995). Leur forte réactivité serait liée à leur grande surface spécifique, qui faciliterait l'attaque de la chaux en plusieurs endroits du minéral, menant ainsi, à une dissolution plus rapide du minéral. La cinétique d'augmentation des performances mécaniques est, par conséquent, considérée par ces auteurs, comme meilleure pour ces minéraux.

L'augmentation de la résistance à la compression simple dépend également de la quantité de chaux ajoutée et du temps de cure (fig. 7). Plus la quantité de chaux est forte et plus le temps de cure est long, plus la résistance à la compression simple est forte (par ex. Perret, 1979 ; Brandl, 1981 ; Balasubramaniam & Buensuceso, 1989 ; Bell, 1996 ; Little, 1995). L'explication donnée par les auteurs pour expliquer ce comportement repose, d'une part, sur le fait qu'une forte quantité de chaux augmente la proportion de produits cimentaires formée pour un temps de cure donné, et d'autre part, que la proportion de produits cimentaires formés augmente avec le temps. Une meilleure cristallisation des composés cimentaires avec le temps pourrait aussi contribuer, comme dans le cas des ciments, à l'amélioration de la résistance à la compression simple. Toutefois, aucune étude ne permet de confirmer cette hypothèse dans le cas des sols traités à la chaux.

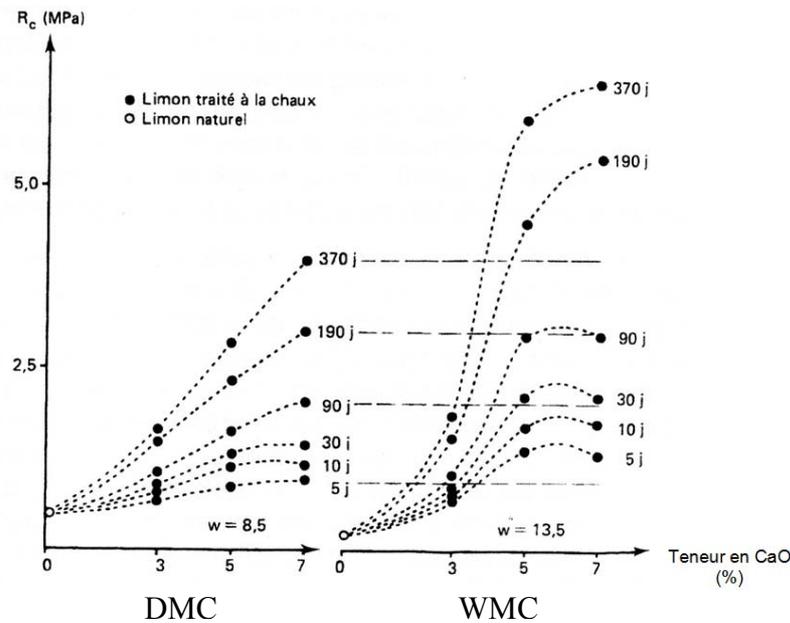


Figure 7. Effet de la teneur en eau de compactage (DMC à gauche, c'est-à-dire $w = 8,5 \%$ et WMC à droite, c'est-à-dire $w = 13,5 \%$), du temps de cure (précisé à droite des courbes) et de la teneur en chaux sur la résistance à la compression simple d'un limon (Perret, 1979).

La température influence aussi de manière importante l'ampleur de l'augmentation des résistances. Il est généralement admis qu'un temps de cure de 48 heures à 49°C est équivalent, en terme de résistance, à une cure de 28 jours à 21°C (par ex. Anday, 1961 ; Little, 1995). Ce phénomène peut être expliqué, comme pour les produits cimentaires formés lors de l'hydratation des ciments (Andra, 2001), par le fait que la cinétique de formation des composés cimentaires, ainsi que leur état de cristallisation, sont fonction de la température.

Enfin, il apparaît que les conditions dans lesquelles sont compactés les sols (teneur en eau et densité) jouent aussi un rôle significatif sur la résistance à la compression simple. Les études de Perret (1979) et d'Estéoule & Perret (1979) sur un limon traité à la chaux et compacté à deux teneurs en eau (côté sec – DMC, $w = 8,5 \%$ et côté humide – WMC, $w = 13,5 \%$, la teneur en eau optimale étant de 12%) indiquent que la résistance à la compression simple atteinte est fonction de la teneur en eau de compactage (fig. 7). Les résistances apparaissent plus fortes lorsque le matériau est compacté du côté humide plutôt que du côté sec. Leurs résultats montrent par ailleurs que la cinétique d'augmentation de résistance est plus importante pour un compactage du côté humide. De leur côté, Petry & Berger (2006) se sont intéressés, non seulement, à l'effet de la teneur en eau de compactage, mais aussi à l'effet de la densité sèche sur la résistance à la compression simple atteinte après 28 jours de cure par trois sols argileux plastiques différents ($w_L = 79 \%$, 50% et 39% et $I_p = 52 \%$, 28% et 22%) traités à leur PFC respectif (10% , 6% et 5% de chaux). Leurs résultats

indiquent que la résistance à la compression simple est maximale lorsque les sols présentent une densité sèche maximale, et donc, lorsqu'ils sont compactés à leur optimum Proctor (fig. 8). Leurs résultats (dans le cas des sols 2 et 3) montrent aussi, par opposition à ceux de Perret (1979), qu'un compactage du côté humide semble être plus pénalisant en terme de résistance qu'un compactage du côté sec, bien que les densités sèches du côté humide soient plus fortes que celles du côté sec.

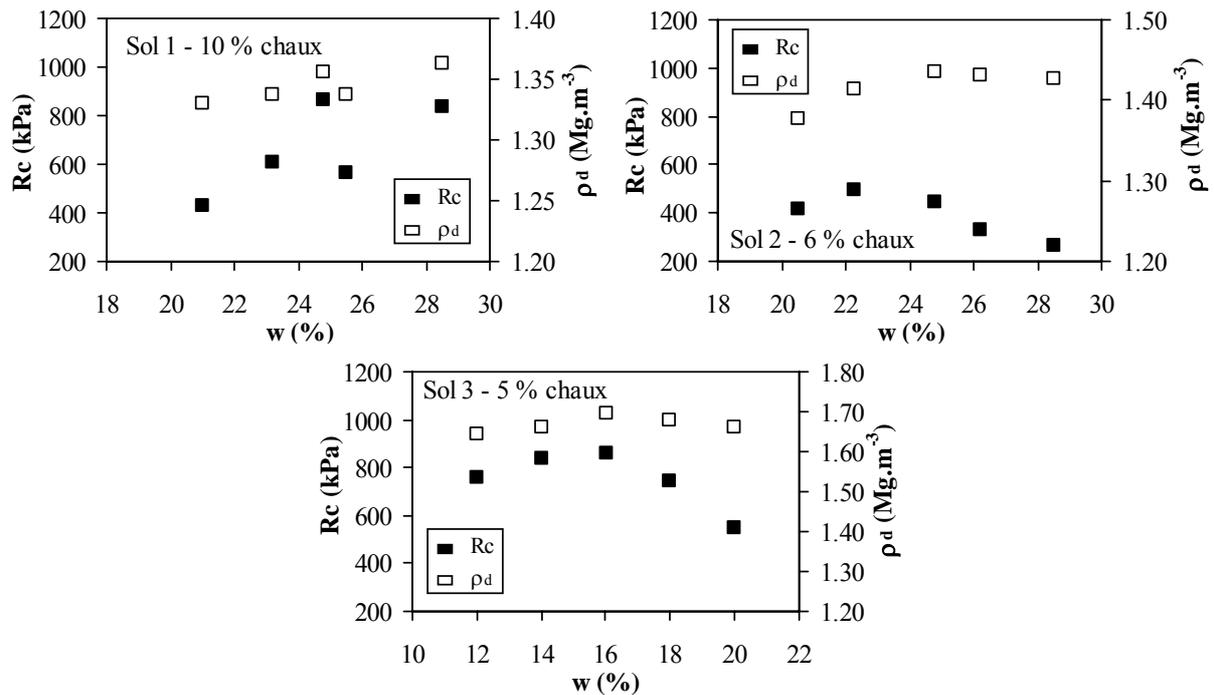


Figure 8. Effet des conditions initiales de compactage sur la résistance à la compression simple de trois argiles traitées à leur PFC (d'après Petry & Berger, 2006).

Rallings (1971) qui a travaillé sur un sol argileux traité à la chaux a constaté que l'effet du mode de préparation du matériau (deux procédures de préparation utilisées par l'auteur décrites précédemment, pages 19-20) sur la microstructure du sol pouvait avoir un impact sur sa résistance à la traction. En effet, l'auteur indique que les résistances les plus fortes sont obtenues pour la méthode de préparation pour laquelle l'humidification est réalisée en deux temps (méthode de préparation 2). Ceci peut être attribué aux plus fortes densités présentées par ces éprouvettes pour cette méthode de préparation, mais aussi à leur microstructure plus homogène. Enfin, les résultats de Rallings (1971) montrent, quelle que soit la méthode de préparation considérée, que les résistances maximales ne sont pas toujours atteintes pour un compactage proche de la teneur en eau optimale. En effet, il constate que les conditions de compactage permettant d'obtenir une résistance maximale varient avec la quantité de chaux ajoutée. Il observe ainsi qu'avec une addition de 2 % de chaux, les

résistances maximales sont obtenues, comme dans l'étude de Petry et Berger (2006), pour un compactage à une teneur en eau proche de celle de l'optimum (environ 1 % de moins que la teneur en eau optimale). En revanche, pour des dosages plus forts (4 % et 8 %) les résistances maximales sont obtenues pour des éprouvettes compactées du côté humide de l'optimum (environ 3,5 % de plus que la teneur en eau optimale). Ses résultats sont donc en partie en opposition à ceux de Perret (1979) ou de Petry et Berger (2006). Ces différences de comportement pourraient être liées à une modification de microstructure des éprouvettes en fonction de la quantité de chaux ajoutée, mais aussi à la nature différente des matériaux utilisés par ces auteurs.

b) Conclusion

La formation de produits cimentaires conduit à une augmentation de la résistance à la compression simple des sols. La cinétique de cette augmentation dépend de plusieurs paramètres tels que la température, la nature des argiles ou encore la quantité de chaux et le temps de cure. Les conditions de compactage du sol jouent aussi un rôle important dans le développement des performances mécaniques. Toutefois, il est difficile de conclure, compte tenu des contradictions notées entre les résultats de Rallings (1971), Perret (1979), Estéoule & Perret (1979) et de Petry et Berger (2006), quant aux états initiaux favorables à de fortes performances mécaniques. Celles-ci pourraient être expliquées, en partie, par la nature différente des matériaux utilisés, et donc, par la plus ou moins bonne réactivité des matériaux vis-à-vis du traitement à la chaux, mais aussi par les temps de cure très différents considérés dans ces études. Néanmoins, il peut être avancé que les performances mécaniques obtenues pour différentes conditions de compactage initiales semblent liées à la microstructure des sols.

I.4.2.2. Résistance au cisaillement

a) États des connaissances

Plusieurs auteurs (par ex. Wissa *et al.*, 1965 ; Brandl, 1981 ; Balasubramaniam & Buensuceso, 1989 ; Balasubramaniam *et al.*, 2005) ont montré que l'ajout de chaux à un sol compacté mène à une modification de sa résistance au cisaillement.

À titre d'exemple, les travaux de Wissa *et al.* (1965) sur un limon ($w_L = 14,7\%$ et $I_p = 5,8\%$) indiquent que l'ajout de chaux conduit à une amélioration des paramètres de cisaillement, c'est-à-dire de l'angle de frottement interne, φ' , et de la cohésion effective, c' . Les travaux de Brandl (1981) sur un limon ($w_L = 26,6\%$ et $I_p = 5,2\%$) et une argile ($w_L = 57,5\%$ et $I_p = 32,3\%$) et de Balasubramamiam & Buensuceso (1989) sur une argile traitée à différentes teneurs en chaux ($w_L = 104\%$ et $I_p = 63\%$) confirment ses résultats (fig. 9 et tab. 3).

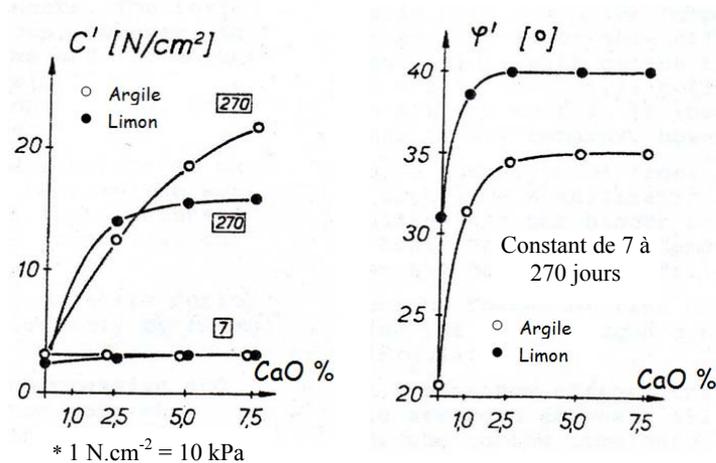


Figure 9. Influence du temps de cure (indiqué dans les carrés) et de la quantité de chaux sur les paramètres de résistance au cisaillement (d'après Brandl, 1981).

Tableau 3. Influence de la teneur en chaux sur les paramètres de résistance au cisaillement d'une argile après 2 mois de cure (d'après Balasubramamiam & Buensuceso, 1989).

Teneur en chaux (%)	c' (kPa)	φ' (°)
0	0	24,3
2.5	137	29,1
5.0	167	38,0
7.5	252	36,6
10.0	228	35,3

L'ampleur de l'augmentation de l'angle de frottement interne dépend de la nature du sol, mais aussi de la quantité de chaux ajoutée. Toutefois, à partir d'une certaine quantité de chaux, ce paramètre n'évolue plus. L'angle de frottement interne ne dépend pas, en revanche, du temps de cure. L'amélioration de ce paramètre est donc plutôt attribuée au processus de floculation/agrégation, plutôt qu'à la formation ou la cristallisation des produits cimentaires au cours du temps (par ex. Brandl, 1981 ; Balasubramaniam & Buensuceso, 1989). La stabilité de l'angle de frottement interne observée à partir de l'ajout d'une certaine quantité de chaux est généralement reliée au PFC du sol et donc à la fin du phénomène de réorganisation

induit par la floculation/agrégation. L'amélioration de la cohésion effective dépend, quant à elle, de la teneur en chaux mais aussi du temps de cure. L'augmentation de ce paramètre est associée, comme pour l'augmentation de la résistance à la compression simple, à la cimentation du sol, et donc, à la formation croissante de composés cimentaires ou à la meilleure cristallisation des composés au cours du temps.

Les études de Balasubramamiam & Buenseco (1989) et Balasubramamiam *et al.* (2005) qui ont travaillé sur une argile très plastique traitée à la chaux ($w_L = 104\%$ et $I_p = 63\%$) ont permis de montrer que la cimentation des sols conduit aussi à une modification des courbes contraintes-déformations (fig. 10 et fig. 11). En effet, le mode de rupture est modifié suite à l'ajout de chaux. On passe ainsi d'un mode de rupture ductile pour de faibles dosages et de courts temps de cure à un mode de rupture fragile avec l'augmentation de ces deux paramètres. Le module élastique augmente aussi avec ceux-ci.

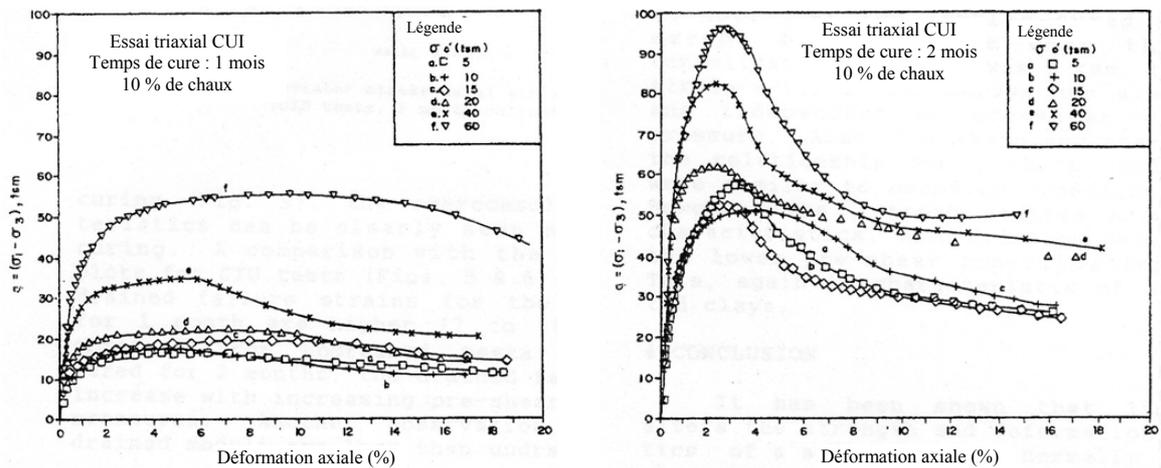


Figure 10. Relation contrainte-déformation d'une argile traitée à 10 % de chaux et soumise à 1 ou 2 mois de cure (d'après Balasubramamiam & Buensuceso, 1989).

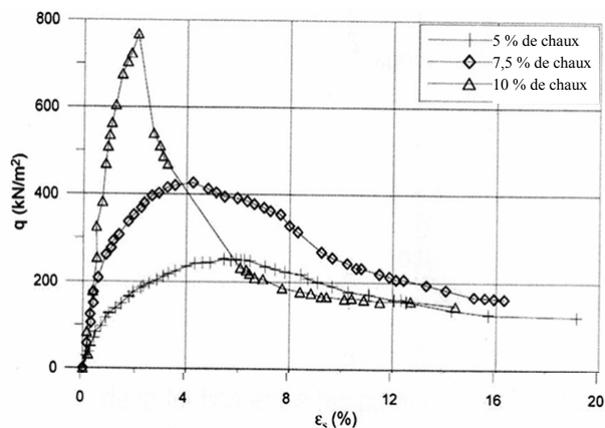


Figure 11. Influence de la teneur en chaux sur le comportement au cisaillement (pression de confinement de 50 kPa) d'une argile soumise à 2 mois de cure (Balasubramamiam *et al.*, 2005).

Enfin, l'effet des conditions de compactage sur la résistance au cisaillement peut être appréhendé grâce à l'étude menée par Wissa (1965). En effet, l'auteur compare les paramètres de cisaillement d'un sol compacté à plusieurs teneurs en eau et densités sèches (variation de densités obtenues en augmentant l'énergie de compactage par 2). Le tableau 4 illustre une partie de ses résultats. Il permet de constater que la teneur en eau de compactage n'a pas d'effet sur l'angle de frottement interne. En ce qui concerne la cohésion, il est plus difficile de conclure quant à l'effet de la teneur en eau puisque son évolution dépend du temps de cure, et que les temps de cure ne sont pas identiques pour toutes les éprouvettes. Toutefois, il peut être supposé à partir des résultats obtenus que la teneur en eau ne semble pas avoir d'effet sur la cohésion effective : la plus forte cohésion effective observée pour les éprouvettes compactées à l'optimum pouvant être expliquée par le temps de cure plus long auquel elles ont été soumises. Dans ce cas, le processus de cimentation ne serait pas dépendant de la teneur en eau de compactage. Ceci est contradictoire à ce qui est observé pour la résistance à la compression simple. La densité sèche ne semble pas avoir d'effet sur l'angle de frottement interne. En revanche, les résultats de Wissa (1965) montrent qu'une augmentation de densité sèche conduit à une augmentation de la cohésion effective du matériau.

Tableau 4. Influence des conditions de compactage sur les paramètres de cisaillement d'un sol traité à 5 % de chaux (d'après Wissa, 1965).

Type d'éprouvette	Énergie de compactage (kPa)	Teneur en eau (%)	Densité sèche (Mg.m ⁻³)	Temps de cure (jours)	c' (kPa)	φ' (°)
OPN*	2758	15,2± 0,8	1,80 ± 0,01	20	99	31,5
Côté sec	2758	13,7± 0,1	1,78 ± 0,01	14	78	31,5
Côté humide	2758	17,2	1,80 ± 0,002	14	86	31,5
Côté humide	5516	17,6	1,87 ± 0,002	14	128	31,5

* optimum Proctor

b) Conclusion

L'amélioration de la résistance au cisaillement des sols peut être associée au phénomène de floculation/agrégation mais aussi à la cimentation du sol. L'ampleur de cette augmentation dépend, tout comme la résistance à la compression simple, de la nature du sol, de la quantité de chaux, et du temps de cure. Le rôle des conditions de compactage sur ce paramètre reste mal connu compte tenu du peu de données disponibles. Toutefois, il semblerait que les conditions de compactage aient une influence moins marquée sur la résistance au cisaillement que sur la résistance à la compression simple. Une forte densité

semble, comme dans le cas de la résistance à la compression simple, entraîner une meilleure résistance au cisaillement.

I.4.3. Effets de la chaux sur la perméabilité des sols

Ce paragraphe a pour but de présenter l'état des connaissances sur la perméabilité initiale des sols traités à la chaux après compactage. On s'intéressera dans une première partie à l'effet du traitement à la chaux sur la perméabilité des sols par rapport à celle des sols non traités. Dans une seconde partie, on détaillera les effets de différents paramètres initiaux (dosages en chaux, temps de cure, conditions de compactage) sur la perméabilité des sols traités.

I.4.3.1. Effets de la chaux sur la perméabilité des sols compactés

Il est généralement admis, comme l'illustre la figure 12, que l'ajout de chaux à un sol compacté, à sa teneur en eau optimale, sous une énergie de compactage donnée, conduit en une augmentation de sa perméabilité (par ex. Brandl, 1981 ; McCallister, 1990 ; Nalbantoglu & Tuncer, 2001 ; Rajasekaran & Rao, 2002).

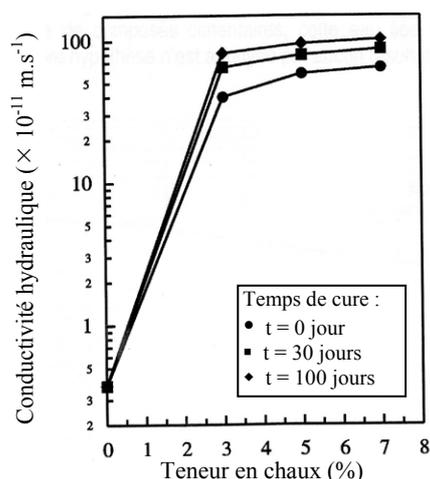


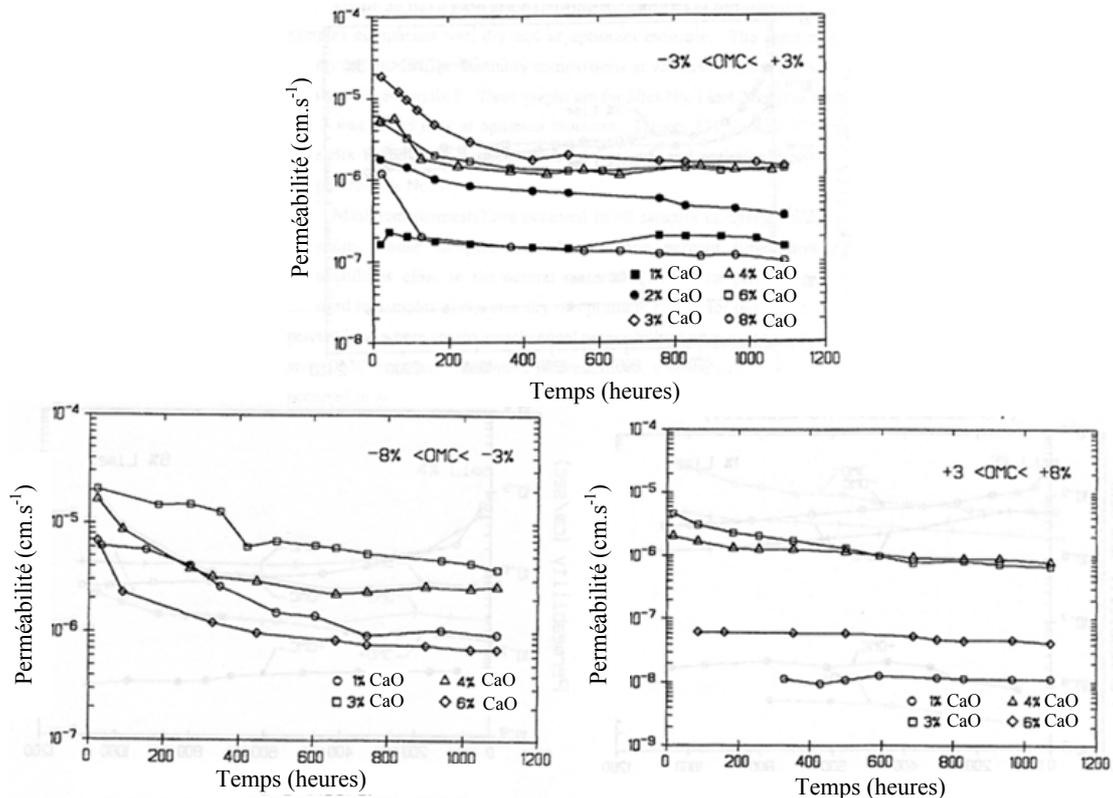
Figure 12. Influence de la teneur en chaux et du temps de cure sur la perméabilité d'une argile compactée à l'optimum mesurée à l'œdomètre sous une contrainte de 800 kPa (Nalbantoglu & Tuncer, 2001).

Cette augmentation est généralement associée, par les auteurs, à la baisse de densité observée suite à l'ajout de chaux, et donc, à la réorganisation des particules induite par le

phénomène de floculation/agrégation. L'ampleur de l'augmentation de perméabilité reste difficile à évaluer. En effet, à titre d'exemple, McCallister (1990) constate que l'ajout de chaux conduit à une augmentation de la perméabilité du sol de 2 à 3 ordres de grandeurs, alors que Brandl (1981) note une augmentation de moins d'un ordre de grandeur.

I.4.3.2. Effets de l'état initial des sols traités à la chaux sur leur perméabilité

Les travaux de nombreux auteurs (par ex. Brandl, 1981 ; McCallister, 1990, McCallister & Petry 1992 ; Nabantoglu & Tuncer, 2001) indiquent que la perméabilité des sols traités à la chaux et compactés est étroitement liée à la quantité de chaux ajoutée (fig. 12 et fig. 13).



* Perméabilité du sol non traité : $5,0 \times 10^{-8} \text{ cm.s}^{-1}$, OMC teneur en eau de compactage optimale

Figure 13. Influence des conditions de compactage sur la perméabilité d'un sol argileux traité à différents dosages en chaux (d'après McCallister, 1990).

En effet, il ressort de ces études que la perméabilité des sols traités augmente jusqu'à l'ajout d'une certaine quantité de chaux, correspondant au point de fixation de la chaux (PFC). Au-

delà de ce seuil, la perméabilité des sols traités stagne, voire diminue. Différentes explications sont avancées par ces auteurs pour expliquer ces variations. Ainsi, ils supposent que lorsque la teneur en chaux est inférieure au PFC, l'augmentation de perméabilité observée est liée à la moins bonne aptitude du sol à être compactée et donc à une diminution progressive de sa densité sèche. Dans le cas de dosages en chaux supérieurs au PFC, ils supposent que les baisses de densité sont contrebalancées par la précipitation importante de produits cimentaires venant bloquer la circulation de l'eau et ainsi réduire la perméabilité du sol.

Les résultats obtenus par Brandl (1981) et présentés sur la figure 14 suggèrent que pour un dosage en chaux donné la perméabilité des sols traités diminue avec le temps de cure. L'explication fournie par l'auteur pour expliquer cette baisse repose sur la formation croissante de produits cimentaires au cours du temps venant obstruer les pores et donc réduire la perméabilité du sol. Cette hypothèse est confirmée par l'évolution de la microstructure des sols avec le temps de cure (Choquette *et al.*, 1987). Les résultats présentés par Nalbantoglu & Tuncer (2001) sont toutefois contradictoires (fig. 12). En effet, leurs résultats indiquent que la perméabilité des sols augmente avec le temps de cure. L'hypothèse avancée par les auteurs pour expliquer ce phénomène s'appuie aussi sur la formation de produits cimentaires, mais qui selon eux, mènerait plutôt en un sol de plus en plus granulaire, présentant une microstructure de plus en plus ouverte, avec des pores de plus en plus grands. Aucune donnée microtexturale n'est donnée dans cette étude pour valider cette hypothèse.

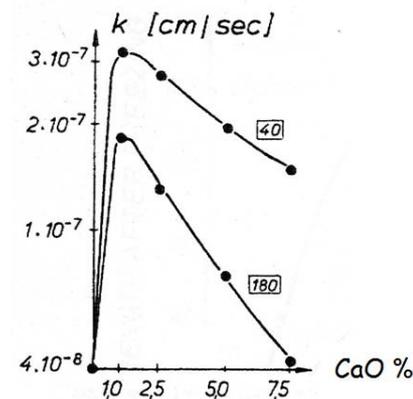


Figure 14. Influence de la quantité de chaux et du temps de cure (indiqué dans les carrés) sur la perméabilité d'un sol limoneux traité à la chaux (Brandl, 1981).

D'autres auteurs tels que El-Rawi & Awad (1981), McCallister (1990) ou Le Borgne (2006) indiquent que la perméabilité des sols traités varie en fonction de la teneur en eau de compactage (fig. 13). Ces auteurs constatent, que pour une teneur en chaux donnée, les sols

traités compactés du côté sec présentent une perméabilité équivalente voire plus forte que celle des sols traités compactés à l'optimum. Au contraire, les sols traités et compactés du côté humide présentent une perméabilité plus faible que celle des sols traités compactés à l'optimum. Les travaux de McCallister (1990) et de Le Borgne (2006), qui ont travaillé respectivement sur trois argiles plastiques et trois sols de nature très différente (argilite, kaolinite pure et limon), montrent, par ailleurs, que les sols traités et compactés du côté humide peuvent présenter, malgré une densité plus faible, une perméabilité proche de celle des sols non traités. Toutefois, les résultats de McCallister (1990) indiquent que ce constat n'est pas vérifié pour toutes les teneurs en chaux (fig. 13). Enfin, McCallister (1990) note aussi que les sols argileux traités et compactés du côté sec ou à l'optimum semblent présenter, quel que soit la teneur en chaux, une perméabilité plus forte que celle des sols non traités et compactés aux mêmes états (un à trois ordres de grandeur différents, les densités sèches variant selon l'état de compactage et la quantité de chaux).

I.4.3.3. Conclusion

Il peut être retenu que la perméabilité des sols traités à la chaux est fortement influencée par les paramètres initiaux : dosage en chaux, temps de cure, conditions de compactage. Ainsi, il semblerait que, pour une condition de compactage donnée, la perméabilité des sols traités diminue lorsque le traitement est réalisé à des dosages en chaux supérieurs au PFC du sol traité. Toutefois, ce point est à considérer avec prudence, la notion de PFC étant très discutée.

L'influence du temps de cure et des conditions de compactage reste controversée. Toutefois, il semblerait que les sols traités compactés du côté sec de leur optimum ou à leur optimum présentent une perméabilité plus forte que celle des sols non traités. L'ampleur des augmentations de perméabilité reste mal connue. En revanche, la perméabilité des sols traités compactés du côté humide semble être du même ordre de grandeur que celle des sols non traités. L'effet de la densité sur la perméabilité des sols reste difficile à évaluer, les études ne prenant pas ce paramètre en compte de manière systématique.

I.5. EFFETS D'UNE CIRCULATION D'EAU SUR LE COMPORTEMENT PHYSICO-CHEMIE, MÉCANIQUE ET HYDRAULIQUE DES SOLS TRAITÉS À LA CHAUX

I.5.1. Introduction

La notion de durabilité correspond à la capacité d'un ouvrage à maintenir un certain niveau de performance après sa mise en service une fois exposé aux sollicitations environnementales. Dans le cas particulier des ouvrages hydrauliques ou des remblais en zone inondable construits en sols traités, la notion de durabilité peut donc être associée à leur capacité à maintenir, face à des contacts prolongés à l'eau, voire à des circulations d'eau, des performances mécaniques suffisamment fortes et une perméabilité suffisamment faible pour assurer les fonctions pour lesquelles ils ont été construits. La durabilité se rapporte ainsi aux comportements mécaniques et hydrauliques des sols traités à la chaux face à de telles sollicitations. La partie précédente a permis d'établir que les performances mécaniques et la perméabilité des sols traités dépendent des mécanismes physico-chimiques engendrés par l'ajout de chaux. Il peut donc être supposé que la durabilité des structures exposées à un contact prolongé à l'eau ou à une circulation d'eau repose, en particulier, sur l'effet de ces sollicitations sur ces mécanismes.

Dans ce contexte, cette partie a pour but de présenter l'état des connaissances sur le comportement physico-chimique, mécanique et hydraulique des sols traités à la chaux soumis à une circulation d'eau. Toutefois, avant de se pencher à proprement dit sur le comportement des sols traités à la chaux soumis à une circulation d'eau, on abordera dans une première partie le comportement des ciments soumis à une circulation d'eau. En effet, du fait de la similitude entre les composés cimentaires formés lors de l'hydratation du ciment et suite au traitement à la chaux dans les sols, une analogie peut être établie entre le comportement des ciments et des sols traités soumis à une circulation d'eau. L'objectif de cette première partie est donc, en s'appuyant sur le comportement des ciments soumis à une circulation d'eau, de se faire une première idée du comportement qu'un sol traité à la chaux pourrait avoir une fois soumis à une circulation d'eau. On s'attachera dans cette première partie à préciser les effets d'une circulation d'eau sur le comportement physico-chimique des ciments. On considérera ensuite l'effet d'une circulation d'eau sur leur microstructure et performances mécaniques. On

détaillera et discutera enfin les données disponibles dans la littérature sur le comportement physico-chimique, mécanique et hydraulique des sols traités à la chaux soumis à une circulation d'eau.

I.5.2. Analogie ciments et sols traités à la chaux soumis à une circulation d'eau

I.5.2.1. Mécanisme d'hydrolyse et stabilité des composés cimentaires

Il est généralement admis dans le cas des ciments qu'une circulation d'eau entraîne des processus d'hydrolyse. Ceux-ci se développent via des phénomènes diffusifs. Il est ainsi observé, d'une part, une diffusion des espèces agressives dans le matériau depuis sa surface (contact solution/solide), et d'autre part, une diffusion des produits de dégradation hors du matériau. L'ensemble de ces processus est caractérisé par l'existence de fronts de dissolution/précipitation (Andra, 2001).

L'étude de la stabilité des hydrates du ciment en fonction du pH permet de se faire une première idée de ces fronts de dissolution/précipitation. En effet, le pH du milieu environnant apparaît comme le paramètre physico-chimique ayant le plus grand impact sur la stabilité des composés cimentaires (par ex. Hatworth *et al.*, 1989 ; Adenot, 1992 ; Revertégat *et al.*, 1992 ; Carde *et al.*, 1996 ; Andra ; 2001, Bourbon, 2001, Glasser *et al.*, 2008). L'évolution des hydrates du ciment peut ainsi être estimée à partir de leur solubilité respective en fonction du pH du milieu environnant, mais aussi, en fonction des concentrations en calcium et/ou magnésium (fig. 15). Le premier hydrate susceptible de se dissoudre par hydrolyse avec l'abaissement du pH est la portlandite, Ca(OH)_2 . Le pH du milieu environnant se trouve alors tamponné à un pH de 12,4 tant que la totalité de la portlandite n'est pas dissoute. Au cours de cette phase, les autres hydrates présents ne subissent pas de dégradation, ceux-ci étant stables pour ce pH. Toutefois, une fois la totalité de la portlandite dissoute, une nouvelle baisse de pH peut être observée. Celle-ci conduit à une décalcification progressive de ces hydrates.

Il peut donc être retenu de l'ensemble de ces travaux que les principaux mécanismes de dégradation des ciments exposés à une circulation d'eau sont la dissolution de la portlandite et la décalcification des hydrates de type C-S-H et/ou C-A-H.

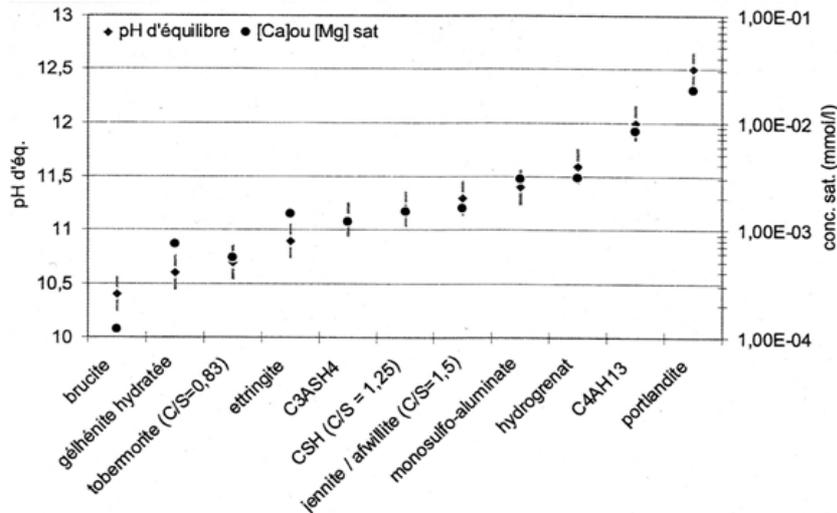


Figure 15. pH d'équilibre et solubilité des principaux hydrates des ciments (d'après Bourbon, 2001).

L'évolution de ces mécanismes au cours de la circulation d'eau peut être appréhendée par le suivi physico-chimique de la solution interstitielle du ciment ou de la solution lixiviée² (par ex. Revertegat *et al.*, 1992 ; Carde *et al.*, 1996 ; Carde & François, 1997 ; Andra ; 2001, Bourbon, 2001, Glasser *et al.*, 2008). En effet, la phase de dissolution de la portlandite est marquée par une forte concentration en calcium et un pH avoisinant 12,4. La dissolution totale de la portlandite présente, qui correspond au début de la phase de décalcification des hydrates de type C-S-H ou C-A-H, est marquée par une baisse du pH et des concentrations en calcium moins importantes (fig. 16).

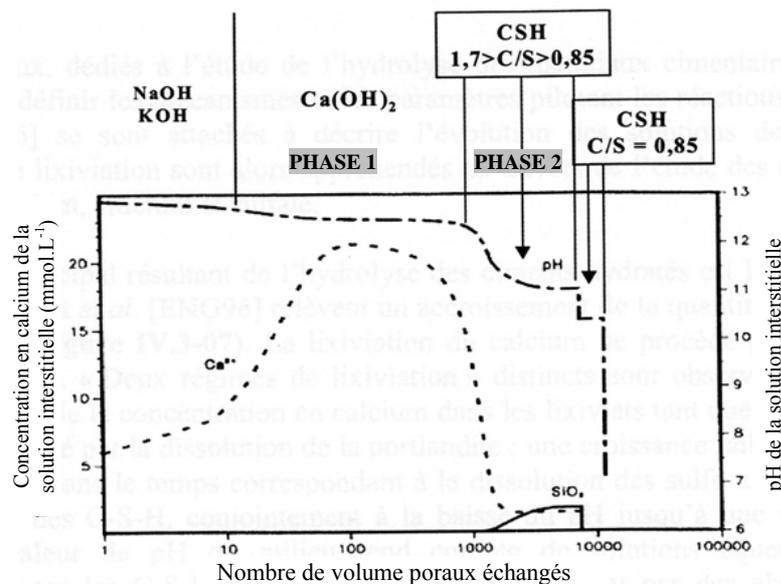


Figure 16. Évolution du pH et des concentrations en calcium et silicium de l'eau interstitielle d'un ciment soumis à une lixiviation (d'après Andra, 2001).

² la solution lixiviée étant considérée comme représentative de la solution interstitielle à un temps donné

La baisse des concentrations en calcium lors de la phase de décalcification des hydrates est associée au lessivage moins facile des C-S-H ou des C-A-H comparé à celui de la portlandite (Carde *et al.*, 1996). Une faible quantité de silicium peut aussi être mise en évidence en solution lors de cette seconde phase. Celle-ci provient de la dissolution d'une partie des C-S-H.

I.5.2.2. Effets de la circulation d'eau sur la porosité et la résistance à la compression des ciments

a) Effet de la circulation d'eau sur la porosité des ciments

La dissolution de la portlandite et la décalcification des produits cimentaires suite à une circulation d'eau conduit à une augmentation de la porosité des ciments (par ex. Bentz & Garboczi, 1992 ; Delagrave *et al.*, 1996, Carde *et al.*, 1996 ; Tognazzi, 1998 ; Andra, 2001). L'augmentation de porosité est corrélée au lessivage des ions calcium. Il est par ailleurs généralement admis que la majeure partie de cette augmentation de porosité est associée à la dissolution de la portlandite, plutôt qu'à la décalcification des autres hydrates. En effet, leur décalcification ne conduit pas à leur dissolution immédiate mais en leur restructuration. De ce fait, leur microstructure est peu modifiée.

b) Effet de la circulation d'eau sur la résistance à la compression simple des ciments

De nombreux travaux (par ex. Carde *et al.*, 1996 ; Carde & François, 1997 ; Saito & Deguchi, 2000 ; Andra, 2001 ; Heukamp *et al.*, 2001 ; Nguyen *et al.*, 2007) montrent qu'une circulation d'eau conduit à une baisse des performances mécaniques des ciments. Cette baisse est généralement associée aux mécanismes d'hydrolyse cités précédemment, c'est-à-dire la dissolution de la portlandite et la décalcification des hydrates. L'étude de Carde *et al.* (1996) souligne que la formulation du ciment joue un rôle important dans les pertes de résistances. Leurs résultats montrent ainsi que les pertes de résistances d'un ciment avec ajout de composés pouzzolaniques (fumées de silice) sont moins importantes que pour un ciment pur (fig. 17). L'hypothèse avancée par les auteurs pour expliquer cette différence de comportement repose sur les liens existants entre les mécanismes de dégradation, la porosité et les performances mécaniques. Tout d'abord, la résistance à la compression des ciments est

étroitement liée à la porosité du matériau. Ainsi, il est généralement admis que la résistance est d'autant plus forte que la porosité est faible. Or dans le cas d'un ciment pur la proportion de portlandite formée est plus importante que dans le cas d'un ciment avec additif pouzzolaniques (ce dernier présente une part plus importante d'hydrates de type C-S-H ou C-A-H). Le phénomène de dissolution de portlandite induit par la circulation d'eau est donc plus important dans le cas des ciments purs et résulte, par conséquent, en une plus forte augmentation de porosité. Celle-ci explique la plus faible résistance des ciments purs exposés à une circulation d'eau.

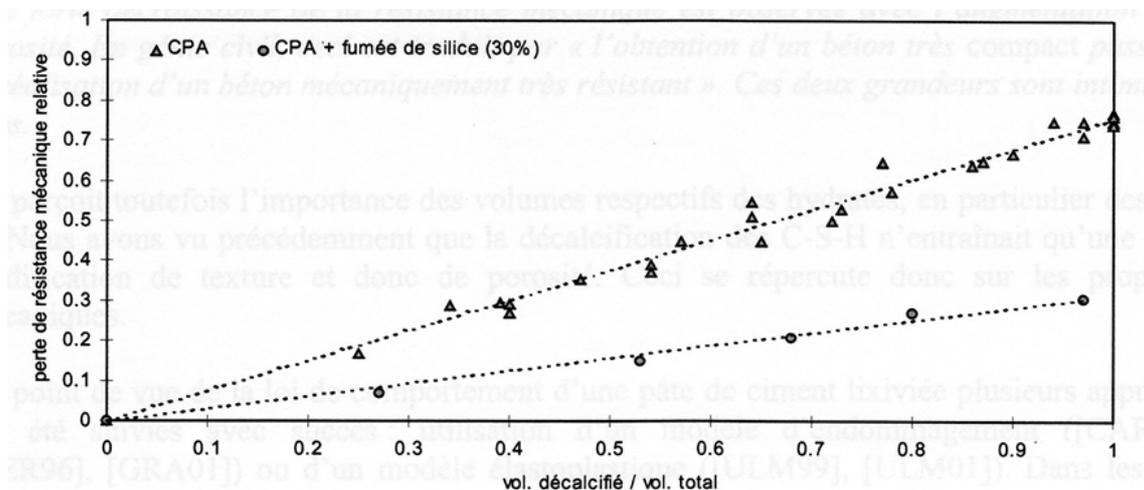


Figure 17. Évolution de la résistance mécanique d'un ciment pur et d'un ciment avec addition de fumées de silice (30%) en fonction de leur état d'altération (Carde *et al.*, 1996).

I.5.2.3. Conclusion

La circulation d'eau conduit au développement de deux mécanismes physico-chimiques dans les ciments : la dissolution de la portlandite et la décalcification des matériaux cimentaires. Ces mécanismes peuvent être mis en évidence par un suivi du comportement physico-chimique des lixiviats, et notamment par un suivi du pH et des concentrations en calcium et silicium des lixiviats. Ces mécanismes sont considérés comme des mécanismes de dégradation car ils conduisent en une augmentation de la porosité du ciment qui est associée à une perte de performance mécanique. L'ampleur de l'augmentation de porosité et de perte de performance semble étroitement liée à la proportion et à la nature des produits cimentaires formés.

L'ensemble de ces résultats permet de se faire une première idée du comportement physico-chimique, mécanique et hydraulique que pourrait présenter les sols traités à la chaux soumis à une circulation d'eau. En effet, il peut être supposé, par analogie avec les ciments, que la circulation d'eau pourrait conduire, dans le cas des sols traités à la chaux, en une décalcification des produits cimentaires formés et en une dissolution de la portlandite précipitée (dans le cas où les conditions nécessaires à sa précipitation seraient remplies, c'est-à-dire pH de 12,4 et concentration en calcium de la solution de 22 mmol.L⁻¹). Ces processus de dissolution et de décalcification pourraient entraîner selon leur ampleur une ouverture de la porosité des sols traités, et donc, une augmentation de la perméabilité, mais aussi des pertes de performances mécaniques. Ces hypothèses suggèrent qu'une circulation d'eau pourrait être pénalisante en terme de durabilité.

Toutefois, cette analogie doit être considérée avec prudence du fait des nombreuses différences existantes entre un ciment et un sol traité : quantités de produits cimentaires plus faibles dans les sols traités que dans les ciments, proportions des différents hydrates formés dans les ciments et sols traités vraisemblablement différentes (c'est-à-dire quantité de portlandite formée dans un sol traité à la chaux faible comparée à un ciment pur), plus faibles pH et plus faibles concentrations en calcium dans les sols traités que dans les ciments, porosité des sols traités compactés plus forte que celle des ciments, etc. L'ampleur des phénomènes de dégradation et leurs conséquences (ouverture de la porosité, pertes de performances) ainsi que les différents paramètres les contrôlant doivent donc être déterminés dans le cas spécifique des sols traités à la chaux.

I.5.3. Comportement physico-chimique, mécanique et hydraulique des sols traités à la chaux soumis à une circulation d'eau

Quelques études sont disponibles sur ce sujet (Malhotra & Bhaskar, 1983 ; McCallister, 1990, McCallister & Petry, 1992; De Bel, 2005 ; Khattab *et al.*, 2007). On s'attachera dans la première partie de ce paragraphe à présenter les matériaux et différents protocoles d'essais utilisés dans ces études pour simuler une circulation d'eau. On présentera ensuite successivement les résultats de ces auteurs sur le comportement physico-chimique et géotechnique des sols traités à la chaux.

I.5.3.1. Matériaux et méthodes expérimentales pour simuler les circulations d'eau

a) Matériaux

Les conditions initiales (c'est-à-dire dosages en chaux, temps de cure, conditions de compactage) ainsi que la nature des matériaux utilisés par les différents auteurs qui se sont intéressés au comportement des sols traités à la chaux soumis à une circulation d'eau sont très différentes. Le tableau 5 récapitule ces différences.

Tableau 5. Récapitulatif des caractéristiques des matériaux employés par les différents auteurs.

	Nature du sol	Type d'argile majoritaire	w_L^a (%) et I_p^b	Dosage en chaux (%)	Temps de cure (jours)	Conditions de compactage ^c
Malhotra & Bashkar (1983)	argile « black cotton »	montmorillonite	$w_L = 72\%$ $I_p = 27\%$	2 %, 4% et 6 %	0 à 56	OMC de chacun des sols
	sol alluvial	illite	$w_L = 28\%$ $I_p = 18\%$			
McCallister (1990)	argile plastique	calcite en majorité + montmorillonite et kaolinite	$w_L = 60\%$ $I_p = 33\%$	1 % à 9 %	48 h à 49°C	OMC de chacun des sols, DMC et WMC (entre 3% et 8 % ± par rapport à OMC)
McCallister & Petry (1992)	argile plastique	calcite en majorité + montmorillonite	$w_L = 63\%$ $I_p = 30\%$			
	argile plastique	-	$w_L = 76\%$ $I_p = 45\%$			
De Bel (2005)	limon	quartz et kaolinite	$w_L = 34\%$ $I_p = 16\%$	3 %	0, 7, 28 à 22°C, 36°C et 49°C	OMC
Khatab <i>et al.</i> (2007)	bentonite « FoCa »	kaolinite et smectite	$w_L = 115\%$ $I_p = 70\%$	4 %	7	OMC

^a limite de liquidité, ^b indice de plasticité, ^c OMC = teneur en eau optimale, DMC = côté sec, WMC = côté humide.

Malhotra & Bashkar (1983) ont travaillé à la fois sur une argile plastique et un sol limoneux traités à des dosages en chaux de 2 %, 4 % et 6 %. McCallister (1990), McCallister & Petry (1992), Khatab *et al.* (2007) ont travaillé exclusivement sur des argiles plastiques à très plastiques. Les dosages en chaux varient de 1 % à 9 % pour McCallister et McCallister & Petry (1992). Khatab *et al.* (2007) n'ont considéré qu'un unique dosage de 4 %. Les sols utilisés par McCallister et McCallister & Petry (1992) présentent par ailleurs la particularité d'être relativement calcaires (teneur en carbonate non précisée). Au contraire de ces auteurs, De Bel (2005) a travaillé sur un sol limoneux traité à 3 % de chaux.

Chaque matériau a été compacté à son optimum Proctor excepté dans les études de McCallister (1990) et McCallister & Petry (1992) qui ont aussi considéré des compactages du côté sec et humide. Enfin, les conditions de cure (temps et température) appliquées aux matériaux varient en fonction des études considérées.

b) Méthodes expérimentales

Différentes méthodes expérimentales ont été employées dans ces études pour simuler une circulation d'eau. Le tableau 6 permet de récapituler ces différences. Les méthodes de simulation peuvent être classées en deux grands groupes : les méthodes dites accélérées et les méthodes dites en régime « normal », c'est-à-dire proche des conditions réelles auxquelles les sols traités peuvent être confrontés dans la pratique.

Tableau 6. Classement des méthodes expérimentales utilisées pour simuler la circulation d'eau par les différents auteurs.

	Malhotra & Bashkar (1983)	McCallister (1990) McCallister & Petry (1992)	De Bel (2005)	Khatab <i>et al.</i> (2007)
Méthode régime accéléré $i^a > 20$	-	$i = 80$	$i = 50$	
Méthode régime « normal » $i < 20$	-			$i = 10$

^a i = gradient hydraulique.

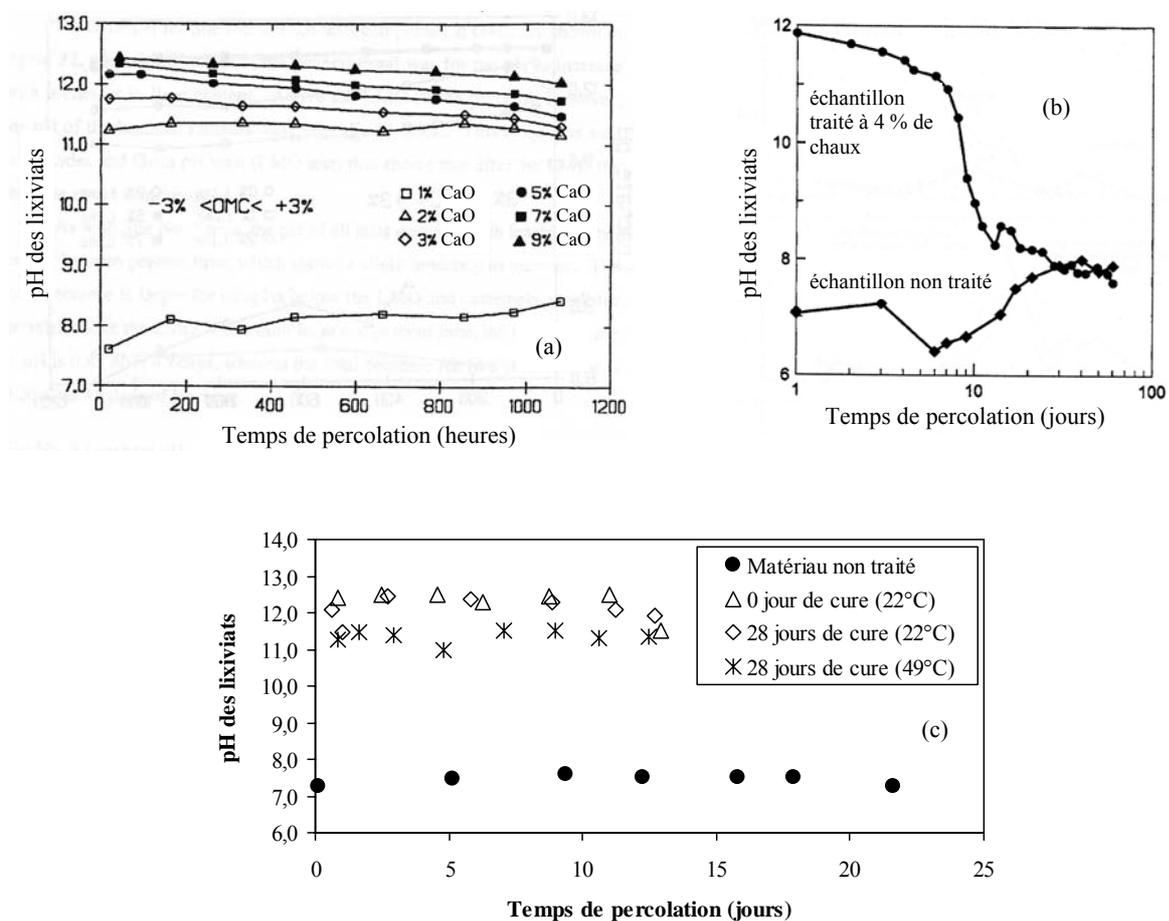
Les méthodes employées par McCallister (1990), McCallister & Petry (1992) et De Bel (2005) sont comparables. En effet, la circulation d'eau a été, dans chacune de ces études, simulée à partir d'un système de percolation accéléré basé sur des cellules similaires à des perméamètres à paroi flexible. Toutefois, les conditions d'essais utilisées dans ces études diffèrent. En effet, McCallister (1990) et McCallister & Petry (1992) ont travaillé avec des cellules de 15,2 cm de diamètre et de 17,5 cm de hauteur soumises à un gradient hydraulique moyen de 80 pendant 45 ou 90 jours. De son côté De Bel (2005) a utilisé des cellules triaxiales de dimensions beaucoup plus petites (6,9 cm de hauteur et 3,6 cm de diamètre). Les éprouvettes ont été soumises à une circulation d'eau sous un plus faible gradient de 50 pendant des durées plus courtes, variant entre 11 et 22 jours.

La méthode employée par Khatab *et al.* (2007) utilise un dispositif de circulation d'eau basé sur une cellule oedométrique de 6,5 cm de diamètre et de 5 cm de hauteur.

Enfin, Malhotra & Bashkar (1983) fournissent peu d'information sur leur protocole expérimental. Ceux-ci mentionnent que les essais réalisés sont similaires à des essais de perméabilité sous charge constante.

I.5.3.2. Effets d'une circulation d'eau sur le comportement physico-chimique des sols traités à la chaux

Les résultats physico-chimiques présentés par les différents auteurs ne permettent pas de dégager une tendance générale quant à l'évolution du pH des lixiviats au cours d'une circulation d'eau. En effet, McCallister (1990), McCallister & Petry (1992) ou Khattab *et al.* (2007) observent des baisses de pH au cours de leurs essais (fig. 18a et fig. 18b). Au contraire, De Bel (2005) note que le pH des lixiviats reste stable au cours de la circulation d'eau (fig. 18c).



* OMC : teneur en eau de compactage optimale

Figure 18. Évolution du pH des lixiviats en fonction du temps de percolation : (a) argile traitée à différentes teneur en chaux (d'après McCallister, 1990), (b) FoCa traitée à 4 % de chaux (d'après Khattab *et al.*, 2007), (c) limon traité à 3 % de chaux (d'après De Bel, 2005).

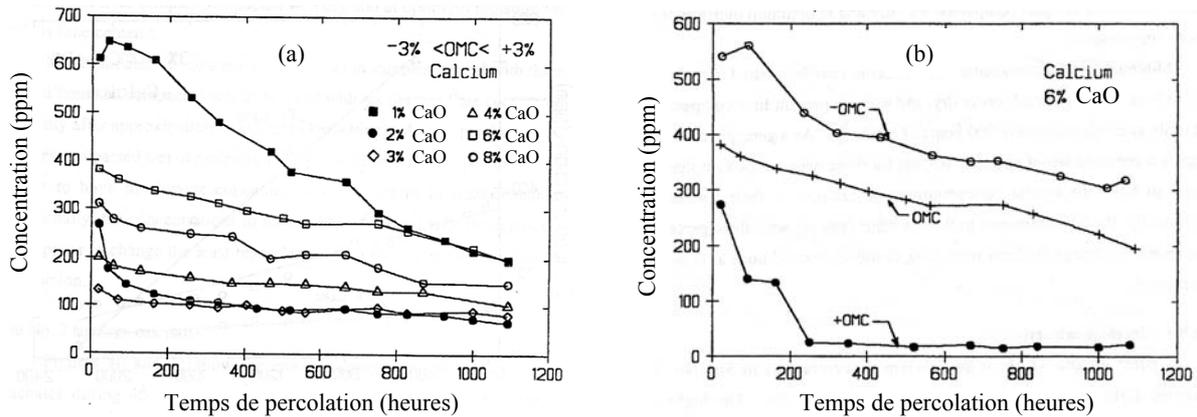
Les baisses de pH observées par McCallister (1990), McCallister & Petry (1992) ou Khattab *et al.* (2007) peuvent être attribuées à la consommation de la chaux pour la formation de nouvelles phases (cimentaires ou carbonatées) et/ou au lessivage de la chaux. Il n'est

toutefois pas possible de conclure quant à la part de chacun de ces phénomènes. Cependant, il est probable, compte tenu de la faible cinétique des réactions pouzzolaniques, qu'un faible gradient favorise la formation des produits cimentaires par rapport à un fort gradient pour lequel le lessivage de la chaux devrait être prépondérant. Ainsi, il peut être supposé dans le cas de Khattab *et al.* (2007) qui ont utilisé un faible gradient hydraulique (tab. 6), que la forte baisse de pH des lixiviats (fig. 18b) pourrait être, non pas liée au lessivage total de la chaux, mais à une consommation importante de la chaux pour la formation de composés cimentaires. Dans le cas de McCallister (1990) et McCallister & Petry (1992) qui ont utilisé un gradient hydraulique beaucoup plus fort (tab. 6), le lessivage de la chaux serait prédominant par rapport à la formation de composés cimentaires expliquant ainsi les plus faibles baisses de pH. Néanmoins, les différentes cinétiques de baisse de pH observées par ces auteurs pourraient aussi être associées à la différence de nature entre les matériaux, aux différentes quantités de chaux ajoutée et aux différentes conditions de cure utilisées (tab. 5) La contribution de chacun de ces paramètres dans l'évolution du pH au cours d'une circulation reste à déterminer. Enfin, l'absence de baisse de pH dans l'étude de De Bel (2005) sous-entend que la chaux n'est que faiblement consommée, voire pas du tout. Ceci pourrait indiquer une faible réactivité du matériau utilisé par De Bel (2005) vis-à-vis de la chaux comparé au matériau plus argileux utilisé par McCallister (1990), McCallister & Petry (1992) ou Khattab *et al.* (2007). Toutefois, il peut aussi être supposé que le temps de percolation utilisé par l'auteur était trop court (14 jours seulement et plus de 45 jours pour les autres études) pour entraîner une baisse du pH.

Au contraire de l'évolution du pH, une tendance générale se dégage en ce qui concerne l'évolution des concentrations en calcium des lixiviats au cours d'une circulation d'eau pour les différentes études considérées. En effet, les études de McCallister (1990), McCallister & Petry (1992), De Bel (2005) et Khattab *et al.* (2007) indiquent, malgré la nature différente des matériaux et des conditions de percolation utilisées, qu'une circulation d'eau entraîne un lessivage des ions calcium : ce dernier diminue avec le temps de percolation (fig. 19).

Les résultats de ces auteurs suggèrent que l'ampleur de ce phénomène dépend de plusieurs paramètres. Ainsi, une forte teneur en chaux, un faible temps de cure et une faible teneur en eau de compactage semblent favoriser le lessivage du calcium (fig. 19). En revanche, une faible teneur en chaux, un long temps de cure et une forte teneur en eau de compactage semblent limiter le lessivage du calcium (fig. 19).

L'origine du calcium lessivé et les raisons de l'ampleur de ce lessivage restent mal connues. Différentes hypothèses sont toutefois avancées par les auteurs. Une partie du calcium pourrait, comme le suggère l'ensemble des auteurs, provenir de la chaux non consommée. De Bel (2005) suppose que le calcium lessivé pourrait aussi, comme dans le cas des ciments, provenir de la décalcification d'une partie des composés cimentaires formés. La part de chacun de ces processus au cours de la circulation d'eau doit toutefois être déterminée.



* OMC : teneur en eau de compactage optimale, -OMC : compactage du côté sec, +OMC : compactage du côté humide

Figure 19. Évolution des concentrations en calcium des lixiviats en fonction du temps de percolation pour différentes teneurs en chaux (a) et différente teneur en eau de compactage (d'après McCallister, 1990).

D'après McCallister (1990), la perméabilité des sols traités pourrait jouer un rôle significatif dans les quantités de calcium lessivé et donc sur ces différents processus. En effet, il constate que les fortes et faibles quantités de calcium lessivé observées respectivement pour un compactage du côté sec et du côté humide sont corrélées à une forte perméabilité et une faible perméabilité. Enfin, les travaux de De Bel (2005) suggèrent que le temps de cure a aussi une influence sur ces processus. En effet, il observe que plus le temps de cure est long, plus la quantité de calcium lessivé est faible (tab. 7). L'hypothèse avancée par l'auteur repose sur la meilleure cristallisation des composés au fur et à mesure du temps qui les rend moins facilement lessivable.

Tableau 7. Pourcentage de calcium lixivié au bout de 14 jours de lixiviation en fonction des conditions de cure (d'après De Bell, 2005).

Conditions et temps de cure	Pourcentage de calcium lixivié en 14 jours de percolation par rapport à la quantité de chaux initiale (% massique)
0 jours de cure à 22°C	29
28 jours de cure à 22°C	22
28 jours de cure à 49°C	3

c) Évolution physico-chimique du sol

Seuls Malhotra & Bhaskar (1983) et McCallister (1990) se sont intéressés à l'évolution physico-chimique des sols traités au cours d'une circulation d'eau. Ces auteurs se sont toutefois limités à l'évolution de la teneur en chaux libre (chaux sous la forme de portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, et d'oxyde de calcium, CaO) dans les sols traités après différents temps de percolation. Pour ce faire, les auteurs ont utilisé la méthode à l'E.D.T.A..

Les résultats de ces auteurs restent discutables. En effet, Malhotra & Bhaskar (1983) ont estimé que la différence entre la quantité de chaux initialement ajoutée et la quantité de chaux mesurée à la fin des percolations dans les éprouvettes correspondait à la quantité de chaux lessivée. Cette hypothèse de travail est erronée puisque les auteurs ne prennent pas en compte la formation éventuelle de nouvelles phases cimentaires (C-S-H, C-A-H ou C-A-S-H) ou carbonatées. Or, celles-ci participent à la consommation de la chaux contenue dans le sol. Ainsi, il n'apparaît pas possible, comme ils le font dans leur étude (fig. 20) de déterminer la part de chaux réellement lessivée de celle qui est consommée par les réactions pouzzolaniques.

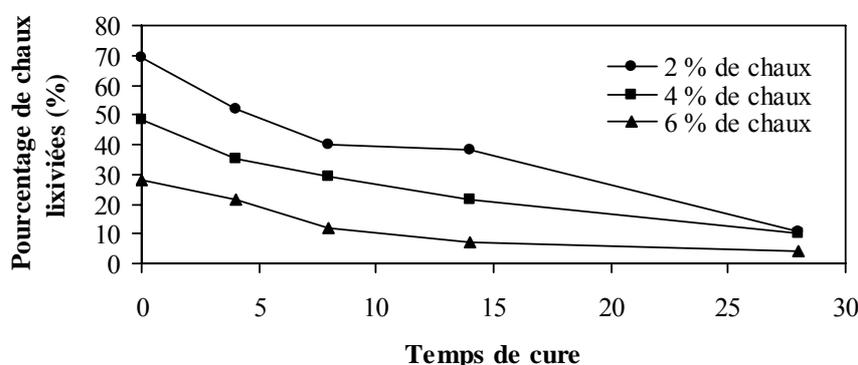


Figure 20. Influence du temps de cure et de la quantité de chaux ajoutée sur le pourcentage de chaux lessivé au cours de la percolation d'un sol argileux (d'après Malhotra & Bhaskar, 1983).

Les résultats de McCallister (1990) suggèrent de leur côté, que la chaux serait, excepté pour les très forts dosages en chaux ($> 6\%$), en grande partie lessivée après 45 jours de percolation (résultats proche de 0%). L'auteur remet en cause la méthode de mesure utilisée, estimant que ces résultats sont aberrants, la totalité de la chaux ne pouvant pas, d'après lui, avoir été lessivée en si peu de temps. Toutefois, McCallister (1990) ne semble pas prendre en compte que seules les espèces $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et CaO sont mesurées avec cette méthode, et que la consommation de la chaux pour la formation de produits cimentaires et la chaux dissoute ne sont pas mesurées avec cette méthode. Les faibles quantités de chaux relevées dans les sols en

fin de percolation pourraient être ainsi associées, non pas à des erreurs de mesures, mais à une forte dissolution de la chaux ou encore à la formation d'une grande quantité de produits cimentaires. Il n'est toutefois pas possible de quantifier la part de chacun de ces phénomènes.

I.5.3.3 Effets d'une circulation d'eau sur le comportement géotechnique des sols traités à la chaux

a) Évolution des propriétés mécaniques des sols traités

L'ensemble des travaux présentés par les différents auteurs indique que la circulation d'eau conduit, quels que soient le gradient hydraulique utilisé et la nature des matériaux, à une baisse des performances mécaniques. En effet, les résultats de Malhotra & Bashkar (1983) montrent que l'indice portant Californien³ (CBR) diminue suite à la percolation (tab. 8). McCallister (1990), McCallister & Petry (1992), et De Bel (2005) constatent de leur côté que la circulation d'eau entraîne une baisse de la résistance à la compression simple (fig. 21).

Tableau 8. Évolution de la perméabilité, du pourcentage de chaux lixiviée et des valeurs de CBR selon le temps de cure pour le sol illitique traité à 4 % de chaux. (d'après Malhotra & Bhaskar, 1983).

Temps de cure	Valeurs CBR (%)		
	Avec percolation	Sans percolation	% de perte
4	25,2	55,3	54
8	42,3	66,4	36
14	55,6	87,2	36
28	64,5	106,8	39

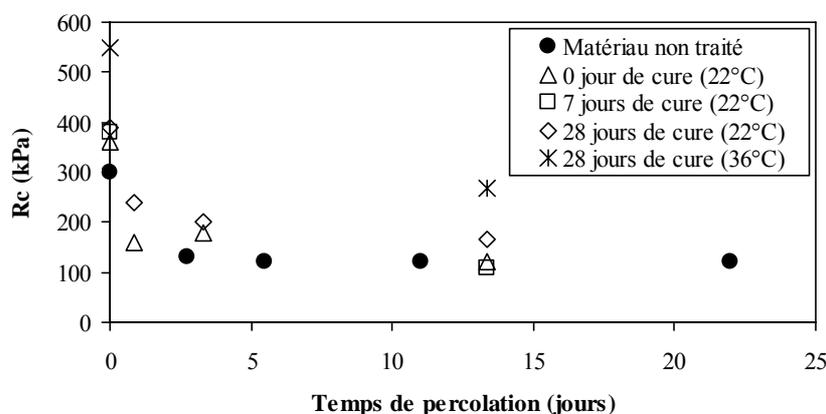
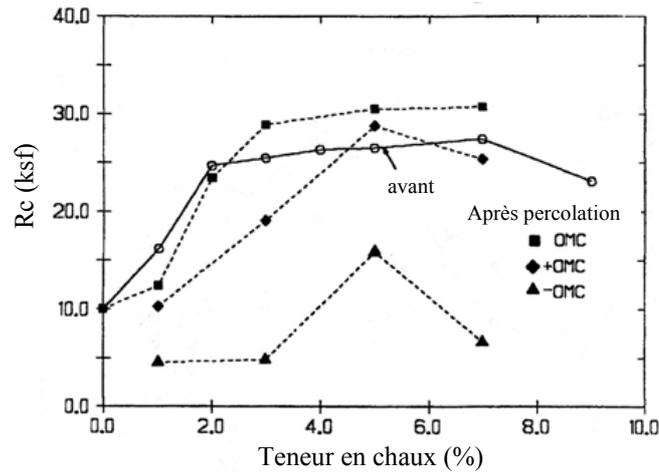


Figure 21. Influence du temps de percolation sur la résistance à la compression simple d'un limon traité à 3 % de chaux et soumis à différent types de cure (d'après De Bel, 2005).

³ L'indice CBR, mesure de la résistance au poinçonnement d'un sol compacté, permet de caractériser la portance du sol, c'est-à-dire son aptitude à permettre la circulation des engins en phase chantier.

L'origine exacte de ces pertes de performance reste toutefois mal connue. Les résultats de De Bel (2005) suggèrent qu'une partie de ces pertes de performance pourraient être attribuée, non pas à un effet négatif de la circulation d'eau, mais à la saturation du sol. En effet, il constate qu'une immersion des éprouvettes de sols traités conduit aussi en une forte baisse de résistance : 40 % pour 7 jours d'immersion. Les résultats de McCallister (1990), McCallister & Petry (1992) et Malhotra & Bashkar (1983) ne prennent pas en compte ce phénomène, les auteurs comparant les performances mécaniques obtenues après percolation à celles obtenues avant percolation et non saturation. Il ne semble donc pas possible dans ces études de déterminer la part des pertes de performance causée par la circulation d'eau. L'hypothèse avancée par De Bel (2005) pour expliquer l'autre part des pertes de performance repose sur le lessivage du calcium et la possible décalcification des produits cimentaires formés dans les sols traités avec la circulation d'eau. L'analogie entre comportement des ciments et comportement des sols traités à la chaux établie dans la partie précédente vient supporter cette hypothèse. Il peut de plus être supposé à partir de cette analogie, que ces pertes de performance sont associées à une ouverture de porosité du matériau causée par le lessivage du calcium.

L'ampleur des pertes de performance semble étroitement liée au temps de cure (tab. 8 et fig. 21), à la quantité de chaux et à la teneur en eau de compactage (fig. 22). Ainsi, plus le dosage en chaux, le temps de cure, la teneur en eau de compactage sont faibles plus les pertes de performances sont fortes. Certaines hypothèses sont avancées par les auteurs pour expliquer l'effet de ces différents paramètres sur les pertes de performances. McCallister (1990) souligne qu'un lien semble exister entre teneur en eau de compactage, quantité de calcium lessivé, perméabilité et performances mécaniques. En effet, il constate qu'un compactage du côté sec entraîne, au contraire d'un compactage du côté humide, une forte perméabilité, un lessivage important en ions calcium et une forte perte de performance. Il en conclut que les pertes de performance pourraient liées à la quantité de calcium lessivé, la perméabilité des éprouvettes contrôlant l'ampleur du lessivage, et donc les pertes de performances. De son côté De Bel (2005) suppose qu'un long temps de cure est favorable au maintien des performances mécaniques du fait de la meilleure cristallisation des composés cimentaires qui deviennent plus difficilement lessivables. Il peut aussi être avancé que le maintien des performances est meilleur avec de long temps de cure, la quantité de produits cimentaires formés étant vraisemblablement plus importante qu'avec des temps de cure courts.

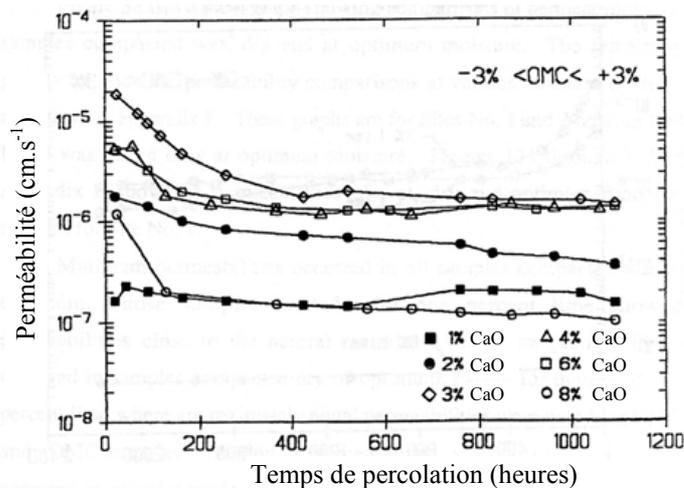


* OMC : teneur en eau de compactage optimale, -OMC : compactage du coté sec+OMC : compactage du coté humide

Figure 22. Influence de la teneur en eau de compactage et de la teneur en chaux sur la résistance à la compression simple d'une argile traitée soumise à différents teneurs en chaux et compactée à son optimum Proctor (d'après McCallister, 1990).

b) Évolution de la perméabilité des sols traités

Les résultats de McCallister (1990), McCallister & Petry (1992) et Khattab *et al.* (2007) montrent que l'évolution de la perméabilité des sols traités à la chaux est marquée par deux phases distinctes, quels que soient la teneur en eau de compactage et le dosage en chaux considérés (fig. 23).



* OMC : teneur en eau de compactage optimale

Figure 23. Évolution de la perméabilité aux cours d'une circulation d'eau à long terme d'une argile traitée à différents teneurs en chaux et compactés à son optimum (d'après McCallister, 1990).

Au cours de la première phase (allant jusqu'à 12 et 10 jours de percolation pour les études de McCallister (1990) et Khattab *et al.* (2007) respectivement) la perméabilité des échantillons traités diminue fortement. Au cours de la seconde phase, la perméabilité continue de diminuer mais plus faiblement. McCallister (1990) et McCallister & Petry (1992) attribuent cette première baisse à la saturation des éprouvettes. L'hypothèse avancée par les auteurs pour expliquer la seconde phase de diminution repose sur la formation croissante de produits cimentaires au cours du temps de percolation, venant boucher les pores et ainsi réduire la perméabilité. Toutefois, cette baisse de perméabilité n'est pas en adéquation, dans le cas de l'étude de McCallister (1990) et McCallister & Petry (1992), avec les pertes de performance mécanique et la vraisemblable ouverture de porosité induite par la circulation d'eau suite au lessivage du calcium.

I.6. CONCLUSION

Ce premier chapitre a tout d'abord permis de passer en revue les principales caractéristiques des sols utilisés dans le domaine des terrassements, mais aussi, l'ensemble des mécanismes physico-chimiques engendrés par l'ajout de chaux dans les sols, ainsi que les différents facteurs influençant l'évolution de ces mécanismes.

L'effet de la chaux et des différents mécanismes physico-chimiques sur les caractéristiques des sols avant et après compactage a ensuite été présenté. Cette partie a permis de mettre en évidence que la microstructure des sols traités à la chaux compactés, et en particulier des sols limoneux, reste peu étudiée, notamment lorsque les conditions de compactage diffèrent de celle de l'optimum du sol traité. Il a par ailleurs été souligné que le rôle des conditions de compactage et de la microstructure sur la perméabilité et les performances mécaniques des sols traités à la chaux reste aussi sujet à discussion, d'où la nécessité de coupler systématiquement les approches géotechniques à des approches microstructurales.

L'étude sur le comportement des ciments soumis à une circulation d'eau a permis, par analogie, de se faire une première idée du comportement physico-chimique, mécanique et hydraulique que pourrait présenter un sol traité à la chaux soumis à une circulation d'eau. Il a ainsi été montré qu'une circulation d'eau pourrait conduire au développement de mécanismes de dégradation physico-chimiques tels que la dissolution de la portlandite et la décalcification des produits cimentaires. Ces mécanismes pourraient induire une ouverture de porosité du

matériau, et ainsi entraîner des pertes de performances mécaniques. Toutefois, il a été noté, compte des nombreuses différences existantes entre ciments et sols traités, que l'ampleur de ces phénomènes ainsi que les paramètres les régissant doivent être déterminés dans le cas particulier des sols traités à la chaux.

Enfin, l'état des connaissances sur le comportement des sols traités à la chaux a permis de souligner que l'évolution physico-chimique des sols traités à la chaux résulte vraisemblablement d'une combinaison entre processus de dissolution (dissolution de la chaux, de la portlandite, et décalcification des produits cimentaires) et processus de précipitation (formation de produits cimentaires). Toutefois, l'ampleur de chacun de ces processus ainsi que le rôle des paramètres initiaux sur ces processus (perméabilité, conditions de compactage, dosage en chaux, et temps de cure) restent mal connus. Il a aussi été mis en évidence qu'une circulation d'eau menait à une baisse des performances mécaniques. Cependant, la contribution de la phase initiale de saturation des sols traités ainsi que le rôle des paramètres initiaux sur les pertes de performances doivent être approfondis, les études disponibles étant trop peu nombreuses pour conclure quant à la prédominance d'un de ces paramètres. Il a par ailleurs été montré que l'hypothèse avancée pour expliquer l'évolution de la perméabilité des sols traités à la chaux (c'est-à-dire baisse de perméabilité causée par la précipitation de produits cimentaires) ne semble pas en adéquation avec les pertes de performances. L'origine de cette contradiction doit être investiguée. Enfin, il a été noté que les conclusions disponibles quant à l'évolution de la perméabilité des sols traités ne concernent que des sols traités très argileux : l'évolution de la perméabilité dans le cas particulier des sols limoneux traités à la chaux soumis à une circulation d'eau reste donc incertaine.

L'objectif des chapitres suivants est d'apporter quelques éléments de réponse à l'ensemble des interrogations soulevées dans ce chapitre.

Chapitre II – Matériaux et procédures expérimentales

L'objectif de ce chapitre est de donner une vision globale des différents matériaux utilisés et des différentes procédures expérimentales et techniques d'analyses employées au cours de ce travail. Ce chapitre consiste ainsi en une synthèse des principaux points expérimentaux qui sont présentés en détail dans les chapitres suivants (chapitres III, IV et V et articles 1, 2 et 3).

II.1. MATÉRIAUX

II.1.1. Chaux

La chaux utilisée est de la chaux vive fournie par le groupe Lhoist. Ses principales caractéristiques sont données dans le tableau 9.

Tableau 9. Caractéristiques chimiques de la chaux vive utilisée.

CaO + Ca(OH) ₂ (% massique)	CaO (% massique)	MgO (% massique)	CO ₂ (% massique)	< 80 µm (%)
93,1	90,4	1,4	0,3	73,2

II.1.2. Sol

Suite aux objectifs fixés dans cette étude et présentés dans l'introduction générale, il a été choisi de travailler sur un sol limoneux. Parmi l'ensemble de ces sols, notre choix s'est arrêté sur le limon de Jossigny, ce sol présentant, par rapport aux autres, l'avantage d'avoir déjà fait l'objet de nombreuses études (par ex. Cui, 1993 ; Cui & Delage, 1996 ; Cui *et al.*, 2003). Ses caractéristiques géotechniques sont donc bien connues.

Le limon de Jossigny est un limon du Bassin Parisien. Une masse d'environ 700 kg a été prélevée. Après prélèvement, le sol a été soumis à une courte période de séchage de 3 jours à $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ (humidité relative ambiante). Cette étape s'est avérée nécessaire afin de faciliter le broyage (concasseur à mâchoire) et tamisage à 2 mm. Après ces deux étapes, la fraction de limon de Jossigny inférieure à 2 mm obtenue a été homogénéisée (quartage du sol) et conditionnée en sac de 30 kg.

Les principales caractéristiques géotechniques et physico-chimiques du limon de Jossigny sont données dans les tableaux 10 et 11. Sa courbe granulométrique est présentée sur la figure 24. L'ensemble de ses caractéristiques (granulométrie, sédimentométrie, masse volumique des particules solides, valeur de bleu de méthylène, limites de consistance, pH du sol, capacité d'échange cationique, et calcimétrie) a été déterminé à partir des différentes normes d'identification en vigueur dans le domaine des terrassements. Ce sol peut être classé dans la catégorie A2 selon la classification des sols pour les terrassements (NF P 11 300).

Enfin, une analyse par diffraction des rayons X sur poudre non orientée du matériau broyé à $2\text{ }\mu\text{m}$ a permis de montrer que le limon de Jossigny est composé en majorité de feldspaths et de quartz. Sa fraction argileuse contient, quant à elle, essentiellement de l'illite et de la kaolinite, avec une quantité non négligeable d'interstratifiés illite-smectite.

Tableau 10. Principales caractéristiques géotechniques et physico-chimiques du limon de Jossigny.

Propriétés géotechniques	
Limite de liquidité, w_L (%)	37,0
Limite de plasticité, w_P (%)	18,7
Indice de plasticité, I_P	18,3
Masse volumique des particules solides, ρ_S (Mg.m ⁻³)	2,69
Teneur en argiles, $< 2\text{ }\mu\text{m}$ (%)	29,4
Propriétés physico-chimiques	
pH du sol	8,0
Capacité d'échange cationique, CEC (meq/100g)	15,1
Teneur en carbonates, (%)	1,30

Tableau 11. Caractéristiques physico-chimiques du limon de Jossigny.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Perte au feu	Teneur en carbone organique
76,2	9,90	4,10	0,75	0,71	0,81	1,86	0,86	0,12	3,33	0,22

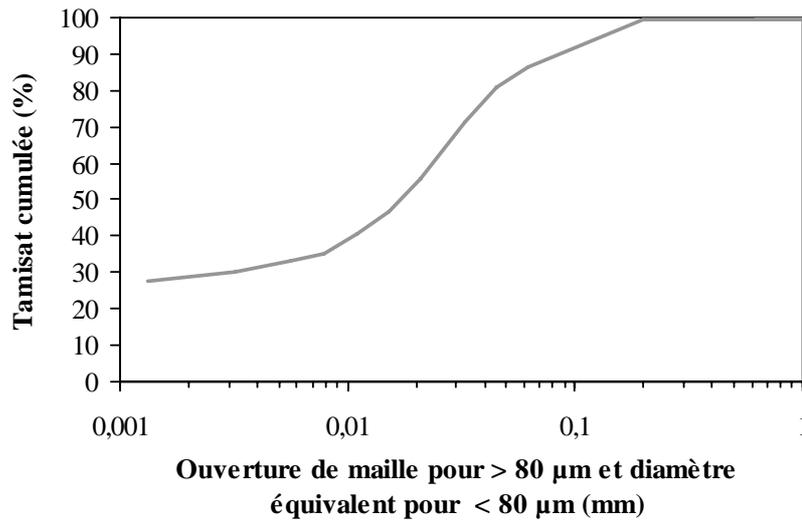


Figure 24. Courbe granulométrique du limon de Jossigny.

II.1.3. Préparation, compactage et caractéristiques des éprouvettes de sol non traité et traité

Deux dosages en chaux différents ont été retenus afin d'évaluer son influence, d'une part sur l'efficacité du traitement à court terme, et d'autre part sur la durabilité des ouvrages. Le premier dosage choisi est de 1 %. Celui-ci a été déterminé à partir de l'essai pH d'Eades et Grim (1966) et correspond au point de fixation de la chaux (PFC) du limon de Jossigny. Les résultats de l'essai pH sont donnés sur la figure 25. Le second dosage a été choisi plus fort de façon à évaluer l'intérêt potentiel d'un fort dosage sur la durabilité du traitement : celui-ci est égal à 3 % chaux. Cette valeur sélectionnée représente un dosage maximal qu'il est envisageable d'utiliser sur un chantier d'un point de vue économique.

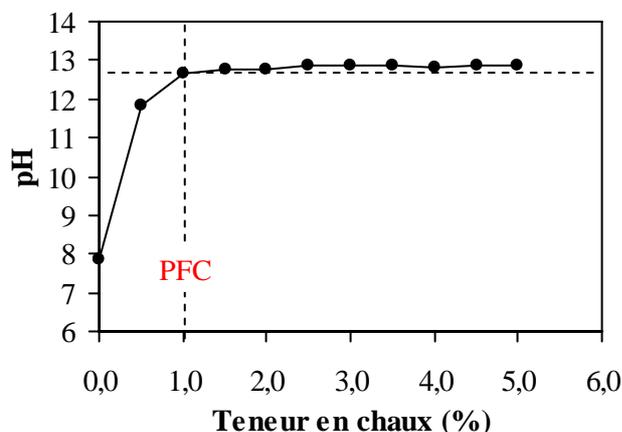


Figure 25. Détermination du point de fixation de la chaux du limon de Jossigny.

La même procédure de préparation et de compactage a été utilisée pour chacune des éprouvettes de sol considérées dans ce travail de manière à limiter la dispersion entre les caractéristiques initiales des éprouvettes fabriquées. Cette procédure a été adaptée de la norme NF P94-093 et est donnée ci-après:

1. Mélange du limon de Jossigny avec de l'eau déminéralisée afin d'atteindre la teneur en eau de compactage fixée. Dans le cas des sols traités à 1 % et 3 % de chaux, cette teneur en eau de compactage a été majorée respectivement de 1,25 et 3,25 points afin de pallier aux pertes d'eau liées à l'hydratation de la chaux. Les teneurs en eau visées étaient ainsi de 16 % pour le sol non traité, de 22,25 % pour le sol traité à 1 % de chaux et de 26,25 % pour le sol traité à 3 % de chaux.
2. Conservation du mélange pendant 48 h dans un sac plastique placé dans une salle climatisée ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) de manière à homogénéiser la teneur en eau au sein du matériau.
3. Dans le cas des éprouvettes traitées à la chaux, mélange manuel de la chaux et du sol humide, puis mise au repos du mélange obtenu pendant 1 heure.
4. Compactage des éprouvettes de sol.

Un compactage dynamique a été choisi de façon à s'approcher des conditions de compactage généralement employées dans la pratique sur chantier. Pour limiter les quantités de matériaux à utiliser, les éprouvettes ont été compactées directement dans des moules de 50 mm de diamètre et de 100 mm de hauteur à l'aide d'une mini dame Proctor¹ (fig. 26). Cette procédure de compactage est similaire à celle employée par Ferber *et al.* (2008). Il peut être noté que le compactage a été réalisé en 10 couches de façon à s'assurer d'une bonne homogénéité de la densité au sein des éprouvettes.

Différents états de compactage (teneur en eau et énergie de compactage) ont été considérés dans ce travail. L'objectif est d'évaluer l'influence de ces conditions pouvant être contrôlées sur chantier sur la perméabilité des sols mais aussi sur l'efficacité du traitement à court terme et sa durabilité à long terme.

Le premier état de compactage retenu dans ce travail coïncide au compactage usuellement recherché sur chantier, c'est-à-dire, le compactage à l'optimum Proctor du matériau. Cet état de compactage correspond à un compactage à la teneur en eau permettant d'atteindre la densité la plus forte, l'énergie appliquée au sol compacté étant d'environ

¹ La procédure habituelle dans le domaine des terrassements veut que les éprouvettes de sols utilisées pour les essais géotechniques en laboratoire soient troussées à partir d'un moule Proctor : ainsi environ 5000 g de matériau sont nécessaires à la fabrication de 3 éprouvettes. Avec la procédure utilisée dans cette étude 1200 g de sol suffisent à la fabrication de 3 éprouvettes.

593 kN.m.dm⁻³ (énergie Proctor normale, NE). La figure 27 donne les courbes de compactage à énergie Proctor normal obtenues pour le limon de Jossigny non traité et traité à 1 % et 3 % de chaux.

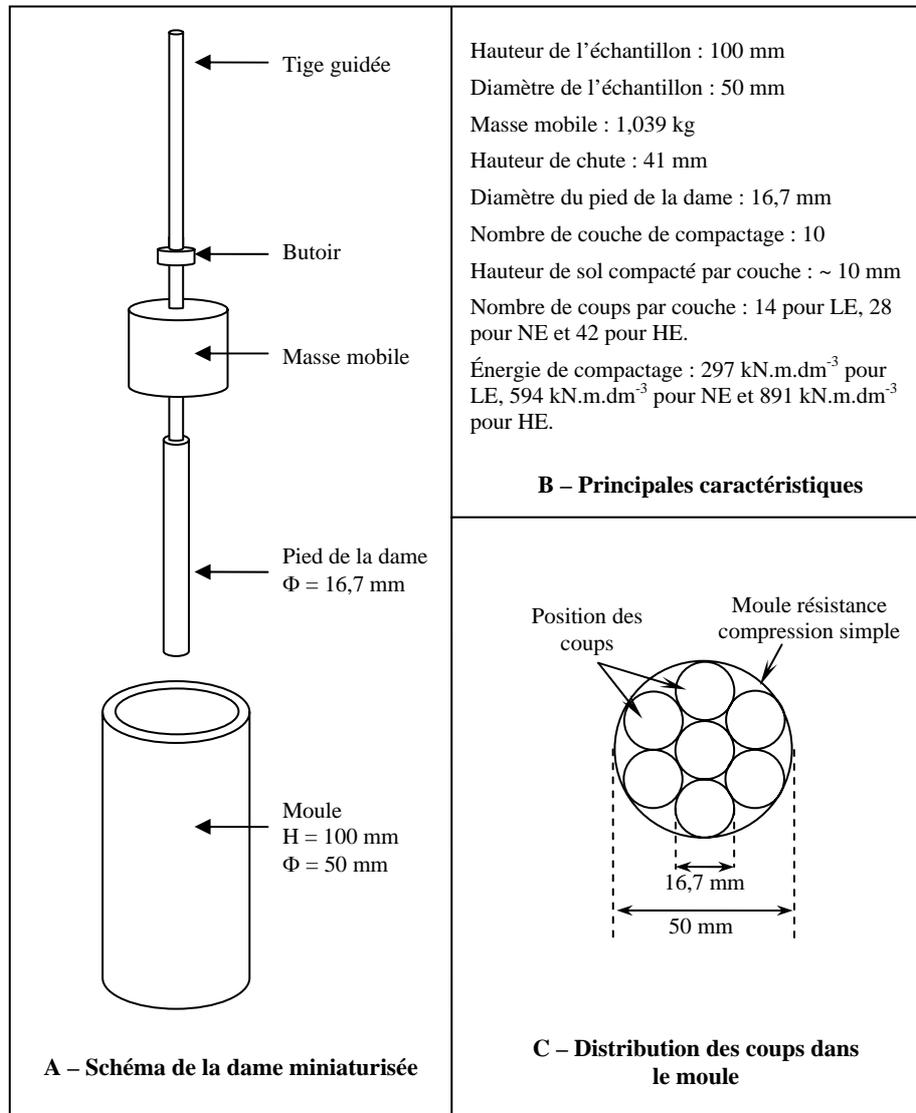


Figure 26. Caractéristiques de la dame de compactage miniaturisée (d'après Ferber, 2005).

Deux teneurs en eau en plus de celle correspondant à la teneur en eau optimale Proctor de chaque matériau (OMC) ont été considérées. Celles-ci ont été choisies $3 \pm 0,5 \%$ plus fortes (côté humide, notée WMC) ou plus faibles (côté sec, notée DMC) que la teneur en eau optimale (OMC) de chaque matériau. Ces différentes teneurs en eau permettent de décrire les différents états hydriques pouvant être rencontrés dans la pratique pour ces sols.

Par ailleurs, en plus de l'énergie Proctor normale (NE), une énergie plus faible de 50 % (LE) ainsi qu'une énergie plus forte de 50 % (HE) ont aussi été considérées dans ce

travail. Ces différentes énergies de compactage ont été choisies afin d'évaluer l'effet d'un défaut de compactage qu'on pourrait rencontrer dans la pratique, c'est-à-dire d'un sous-compactage, et au contraire, d'un sur-compactage sur la perméabilité des sols, mais aussi sur l'efficacité du traitement à court terme et long terme.

Dans le cas du limon de Jossigny non traité, seul le compactage à l'optimum Proctor (OMC-NE) a été considéré.

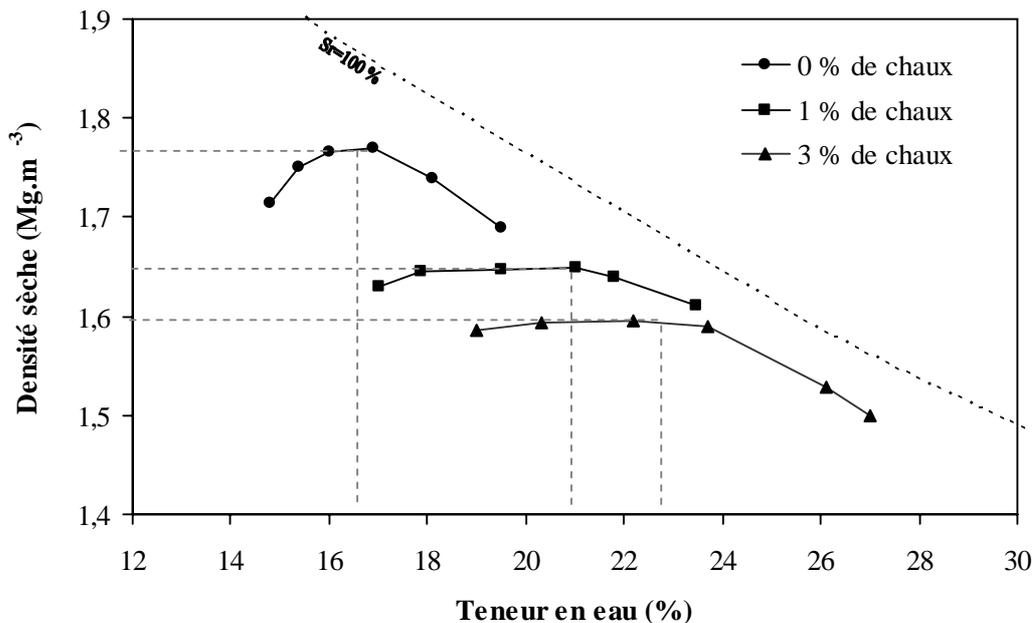


Figure 27. Courbes de compactage du limon de Jossigny naturel et traité à 1 % et 3 % de chaux pour une énergie Proctor normale.

Après compactage, les éprouvettes de sols ont été soumises à une période de cure variant de 0 à 25 jours. Ces périodes de cure ont été maintenues à de périodes courtes, l'objectif du traitement étant de permettre une amélioration significative des sols à court terme. Les cures ont été réalisées à température constante de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ et à l'abri de l'air ambiant (paraffinage des éprouvettes). Ces conditions de cure permettent ainsi de maintenir la teneur en eau des éprouvettes constante, mais aussi de limiter les contacts à l'air, ce qui évite la carbonatation de la chaux au sein des éprouvettes.

Le tableau 12 permet de récapituler l'ensemble des conditions initiales considérées dans cette étude ainsi que les caractéristiques moyennes et écart type de compactage des éprouvettes produites. Il permet par ailleurs de préciser les chapitres dans lesquels les différents états de compactage seront considérés.

Tableau 12. Tableau de bord des caractéristiques des éprouvettes produites.

Dosage en chaux (%)	Temps de cure (jours)	Conditions de compactage								
		DMC-LE	DMC-NE	DMC-HE	OMC-LE	OMC-NE	OMC-HE	WMC-LE	WMC-NE	WMC-HE
0	-	-	-	-	-	$\rho_d=1,760 \pm 0,002$ $w=15,6 \pm 0,5$ III, IV et V	-	-	-	-
	0	-	-	-	-	$\rho_d=1,663 \pm 0,006$ $w=21,0 \pm 0,2$ III, IV et V	-	-	-	-
	1	-	-	-	-	$\rho_d=1,643 \pm 0,004$ $w=21,7 \pm 0,1$ III	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	$\rho_d=1,646 \pm 0,005$ $w=21,4 \pm 0,2$ III, IV	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	$\rho_d=1,642 \pm 0,002$ $w=21,2 \pm 0,1$ IV	-	-	-	-
1	25	$\rho_d=1,518 \pm 0,025$ $w=16,8 \pm 0,2$ IV	$\rho_d=1,646 \pm 0,020$ $w=17,9 \pm 0,2$ IV	$\rho_d=1,712 \pm 0,015$ $w=17,8 \pm 0,2$ IV	$\rho_d=1,569 \pm 0,014$ $w=21,0 \pm 0,4$ IV et V	$\rho_d=1,642 \pm 0,012$ $w=21,2 \pm 0,5$ III, IV et V	$\rho_d=1,674 \pm 0,010$ $w=20,5 \pm 0,3$ IV	$\rho_d=1,598 \pm 0,019$ $w=23,0 \pm 0,2$ IV	$\rho_d=1,612 \pm 0,005$ $w=23,3 \pm 0,2$ IV et V	$\rho_d=1,611 \pm 0,002$ $w=22,7 \pm 0,1$ IV
	0	-	-	-	-	$\rho_d=1,602 \pm 0,003$ $w=23,1 \pm 0,2$ III, IV et V	-	-	-	-
	1	-	-	-	-	$\rho_d=1,591 \pm 0,005$ $w=23,4 \pm 0,5$ III	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	$\rho_d=1,584 \pm 0,006$ $w=23,5 \pm 0,3$ III, IV	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	$\rho_d=1,596 \pm 0,002$ $w=23,2 \pm 0,1$ IV	-	-	-	-
3	25	$\rho_d=1,500 \pm 0,020$ $w=19,8 \pm 0,1$ IV	$\rho_d=1,594 \pm 0,018$ $w=20,3 \pm 0,2$ IV	$\rho_d=1,670 \pm 0,012$ $w=19,9 \pm 0,5$ IV	$\rho_d=1,524 \pm 0,004$ $w=23,0 \pm 0,3$ IV et V	$\rho_d=1,590 \pm 0,007$ $w=23,2 \pm 0,5$ III, IV et V	$\rho_d=1,607 \pm 0,005$ $w=23,0 \pm 0,2$ IV	$\rho_d=1,536 \pm 0,013$ $w=25,6 \pm 0,5$ IV	$\rho_d=1,540 \pm 0,009$ $w=25,9 \pm 0,1$ IV et V	$\rho_d=1,542 \pm 0,003$ $w=25,5 \pm 0,1$ IV

* ρ_d = densité sèche après compactage ($Mg.m^{-3}$), w = teneur en eau de compactage (%), III, IV, et V correspondent aux numéros de chapitre. DMC = compactage du côté sec, OMC = teneur en eau optimale de compactage, WMC = compactage du côté humide, LE = sous-compactage, NE = compactage à énergie Proctor normale, HE = sur-compactage.

II.2. PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

II.2.2. Sollicitations étudiées

Les sols traités utilisés pour la construction d'ouvrages hydrauliques ou de remblais en zone inondable peuvent être soumis au cours de leur vie à deux principales sollicitations hydriques : des contacts à l'eau ou des circulations d'eau. Il a été choisi dans ce travail de simuler ces deux sollicitations afin d'évaluer leur impact sur la durabilité du traitement. Les méthodes utilisées pour simuler ces sollicitations sont décrites dans les paragraphes suivants.

II.2.2.1. Contact à l'eau

Le contact prolongé à l'eau auquel peuvent être soumis les remblais construits en zone inondable ou les ouvrages hydrauliques a été simulé en immergeant des éprouvettes de sol dans une solution d'eau déminéralisée pendant différentes périodes : 7, 28, 50 et 110 jours. Un rapport massique liquide sur solide (L/S) de 1 a été utilisé. La figure 28 illustre le dispositif mis en place.

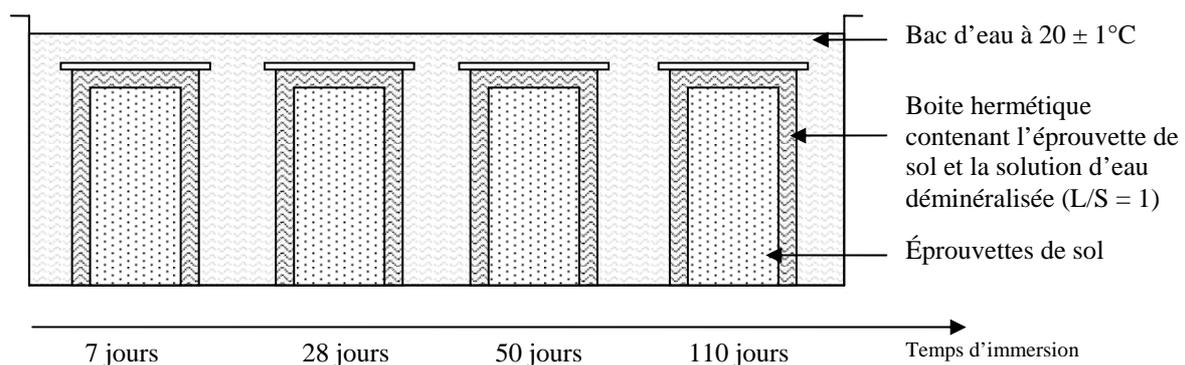


Figure 28. Schéma de principe des essais d'immersion.

Le tableau 13 donne les principales caractéristiques physico-chimiques de l'eau déminéralisée utilisée. Il peut être noté que les caractéristiques physico-chimiques de cette eau sont différentes des eaux auxquels les ouvrages peuvent être en contact dans la pratique. Toutefois,

l'utilisation d'une telle eau permet de s'assurer que tous les essais sont conduits avec une eau présentant des caractéristiques stables. Les résultats relatifs à cette sollicitation sont exposés dans le chapitre V, article 3.

Tableau 13. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau déminéralisée utilisée pour les essais d'immersion et de percolation.

	Eau déminéralisée bouteille du commerce juste après ouverture	Eau déminéralisée en sortie du système de percolation après 15 jours de fonctionnement continu
pH	6,9	7,5
Titre alcalimétrique (°f)	0,0	0,0
Titre alcalimétrique complet (°f)	0,2	0,5
Conductivité ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	1,6	1,8
Ca ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	< 0,1	< 0,1
Mg ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	< 0,5	< 0,5
K ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	< 0,1	< 0,1
Na ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	< 0,1	< 0,1
Si ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	< 0,4	< 0,2
Al ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	< 0,1	< 0,1
SO ₄ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	< 0,5	< 0,5
Cl ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	< 0,4	< 0,4
SO ₃ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	< 0,5	< 0,5

* concentrations en Ca, Mg, K, Na, Si et Al déterminées à l'ICP-AES, SO₄, concentrations en Cl et SO₃ déterminées par chromatographie ionique. Le signe < indique que les concentrations sont inférieures à la limite de détection.

II.2.2.2. Circulation d'eau

La circulation d'eau à laquelle peuvent être soumis les remblais construits en zone inondable ou ouvrages hydrauliques a été simulée à l'aide d'un dispositif de percolation basé sur des cellules similaires à des perméamètres à paroi flexible. Douze cellules de percolation ont été fabriquées pour cette étude. Celles-ci sont constituées de deux plaques d'aluminium de 100 mm de diamètre et d'un cylindre en plexiglas de 52 mm de diamètre et de 120 mm de hauteur. La circulation d'eau a été conduite à température constante ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) et de façon ascendante, ce qui facilite la saturation des éprouvettes. Le liquide perméant choisi est de l'eau déminéralisée (caractéristiques physico-chimiques identiques à l'eau déminéralisée utilisée pour les essais d'immersion, tab. 13). Les raisons de ce choix sont identiques à celles mentionnées dans le paragraphe précédent.

La charge hydraulique à laquelle les éprouvettes des sols sont soumises a été choisie à partir de deux critères :

1. La charge hydraulique utilisée devait être suffisamment faible pour s'assurer que le liquide perméant ait le temps d'interagir avec le sol. Selon Haji-Djafari & Wright (1983), cette condition est atteinte lorsque la quantité d'eau qui traverse le sol en 24 heures est inférieure au volume poral de l'éprouvette percolée.
2. La charge hydraulique devait être suffisamment forte pour que le volume d'eau récupéré en une semaine soit suffisant pour réaliser les différentes analyses physico-chimiques envisagées dans cette étude (soit environ 100 mL par semaine).

Des essais préliminaires ont été conduits afin de déterminer la charge hydraulique répondant à ces deux critères, à la fois pour les éprouvettes non traitées et traitées. Celle-ci a été trouvée égale à 80 kPa. Cette charge hydraulique correspond, pour le système mis en place, à un débit d'environ $0,06 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (déterminé à partir de la quantité d'eau écoulée en 1 minute à travers une cellule vide). Le gradient hydraulique correspondant est de 80. Une pression de confinement de 120 kPa a été appliquée tout au long des essais de percolation de façon à éviter la création de chemins préférentiels le long des éprouvettes de sol. Les lixiviats ont été récupérés en sortie des perméamètres dans des bouteilles de 1 L et conservés dans un réfrigérateur avant analyses physico-chimiques. Le dispositif mis en place permet de contrôler chaque cellule de percolation de façon indépendante : la circulation d'eau peut donc être interrompue pour une cellule de circulation sans que les autres cellules soient affectées.

La figure 29 présente une vue du dispositif. La figure 30 donne un schéma de principe d'une cellule de percolation et du dispositif mis en place. Les résultats relatifs à cette sollicitation sont exposés dans les chapitres III, IV et V (articles 1, 2 et 3).



Figure 29. Vue du dispositif de circulation d'eau.

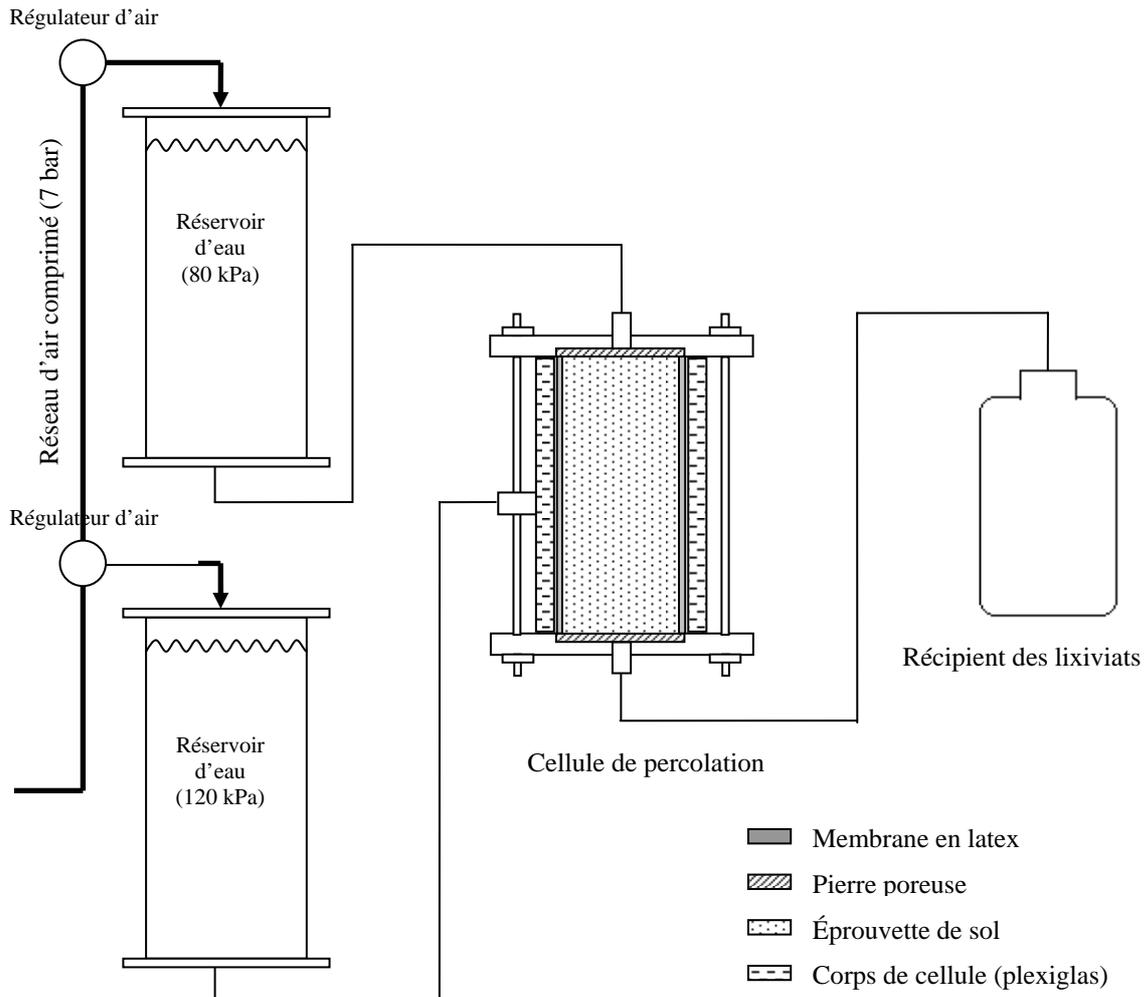


Figure 30. Schéma de principe d'une cellule de percolation et du dispositif mis en place.

Finalement, il peut être noté que les conditions de circulation retenues dans ce travail sont vraisemblablement plus sévères que celles auxquelles les ouvrages hydrauliques ou remblais en zone inondable peuvent être soumis au cours de leur vie. Toutefois, ces conditions permettent d'accélérer les phénomènes de dégradation pouvant se produire à long terme dans ces ouvrages. On a voulu, à titre indicatif, comparer les conditions de percolation utilisées dans cette étude aux conditions climatiques auxquelles peuvent être soumis les ouvrages. Pour ce faire, il a été considéré dans une première approche que 1/3 de l'eau de pluie annuelle s'infiltrait dans le sol, soit environ 300 L.m^{-2} en France. Il a ensuite été déduit de cette donnée que 200 jours de percolation étaient, sous les conditions utilisées dans cette étude, équivalents à une infiltration d'eau de pluie continue de 11,5 ans.

II.2.3. Suivi du comportement physico-chimique, microstructural et géotechnique

Ce paragraphe présente les différents essais et analyses effectués au cours de ce travail pour suivre le comportement physico-chimique, microstructural et géotechnique du limon de Jossigny non traité et traité, avant, pendant et après exposition aux différentes sollicitations décrites dans le paragraphe précédent.

II.2.3.1. Analyses physico-chimiques

L'analogie établie dans la synthèse bibliographique entre les sols traités à la chaux et les ciments a permis de montrer que le comportement physico-chimique des sols traités à la chaux soumis à une circulation d'eau pouvait être appréhendé à partir du suivi de certains paramètres physico-chimiques des lixiviats : pH, concentrations en calcium, concentrations en silicium ou aluminium.

Ces différents paramètres ont donc été mesurés dans les lixiviats et solution d'immersion, après différents temps de percolation et/ou d'immersion, pour différentes éprouvettes de limon de Jossigny. La spectrométrie d'absorption à la flamme (FAA) a été utilisée pour déterminer les concentrations en calcium et aluminium des lixiviats. La technique d'analyse utilisée pour déterminer les concentrations en silicium est la spectrométrie d'émission atomique à source plasma (ICP-AES). Ces analyses ont été conduites par la Division Eau et Environnement du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes.

Ces analyses n'ont été réalisées que sur une partie des lixiviats récoltés. En effet, un volume de 100 mL a été prélevé de chaque lixiviat à analyser. Sur ce volume, un prélèvement de 10 mL a été effectué à l'aide d'une seringue de filtration à 0,45 μm . Cette étape de filtration s'est avérée nécessaire pour les mesures de silicium, compte tenu de la présence fréquente de précipités de carbonate de calcium, qui aurait pu boucher les tubulures de l'appareil d'analyse ICP-AES. L'autre partie du prélèvement a été acidifiée avec une solution d'acide nitrique à 0,5 % de façon à abaisser le pH du lixiviat, et donc, éviter le plaquage des sels en solution sur le bord du flacon de prélèvement. Le pH des lixiviats a été mesuré, sur le

prélèvement de 100 mL, à partir d'un pH-mètre standard avant ces deux opérations. Le tableau 14 rappelle les limites de détection de chacun des éléments analysés.

Tableau 14. Limites de détection des concentrations en silicium, aluminium et calcium.

	[Si]	[Al]	[Ca]
Limites de détection	< 0,2 mg.L ⁻¹	< 0,1 mg.L ⁻¹	< 0,1 mg.L ⁻¹

En plus du suivi des caractéristiques physico-chimiques des lixiviats, il a aussi été choisi d'évaluer l'évolution du comportement physico-chimique du sol avant, pendant et après exposition aux différentes sollicitations. Pour ce faire, le pH du sol ainsi que la distribution du calcium dans les éprouvettes de sol ont été déterminés après différents temps de cure et de sollicitation.

Le pH du sol a été mesuré avec un pH-mètre à partir d'une dilution du sol au cinquième dans de l'eau déminéralisée (c'est-à-dire 20 g de sol sec pour 100 mL d'eau).

Différentes hypothèses ont été posées pour déterminer l'évolution de la distribution en calcium dans le sol au cours du temps. Il a été supposé que le calcium pouvait se trouver dans le sol sous quatre formes différentes (fig. 31) :

1. Carbonates de calcium : l'évolution de cette phase a été déterminée en mesurant la teneur en carbonates du sol au cours du temps à partir d'essais de calcimétrie. Ces derniers consistent à mesurer le volume de CO₂ dégagé par réaction entre une poudre de sol sec et de l'acide chlorhydrique (norme NF P94-048).
2. Chaux libre, c'est-à-dire CaO + Ca(OH)₂ : la méthode utilisée pour évaluer l'évolution de cette phase repose sur l'essai Leduc. Cet essai consiste à solubiliser la chaux libre contenue dans un sol traité dans une solution d'eau sucrée de façon à former du sucrate de calcium. Ce dernier est alors dosé avec un acide fort à l'aide d'un indicateur coloré. L'acide utilisé dans ce travail est de l'acide chlorhydrique à 0,1 N et l'indicateur est une solution contenant 1/3 de vert de bromocrésol et 2/3 de phénophtaléine. Des essais préliminaires ont été réalisés sur la chaux vive fournie par Lhoist afin d'évaluer l'erreur commise avec cet essai. Les résultats obtenus avec cette méthode d'essai ont montré, par comparaison avec les caractéristiques fournies par Lhoist, que l'erreur commise était inférieure à 4,5 %. Celle-ci a donc été considérée comme faible.
3. Calcium contenu dans l'eau interstitielle du sol : deux cas distincts ont été distingués pour l'évaluation de ce paramètre, c'est-à-dire avant sollicitation (période de cure) et

au cours des sollicitations. Ainsi, cette phase a été déterminée au cours de la période de cure en mesurant la concentration en calcium après immersion pendant 24 heures d'une éprouvette de sol dans une solution d'eau déminéralisée (rapport L/S de 10). Au cours des sollicitations, les concentrations en calcium des lixiviats ou de la solution d'immersion ont été considérées comme représentatives des concentrations en calcium de cette phase.

4. Composés secondaires ou composés cimentaires : l'évolution de cette phase n'a pas été mesurée mais déduite. En effet, il a été supposé, qu'à un temps donné t , la part de calcium contenue dans cette phase était équivalente à la différence entre la part de calcium initialement présente dans le sol (c'est-à-dire sous teneur en carbonate initiale plus quantité de chaux ajoutée) et la part de calcium mesurée à l'instant t sous la forme des trois phases citées ci-dessus (carbonates, chaux libre et calcium de l'eau interstitielle). Dans le cas des sollicitations, la part de calcium lixiviée ou contenue dans la solution d'immersion a été retirée à la quantité de calcium initialement présente dans le sol.

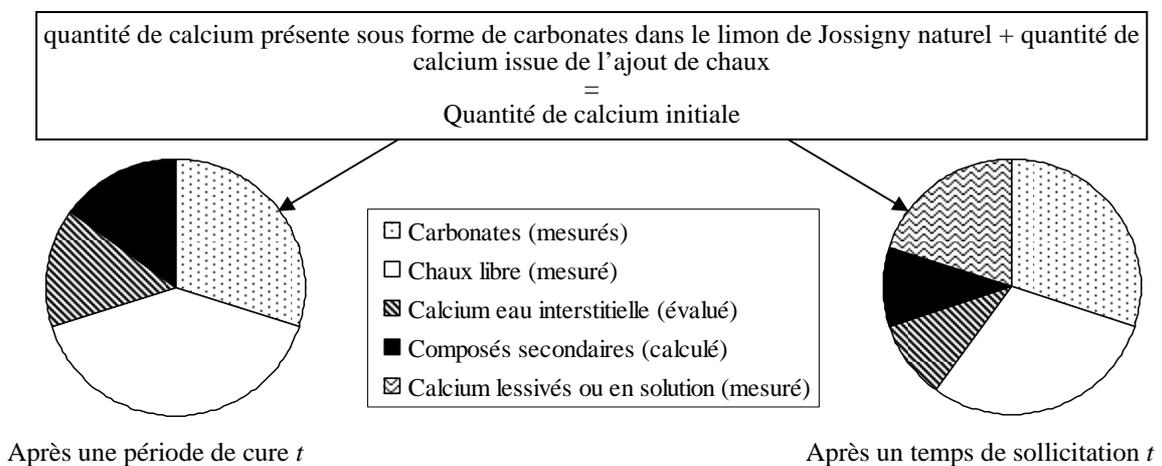


Figure 31. Distribution du calcium dans les éprouvettes de sol.

Le tableau 15 précise les conditions initiales des éprouvettes pour lesquelles ces analyses ont été conduites. Les résultats relatifs à ces différentes analyses sont présentés dans les chapitres III, IV et V à travers les articles 1, 2 et 3.

Tableau 15. Tableau de bords des éprouvettes soumises aux analyses physico-chimiques.

Conditions initiales des éprouvettes	Temps de cure (jours)	Sollicitations			Analyses physico-chimiques du sol		Analyses physico-chimiques des lixiviats			
		Aucune	Immersion	Circulation	pH	Distribution du calcium	pH	[Ca]	[Si]	[Al]
0%-OMC-NE	-	×		×	×	×	×	×	×	×
1%-OMC-LE	25			×		×	×	×	×	×
1%-OMC-NE	0	×			×					
	1	×			×					
	7	×			×					
	25	×	×	×	×	×	×	×	×	×
1%-WMC-NE	25			×		×	×	×	×	×
3%-OMC-LE	25			×		×	×	×	×	×
3%-OMC-NE	0	×			×					
	1	×			×					
	7	×			×					
	25	×	×	×	×	×	×	×	×	×
3%-WMC-NE	25			×		×	×	×	×	×

II.2.3.2. Essais de caractérisation de la microstructure

L'évolution de la microstructure du limon de Jossigny traité à la chaux a été suivie à partir de deux types d'essais : porosimétrie par intrusion de mercure et observation au microscope électronique à balayage.

La microscopie électronique à balayage (MEB) consiste à balayer sous vide la surface d'un fragment de sol sec métallisé (environ 1 g) avec un faisceau d'électrons. L'exploitation des électrons secondaires et rétrodiffusés permet de reconstituer une image de la surface de l'échantillon : les électrons secondaires déviés par le détecteur de l'appareil permettent de récupérer des informations sur les reliefs de l'échantillon observé ; les électrons rétrodiffusés fournissent, quant à eux, le contraste de l'image (Le Roux, 1971 ; Le Gressus, 1995). La métallisation de l'échantillon a pour but de rendre l'échantillon conducteur et donc d'améliorer le contraste de l'image.

Les observations au MEB ont été réalisées au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes sur un MEB Hitachi S 570. La tension et la distance de travail étaient respectivement de 15 kV et 11 mm. Les échantillons ont été métallisés à l'or.

La porosimétrie par intrusion de mercure est une technique qui permet, contrairement à la microscopie électronique à balayage (description de la surface des échantillons

essentiellement), d'apporter des informations quantitatives sur la microstructure d'un fragment de sol compacté sec, par ex. la distribution de ses pores. En effet, selon l'équation de Washburn (7) le rayon d'entrée d'un pore (fig. 32) pouvant être rempli de mercure est inversement proportionnel à la pression d'injection du mercure. Ainsi, dans le cas des sols compactés, les essais de porosimétrie par intrusion de mercure consistent à forcer l'injection de mercure dans les pores du sol en augmentant au fur et à mesure la pression d'injection de façon à obtenir une description de son réseau poreux.

$$\text{équation de Washburn: } r = \frac{2 \sigma \cos \theta}{P} \quad (7)$$

où r est le rayon d'entrée du pore, σ la tension de surface mercure-air (0.48 N.m^{-1}), θ l'angle de raccordement mercure/sol (environ 140°), et P la pression d'injection du mercure (Pa).

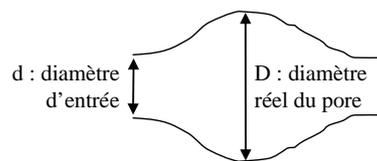


Figure 32. Illustration schématique de la différence entre diamètre d'entrée et diamètre réel des pores.

Les mesures de porosimétrie réalisées dans ce travail ont été effectuées à l'École des Mines de Nantes avec un porosimètre Micrometrics (Autopore IV 9500) muni d'un module basse pression (0,42 bars) et d'un module haute pression permettant d'atteindre 3000 bars. Ces pressions d'injection permettent de décrire les pores de rayons compris entre $0,003 \mu\text{m}$ et $250 \mu\text{m}$.

Enfin, il apparaît nécessaire de rappeler que la pression appliquée correspond à la pression d'entrée du mercure dans les pores. Or, il est probable comme l'indique la figure 33 que le diamètre d'entrée des pores soit différent du diamètre réel des pores. De plus, cette méthode ne permet pas de décrire l'ensemble de tous les rayons de pores (dans cette étude seulement les pores de rayon compris entre $0,003 \mu\text{m}$ et $250 \mu\text{m}$). Les résultats de cette technique peuvent donc conduire à une sous-estimation du volume de chaque classe de pore et donc du volume poral total.

Les essais de porosimétrie et les observations au MEB doivent être conduits, comme il a été mentionné dans les paragraphes précédents, sur des échantillons secs. La méthode de

séchage choisie dans ce travail est la lyophilisation puisqu'elle permet, par opposition à un séchage à l'étuve ou à l'air, de limiter les modifications de microstructure liées au retrait induit par le départ de l'eau (par ex. Delage & Pellerin, 1984). Ce procédé de séchage consiste à congeler dans un premier temps l'eau contenue dans l'échantillon de sol en le plongeant dans de l'azote liquide (température < - 200°C). L'échantillon est ensuite placé dans un lyophilisateur (pression de 5.10^{-2} bars et température du piège de - 90°C) pendant 24 heures afin de sublimer la glace formée. Finalement, l'échantillon est conditionné dans un flacon étanche avec un produit déshydratant (Actigel) pour éviter sa réhydratation avant les essais de porosimétrie ou les observations au MEB.

Le tableau 16 précise les conditions initiales des éprouvettes pour lesquelles ces essais ont été conduits. Les résultats relatifs à ces différents essais sont présentés dans le chapitre IV.

Tableau 16. Tableau de bords des éprouvettes soumises aux essais de caractérisation de la microstructure.

Conditions de compactage	Dosage en chaux (%)	Temps de cure (jours)	Sollicitations		Porosimétrie au mercure	Observations MEB
			Aucune	Circulation		
DMC-LE	1 et 3	25	×		×	
DMC-NE	1 et 3	25	×		×	
DMC-HE	1 et 3	25	×		×	
OMC-LE	1 et 3	25		×	×	
OMC-NE	0, 1 et 3	0	×		×	
	1 et 3	1	×		×	
	1 et 3	7	×		×	
	1 et 3	15	×		×	
	0, 1 et 3	25	×	×	×	×
OMC-HE	1 et 3	25	×		×	
WMC-LE-	1 et 3	25	×		×	
WMC-NE	1 et 3	25	×	×	×	
WMC-HE	1 et 3	25	×		×	

II.2.3.3. Essais géotechniques

Différents paramètres géotechniques ont été suivis au cours du temps de cure, temps d'immersion et temps de circulation, afin de caractériser l'effet du comportement géotechnique du limon de Jossigny traité à la chaux. Ceux-ci peuvent être séparés en deux groupes : le suivi des caractéristiques mécaniques et le suivi de la perméabilité.

Deux indicateurs mécaniques différents ont été utilisés pour caractériser l'évolution des performances mécaniques du limon de Jossigny traité au cours du temps. Le premier

correspond à la résistance à la compression simple (R_c) et le second aux paramètres de résistance au cisaillement : cohésion effective, c' , et angle de frottement interne, φ' .

Les essais de résistance à la compression simple ont été réalisés sur différentes éprouvettes de sol (dosages en chaux différents, temps de cure différents, conditions de compactage différentes, temps d'immersion et de percolation différents). Ces essais ont été conduits selon la norme en vigueur (XP CEN ISO/TS 17892-7). La vitesse de déplacement de la presse utilisée a été fixée à 1 mm.min^{-1} .

Les paramètres de résistance au cisaillement ont été déterminés à partir d'essais triaxiaux consolidés non drainés avec mesure de la pression interstitielle. Ces essais ont été réalisés au Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages (LAEGO) selon les normes en vigueur (NF P94-074, NF P94-070). Chaque essai a été réalisé en utilisant trois éprouvettes soumises aux mêmes sollicitations (cure, circulation, etc.). Pour réaliser l'essai, chacune de ces trois éprouvettes a d'abord été saturée et consolidée sous une contrainte effective donnée. Les contraintes effectives étaient de 140 kPa, 290 kPa, et 590 kPa. Cette étape a été réalisée en appliquant une contre pression de 210 kPa et en augmentant progressivement par palier la pression de confinement jusqu'à atteindre 350 kPa, 500 kPa et 800 kPa. Une fois les éprouvettes saturées et consolidées, les éprouvettes ont été chargées mécaniquement à une vitesse constante de $0,03 \text{ mm.min}^{-1}$. L'évolution du déviateur (qui correspond à la différence entre la contrainte axiale, σ_1 , et la contrainte radiale, σ_3 , appliquée à l'éprouvette) et de la surpression interstitielle a été tracée en fonction de la déformation axiale. Deux critères de ruptures différents, le maximum du déviateur $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ et le maximum du rapport des contraintes $(\sigma_1 / \sigma_3)_{\max}$, ont été utilisés, à partir du diagramme Mohr-Coulomb, pour déterminer les paramètres de cisaillement internes (cohésion effective c' et angle de frottement interne, φ'). Les résultats relatifs à ces essais mécaniques font l'objet du chapitre V (article 3).

L'évolution de la perméabilité des éprouvettes de sol traité ou non traité a été suivie tout au long de la sollicitation circulation d'eau. Ce paramètre a été calculé sur la base de la loi de Darcy à partir de la quantité d'eau écoulée pour un temps de percolation donné. Les résultats relatifs à l'évolution de ce paramètre sont présentés dans les chapitres IV et V (articles 2 et 3).

Le tableau 17 précise les conditions initiales des éprouvettes pour lesquelles ces essais géotechniques ont été conduits.

Tableau 17. Tableau de bords des éprouvettes soumises aux essais géotechniques.

Conditions initiales des éprouvettes	Temps de cure (jours)	Sollicitations			Performances mécaniques		Perméabilité
		Aucune	Immersion	Circulation	R _c	Paramètres de cisaillement (c' et φ')	
0%-OMC-NE	-	×		×	×	×	×
1%-OMC-LE	0	×			×		
	25	×	×	×	×		×
1%-OMC-NE	0	×			×		
	7	×			×		
	25	×	×	×	×	×	×
3%-OMC-NE	0	×			×		
	7	×			×		
	25	×	×	×	×	×	×
3%-WMC-NE	0	×			×		
	25	×		×	×		×

Chapitre III – Comportement physico-chimique du limon de Jossigny traité à la chaux et soumis à une circulation d'eau

III.1. PRÉSENTATION DE L'ARTICLE

De nombreuses questions persistent quant à l'utilisation des sols limoneux traités à la chaux pour la construction d'ouvrages hydrauliques ou de remblais en zone inondable. L'une d'entre elle concerne les effets des sollicitations hydriques auxquelles peuvent être exposés ces ouvrages une fois mis en service, et en particulier, des circulations d'eau sur la pérennité des améliorations mécaniques apportées par la chaux, mais aussi, sur le maintien de la perméabilité des sols dans le temps, la fonction première des ouvrages hydrauliques étant de retenir l'eau.

Le chapitre 1 a permis de mettre en évidence que l'origine des évolutions du comportement mécanique, hydraulique et microstructural des sols traités à la chaux au cours du temps est étroitement liée aux différents processus physico-chimiques pouvant intervenir dans les sols traités. Ainsi, la détermination du comportement physico-chimique des sols traités à la chaux au cours du temps apparaît comme une étape préalable à la compréhension de l'évolution du comportement mécanique et hydraulique des sols traités à la chaux.

Dans ce contexte, le travail présenté dans ce chapitre sous forme d'article soumis à la revue « Applied Clay Science » (article 1) a pour but d'améliorer les connaissances du comportement physico-chimique d'un limon, le limon de Jossigny, avant (période de cure) et au cours d'une circulation d'eau à long terme.

La circulation d'eau a été simulée à partir d'un dispositif de percolation (décrit en détail dans le chapitre 2) basé sur des cellules similaires à des perméamètres à paroi flexible. Deux teneurs en chaux différentes, 1 % (PFC du limon de Jossigny) et 3 %, ont été considérées afin d'évaluer leur effet sur le comportement physico-chimique du sol au cours de la cure et lors de la circulation d'eau. Seul un compactage à l'optimum Proctor respectif de chacun des matériaux a été considéré dans ce chapitre.

Le comportement physico-chimique du sol traité a été évalué après différents temps de cure (0, 1, 7, et 25 jours) et temps de lessivage (de 110 à 320 jours) à partir des analyses physico-chimiques décrites dans le chapitre 2 (pH, concentrations en calcium, silicium, et aluminium, distribution du calcium dans le sol). Il est à noter que les caractéristiques physico-chimiques du limon de Jossigny non traité ont aussi été déterminées de façon à avoir un point de référence.

L'article est présenté dans la suite de ce paragraphe tel qu'il a été soumis au journal « Applied Clay Science ».

Leaching characteristics of a lime-treated silty soil: assessment of the long term behaviour

B. Le Runigo^a, D. Deneele^{1a}, Y.C. Cui^b, O. Cuisinier^a, V. Ferber^c

^aLaboratoire Centrale des Ponts et Chaussées de Nantes, Division RMS

^bEcole Nationale des Ponts et Chaussées, UR Navier – CERMES

^cEntreprise Charier, Service R&D, Montoir-de-Bretagne

Soumis à la Revue Applied Clay Sciences, Juin 2008

ABSTRACT

The durability of lime-treated soils structures such as earthdams, dikes or river levees is related to the stability or long term physico-chemical evolution of the soils constituent phases in their service environment. The present work aims at i) providing information on the long term physico-chemical behaviour of lime-treated soils subjected to water circulations, and at ii) assessing if water circulations could be detrimental to the durability of lime-treated soils. The main objectives of the study are to evaluate from a physico-chemical point of view the differences brought by an addition of 1 wt.% or 3 wt.% of lime after 25 days of curing, and the impacts of lime content on soils subjected to water circulation and so on the durability of lime-treated soils.

The results obtained indicate that an addition of lime at the soil lime modification optimum (LMO) is not sufficient to maintain at long term the durability of lime-treated soils. On the contrary, addition of high lime contents could be a mean to ensure the long term durability of lime-treated soils since it enables not only the stability of cementitious compounds, but also their formation at long term.

Key-words : lime-treated silt, physico-chemical analyses, long term durability, percolation, lime content, cementation

¹ Corresponding author ; dimitri.deneele@lcpc.fr ; tel : +33 2 40 84 58 02 ; fax: +33 2 40 84 59 97

1. Introduction

Lime stabilization is a widespread technique in the field of earthworks since it can improve both the workability and mechanical properties of wet clayey soils. The improvements brought by lime are attributed to two major stabilization mechanisms, that are immediate reactions of cation exchange and flocculation-agglomeration, and, long term pozzolanic strength development. The initial reaction occurs from an exchange between the Ca^{2+} brought by lime and existing cations on the clay mineral lattice resulting in the flocculation of clay mineral particles and subsequently in a decrease of the soil plasticity properties (Eades and Grim, 1966; Rogers and Glendinning, 1996). The second mechanism occurs as a result of pozzolanic reactions. The addition of lime induces a highly alkaline porewater chemistry promoting the dissolution of silica and alumina contained in the clay minerals, which combine with Ca^{2+} ions to form cementitious compounds such as calcium silicate hydrates (C-S-H) and calcium aluminate hydrates (C-A-H). According to their state of crystallization, the formation of these compounds leads to an increase in the soil strength (Bell, 1996; Brandl, 1981). In their literature review, Diamond and Kinter (1965) mentioned another mechanism also susceptible to take place, carbonation. This latter leads, through the reaction of lime with carbon dioxide, to the formation of calcium carbonates. Carbonation is generally seen as a negative mechanism since it is usually associated to a decrease of the strength that can be reached by lime-treated soils (Bagonza et al., 1987).

Several factors influence lime-soil pozzolanic reactions such as soil porewater pH, nature of clay minerals, silica-alumina concentrations and organic content. But, the development of mechanical performance of lime-treated soils requires above all an addition of a minimal amount of lime to initiate pozzolanic reactions. ASTM Standard Test method (ASTM D 6276-99a) and British Standard method (BS 1924) were developed to determine this threshold value. These standards are based on the Eades and Grim pH test (1966) with the main idea as: pH of the pore fluid must reach the value of a saturated solution of portlandite (pH=12.4) to initiate pozzolanic reactions. Both methods aim at determining the lime modification optimum (LMO) which is the percentage of quicklime required to produce a saturated solution of lime in contact with the soil, satisfying the ion exchange and entailing a pH high enough to sustain the lime-soil strength-producing pozzolanic reactions. However, as mentioned by Boardman et al. (2001), the pH of a saturated lime solution can never be reached for some soils, leading to question the notion of this lime threshold to initiate pozzolanic reactions. Besides, the work of Rogers and Glendinning (2000) also evidenced that

the correlation between the LMO and the development of the mechanical properties is also discussable.

Although these mechanisms are widely reported, many issues remain unresolved and notably the time scale over which the reactions take place, that is to say sequentially or concurrently (see Boardman et al., 2001). In addition, the long-term behaviour of lime-treated soils has not been well established and few studies have focused on this point. In a context of sustainable development, it appears important to assess the potential longevity of lime-treated soils. Even if recent studies were conducted on long-term properties of lime-solidified clays (McCallister and Petry, 1992; De Bel et al., 2005), no adequate chemical explanation of the long-term changes has been put forward. Besides, in Europe, the mechanical improvements brought by lime are not, in practice, taken into account for the design of earthworks projects due to the very few evidences on the durability of lime-treated soils.

The durability of earth structures characterizes their ability to maintain, under condition of use, the function for which they were designed, and thus a certain level of stability and reliability. Earth structures must resist to the loads that they undergo, but also to the environmental factors (such as water circulation, wetting-drying/freezing-thawing cycles or traffic) to which they may be subjected to. The ability of lime-treated soils to withstand leaching was notably the topic dealt with by McCallister and Petry (1992) and De Bel et al. (2005). McCallister and Petry (1992) evidenced that leachates calcium concentrations decreased linearly with percolation time: the higher the lime content the higher the leachates concentrations. These authors concluded that leaching do have a detrimental impact on the ability of lime-soil mixture to retain calcium and that the longevity of lime-treated soils could be estimated according to the linear decrease of both leachates pH and calcium concentrations. They also concluded that the more lime used, the higher the longevity of the soil would be. De Bel et al. (2005) further evidenced that the amount of leached calcium could be minimized by increasing curing time. The authors concluded from their study, that addition of small quantities of lime is sufficient to promote the development of pozzolanic reactions since it ensures enough calcium in the soil and high pH. Although, lime-treated soils are different from concrete, the same cementitious compounds are formed in concretes and lime treated-soils. The chemical attack of concrete by ionized water consists essentially in the leaching of calcium hydroxide and in the progressive decalcification of C-S-H (Revertegat et al., 1992). The microstructure of the degraded zone is not uniform with a gradient of calcium/silicon ratio (C/S) of C-S-H, the dissolution of calcium hydroxide being the essential

parameter governing both decrease in strength and increase in porosity (Carde and François, 1997). It can reasonably be expected that the same mechanisms occur in lime-treated soils.

In this context, the present paper aims at providing information on the long term physico-chemical behaviour of a lime-treated silt exposed to water circulations and at assessing whether water circulations could be or not detrimental to its durability. Two different aspects are considered. The first part of the paper focuses on the impacts of curing on the physico-chemical characteristics of a silty soil treated with two different lime contents. The second part of the paper compares and assesses from a physico-chemical point of view the leaching potential of the lime-treated soil after curing. This physico-chemical evolution concerns both the evolution of leachates chemistry and calcium speciation in the soil.

2. Materials and specimens preparation

2.1 Lime

The lime used is a quicklime produced by Lhoist. Table 1 provides its main chemical characteristics. Preliminary tests were performed on this lime in order to estimate the amount of free calcium oxide and portlandite ($\text{CaO} + \text{Ca}(\text{OH})_2$) from the Leduc method. These revealed a free lime content of 88.6 wt.%.

Table 1. Chemical characteristics of the lime.

CaO + Ca(OH) ₂ (mass %)	CaO (mass %)	MgO (mass %)	CO ₂ (mass %)	< 80 μm (%)
93.1	90.4	1.4	0.3	73.2

2.2 Soil

Seventy hundred kilos of soil were taken in the Paris basin, near the Jossigny village. Once sampled, the total mass of soil was first air dried at ambient temperature (20 ± 5 C) for three days, then grinded and sieved at 2 mm. Finally, the 2 mm fraction of soil obtained was homogenized. The main identification characteristics of the prepared soil are given in Table 2.

The mineralogical composition of the untreated soil was evaluated using X-ray diffraction. The results show that the soil clay fraction is mainly composed of illite and kaolinite, with a significant amount of interstratified illite and smectite minerals, the other minerals of the soil being quartz and feldspars. The bulk chemical composition of the silt, as well as its loss on ignition and organic carbon content, are presented in Table 3.

Table 2. Main geotechnical and physico-chemical properties of the Jossigny loam.

Geotechnical properties	
Liquid limit, w_L (%)	37.0
Plastic limit, w_P (%)	18.7
Plasticity index, I_P (%)	18.3
Soil density, ρ_s (Mg.m ⁻³)	2.69
Clay fraction, < 2 μm (%)	29.4
Physico-chemical properties	
Soil pH	8.0
Cation exchange capacity (meq/100g)	15.1
Carbonates content, (%)	1.30
Lime modification optimum, LMO (% of CaO)	1.0 %

Table 3. Chemical composition of the untreated soil (all values are in mass percentage).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Loss on ignition	Organic carbon
76.2	9.90	4.10	0.75	0.71	0.81	1.86	0.86	0.12	3.33	0.22

2.3 Specimen preparation

The lime modification optimum (LMO) of the soil was determined using the ASTM standard D6276 and was found equal to 1 wt.% of lime (Figure 1). Two different lime contents were used. The first one was chosen equal to the LMO of the soil: 1 wt.% of lime corresponding also to the usual amount of lime added in France for this type of soils. The second lime content was chosen higher (3 wt.%) so as to assess the effect of high lime contents on the long term physico-chemical behaviour of lime treated soil under water leaching.

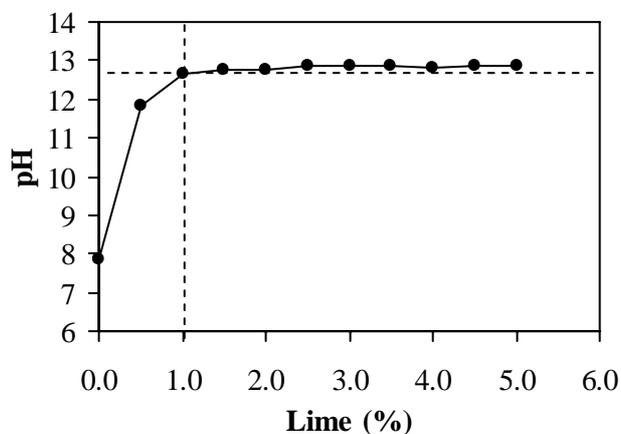


Figure 1. Determination of the lime modification optimum of the soil.

For the specimen preparation, the soil was first mixed with distilled water in order to reach the desired moisture content and was thereafter sealed in a plastic bag for 48 h for moisture content homogenisation. Then, the moist soil and the lime were thoroughly mixed and compacted one hour after the mixture made. A dynamic compaction of the specimens was adopted so as to be as close as possible to the compaction conditions used in practice. The specimens were directly compacted in cylindrical moulds of 100 mm height and 50 mm diameter using a mini Proctor compaction device (Ferber et al., 2008). The compaction was carried out in 10 layers to have a satisfactory homogeneity of the specimens. The compaction characteristics of the untreated and treated specimens were determined from the standard Proctor compaction curves. These are given in Table 4. After compaction, the specimens were sealed using both cellophane film and wax. They were then left in cure at ambient laboratory temperature ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) for periods up to 25 days.

Table 4. Compaction characteristics of the specimens according to their lime contents.

Lime content	Dry density (Mg.m^{-3})	Water content (mass %)
0 wt.% of lime	1.76	16
1 wt.% of lime	1.64	21
3 wt.% of lime	1.59	23

3. Experimental Procedure

3.1 Percolation

Water circulations were carried out using a percolation system similar to that used by McCallsiter and Petry (1992). The percolation cell is constituted of two aluminium plates of 100 mm diameter and a plexiglas cylinder of 52 mm diameter and 120 mm height. In total twelve cells were designed. Specimens were leached for time periods varying from 110 days to 320 days. The percolation was conducted at $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ *per ascensum* so as to facilitate the saturation of the soil specimens. Distilled water was chosen as leaching fluid. The hydraulic head under which the specimens were leached was selected according to two criteria. On one hand, the hydraulic head must be sufficiently low to ensure that the leaching fluid can interact with the soil. According to Haji-Djafari and Wright (1983), this condition is reached when the amount of collected leachates in 24 hours remains below the pore volume of the specimen. On the other hand, the hydraulic head must be sufficiently high in order to collect enough

leachates to weekly carry out physico-chemical analyses. The hydraulic head fulfilling these two criteria for all specimens considered in this study was found equal to 80 kPa: the corresponding flow rate is about $0.06 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. The cell pressure applied was 120 kPa. The leachates were collected as water passed through the specimens into one liter plastic bottles. Furthermore, each cylinder cell was independently controlled so that cells could be connected or disconnected from the main control panel without affecting other leach tests. Figure 2 provides a schematic diagram of the percolation equipment.

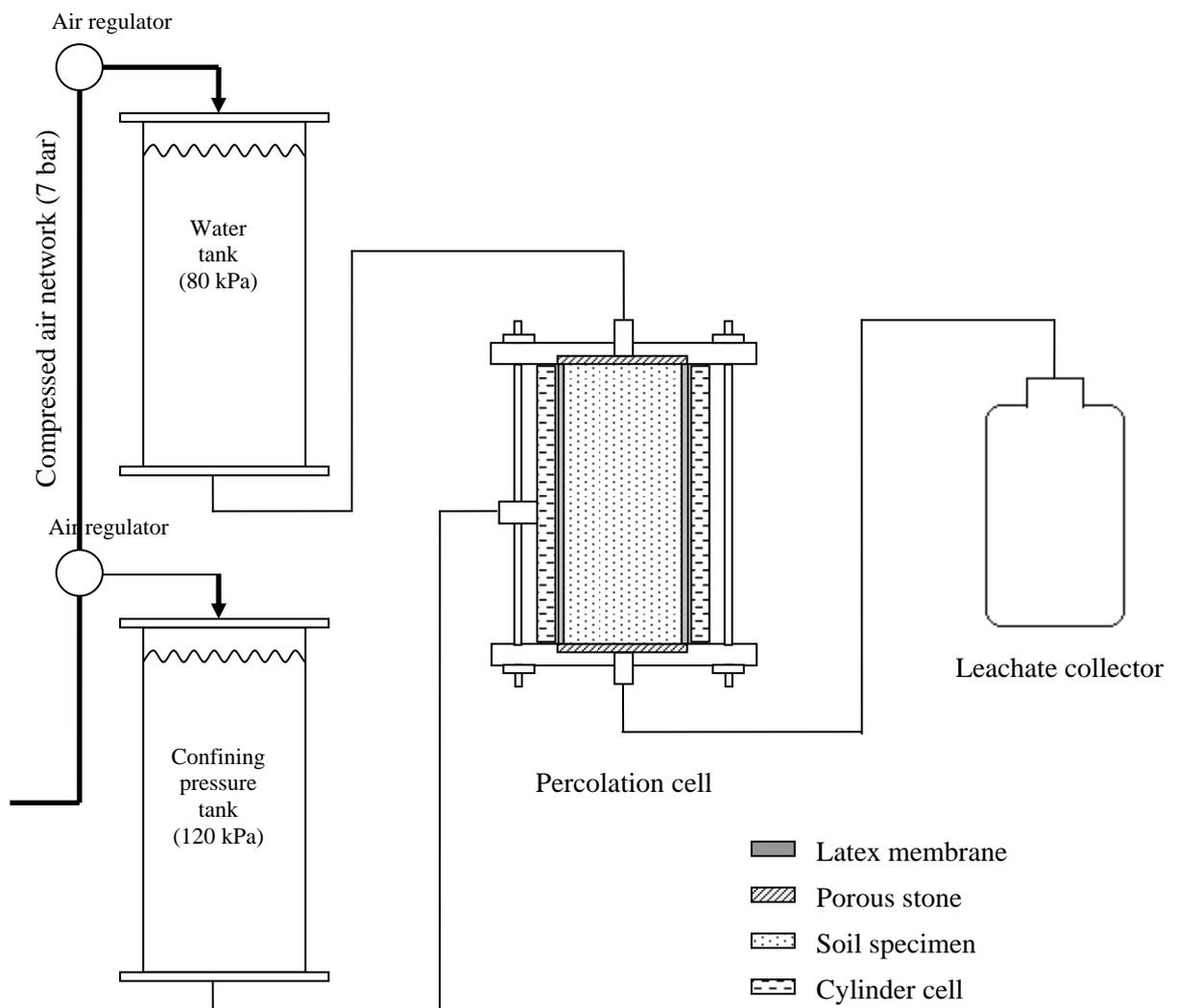


Figure 2. Schematic diagram of the percolation equipment.

The percolation conditions more severe than those observed in practice were chosen so as to simulate the long term degradation that could occur. In fact, the mean annual water infiltration into the soils in France can be evaluated to 300 L.m^{-2} . According to the percolation procedure used in this study once steady state reached the water infiltration is estimated at 6300 L.m^{-2} per year for the treated Jossigny silt, i.e. 200 days of percolation in this study corresponds to a rainfall period of 11.5 years in France.

3.2 Physico-chemical analyses

Physico-chemical analyses were conducted both on the soil specimens and collected leachates. The analyses were carried out before, throughout and after percolation. Control test were also performed on untreated soils and their leachates.

The chemical analyses conducted on the leachates include measurement of pH and elementary element concentrations such as calcium, silicon and aluminium. Prior to storage, 10 mL of the collected leachates was sampled using a $0.45 \mu\text{m}$ filtrate syringe in order to analyze silicon. The other part of the collected leachates was acidified by adding 0.5 % by volume of concentrated nitric acid to lower the pH. Leachates pH measurements were carried out before these two operations and were made using a standard pH-meter. The calcium and aluminium concentrations were determined using flame atomic absorption spectrometry (FAA). The silicon concentrations were determined using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). The lower limit of detection was for each element analysed of 0.1 mg/L. The analyses performed on the soil specimens are: measure of soil pH, analyses of carbonates contents and available lime contents. Soil pH was measured using a pH-meter and a 1:5 dilution of soil/distilled water. Carbonates contents were determined using the "Dietrich-Frühling" calcimeter method which is based on the measurement of CO_2 volume developed by acid reacting with the powdered soil. The method used to determine the available lime contents of the soil (i.e. lime in the form of portlandite, Ca(OH)_2 plus calcium oxide, CaO) is based on the Leduc method. It consists in solubilizing lime by reaction with sugar to form calcium sucrate which is then titrated using a standard acid and a solution of 1/3 bromocresol green and 2/3 phenolphthalein as indicator. The acid solution used in this study was a 0.1 N hydrochloric acid solution.

4. Results

4.1 Specimens characteristics

Table 5 presents the main geotechnical characteristics of the compacted specimens used in this study. Specimens EP-0-1, EP-1-1 and EP-3-1 were cut in three isolated fractions and submitted to three curing time (i.e. 1, 6 and 25 days). Amounts of carbonates and lime, as well as soil pH, were determined for each sample. In the case of leached samples, three different specimens were compacted so as to ensure that the tendencies recorded were reproducible.

Water content, dry density and saturation index depend all on the lime content used and on the number of the specimen considered. For a given lime content, the water content and dry density variations remain small (standard deviation of 0.23 % for the water content and standard deviation of 0.01 Mg.m⁻³ for the dry density). The leaching experiment was stopped at different time steps, varying from 110 days of percolation for the untreated specimen to 320 days of percolation for the lime-treated specimens.

Table 5. Geotechnical characteristics of cured and leached specimens.

Specimen appellation*	Curing time (days)	Time of percolation (days)	Initial water content (mass %)	Dry density (Mg.m ⁻³)	Initial Saturation index (%)	Poral volume (mL)
EP-0-1	1, 7 and 25	-	16.1	1.76	84.1	68.0
EP-0-2	-	116	16.6	1.76	84.6	67.8
EP-1-1	1, 7 and 25	-	21.4	1.65	91.3	76.4
EP-1-2	25	152	21.3	1.62	86.1	78.7
EP-1-3	25	161	21.3	1.64	89.4	77.3
EP-1-4	25	196	21.7	1.64	91.1	77.3
EP-3-1	1, 7 and 25	-	22.8	1.60	89.9	80.2
EP-3-2	25	152	23.3	1.58	89.1	81.4
EP-3-3	25	190	23.8	1.59	89.6	81.5
EP-3-4	25	196	23.2	1.59	89.6	81.5

* the first figure stands for the lime content added to the specimen, the second one for the specimens number.

4.2 Curing time

For the untreated specimen, since the soil carbonate content measured (Figure 3) corresponds to the quantity of calcium initially present in the soil (Table 3, 0.71 wt.% CaO = 0.51 wt.% Ca), it has been concluded that the calcium content of the initial soil is only associated with calcium carbonates. The pH of the untreated specimens and their carbonate content remain constant during curing (Table 6 and Figure 3).

Table 6. Soil pH of specimens at the end of the mixing phase and during the curing period.

	0 wt.% of lime	1 wt. % of lime	3 wt. % of lime
Soil pH after the mixing of the soil with lime	-	12.5	12.7
Soil pH after 1 day of curing	7.9	12.3	12.7
Soil pH after 7 day of curing		11.6	12.6
Soil pH after 25 days of curing	8.1	10.9	12.3

The characteristics of the soil treated with 1 wt.% of lime are detailed in Table 6 and Figure 3. The addition of lime induces an increase of the specimen calcium content from 0.51 wt.% to 1.15 wt.%. Once lime added to the soil, an increase of the pH to 12.5 was observed. However, curing leads to a decrease of the soil pH since it diminishes to 10.9 after 25-day curing. This curing time also gave rise to a decrease of the lime content to 0.14 wt.%. This value represents a consumption of 78 % of the initial quantity of free lime added (Figure 3). In addition, it can be noted that this consumption mainly occurred within the first day of curing (59 % of the lime was consumed within the first day of curing, the values for 6 and 25-day curing being respectively of 68 % and 78 %). In the same time, the quantity of carbonates increased. Considering that all the neoformed carbonates are calcic, calcium under carbonated form represents 0.77 wt.% of the soil calcium content. This amount was reached within the first day of curing and remained stable during the rest of curing. No analysis was conducted to determine the chemical composition of the lime-treated soil porewater at the end of the 25-day curing. However, an analysis was performed to measure the calcium concentration of a solution after 24-hour immersion of a soil sample cured for 25 days and treated with 1 wt.% of lime (liquid to solid ratio of 10). This latter was found equal to 138 mg.L⁻¹. As a first approximation, this result was considered equivalent to the calcium concentration of the lime-treated silty soil porewater at the end of the curing period. Note also that this concentration is consistent with the data of McCallister (1990). Based on this assumption, the part of calcium in the soil porewater represents 0.04 wt.%.

Moreover, it was considered in the present work that the difference between the calcium content initially present in the lime-treated specimens (i.e. 1.15 wt.% Ca in the case of specimens treated with 1 wt.%) and the addition of the calcium content contained in carbonates, free lime and porewater solution corresponds to secondary compounds content. Based on this assumption, secondary compounds represents 0.19 wt.% of the initial amount of calcium after 25-day curing.

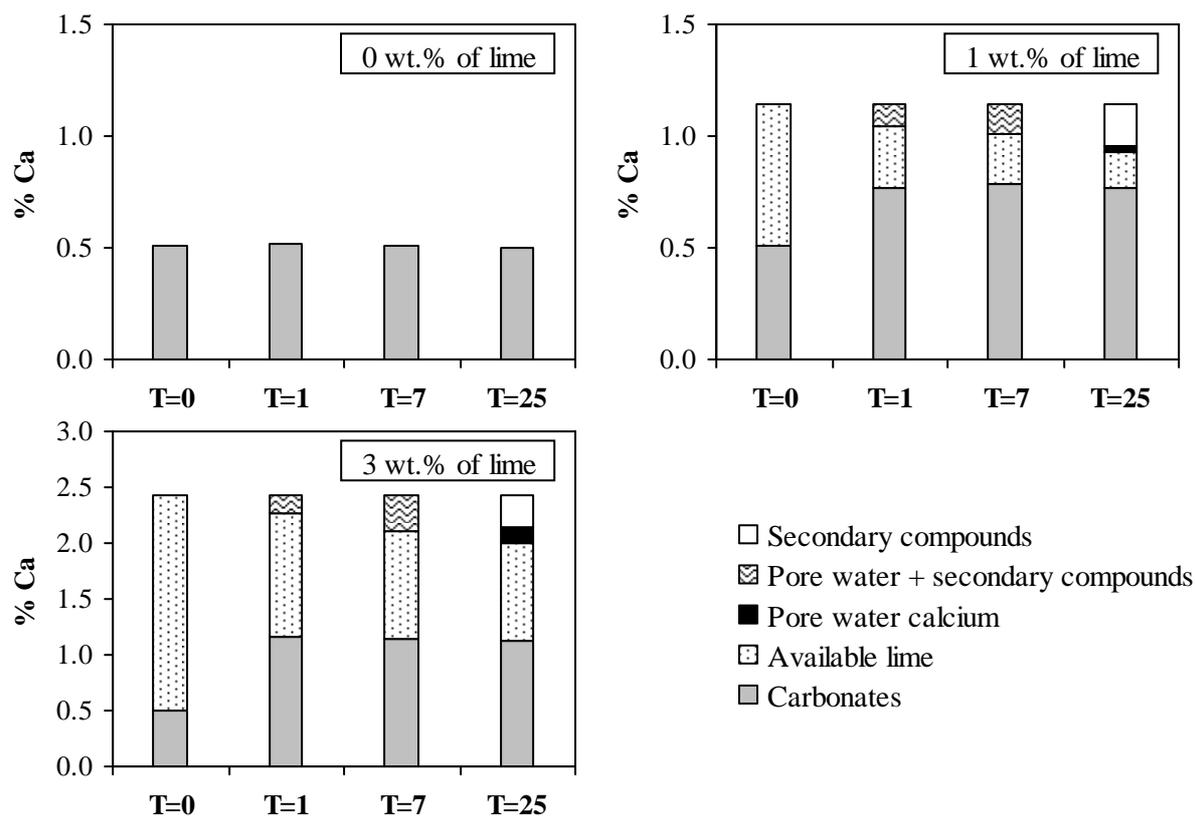


Figure 3. Speciation of calcium in the lime treated specimens according to the curing time and initial lime content (BT : before treatment, T=0 : lime treatment phase, T=1, 6, and 25 : after 1, 6 and 25 days of curing).

For the specimens treated at 3 % of lime, the addition of lime induced a pH of 12.7 after the mixing phase. As for the specimens treated with 1 wt% of lime, the pH decreased during curing but in a lesser manner as it remained to 12.3 after 25-day curing (Table 6). The lime content of the specimens treated with 3 wt.% of lime decreased with the curing time but this trend was less pronounced than for the specimens treated with 1 wt% of lime. In fact, lime consumption within the first 24 hours was high with 44 % of the initial quantity consumed, but was slowed down during the rest of curing: the total consumption of lime represents 58% of the initial content at the end of the curing period. At the same time, the part of calcium attributed to the carbonates increases from 0.51 wt.% to 1.15 wt.% within the first day of curing (which represents in terms of carbonates an increase from 1.3 % to 2.90 %). This amount remained stable for the rest of curing. As previously, it was considered, as a first approach, that the calcium concentration measured from a solution in which was immersed for 24 hours a specimen treated with 3 wt.% of lime and cured during 25 days was equivalent

to the calcium concentration of the lime-treated silty soil porewater at the end of the curing. This concentration was found to be equal to 500 mg.L^{-1} . Based on this assumption the part of calcium in the soil porewater represents 0.15 wt.% while the part of calcium attributed to secondary compound reaches 0.3 wt.% (Figure 3).

As a first conclusion, curing leads to a modification of the lime-treated soils. Large amounts of carbonates are precipitated and secondary compounds are formed leading to the consumption of part of the lime added to the soil.

4.3 Percolation time

The pH of the leachates obtained for the untreated specimen was close to 8.0 during percolation. Its leachates calcium concentrations decreased with the time of percolation and stabilized at 50.0 mg.L^{-1} after 110-day percolation. Both leachates silicon and aluminium concentrations remained constant during percolation at 2.0 mg.L^{-1} and 0.1 mg.L^{-1} respectively (Figure 4).

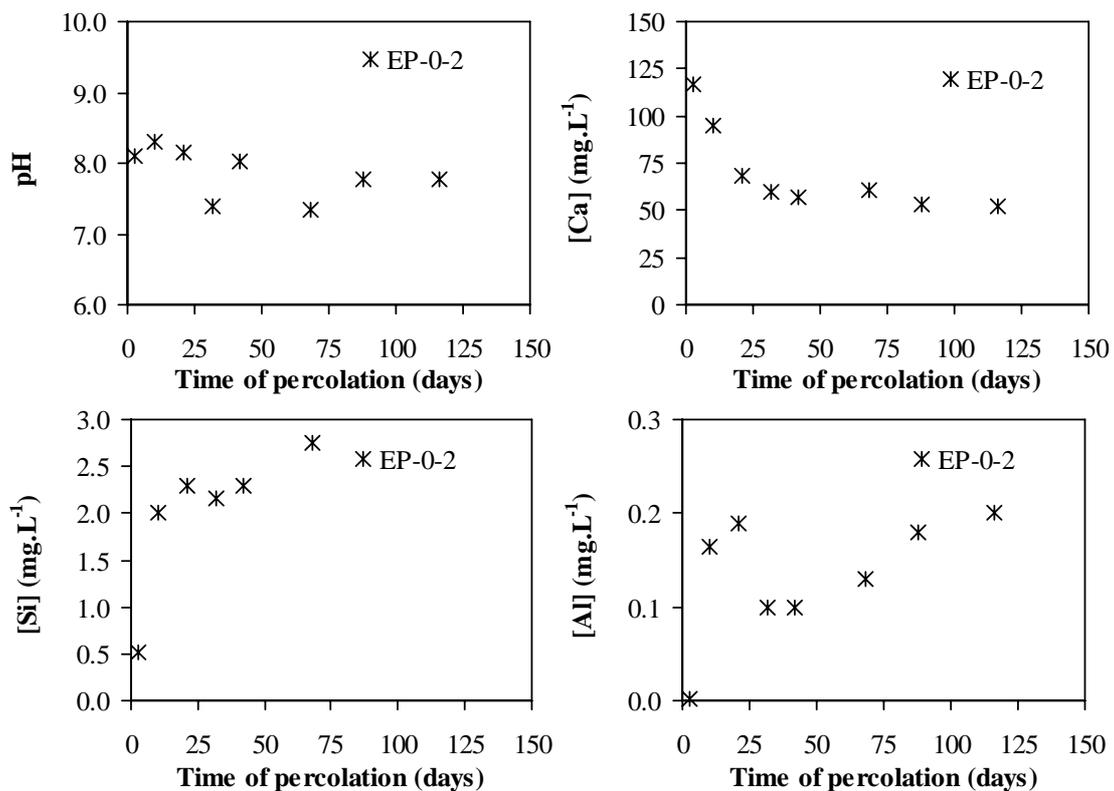


Figure 4. Evolution of the leachates pH, calcium concentrations, aluminium concentrations and silicon concentrations of the untreated specimen.

For the three specimens treated with 1 wt.% of lime, the evolutions of the leachates pH, calcium concentrations, silicon concentrations and aluminium concentrations are given in Figure 5.

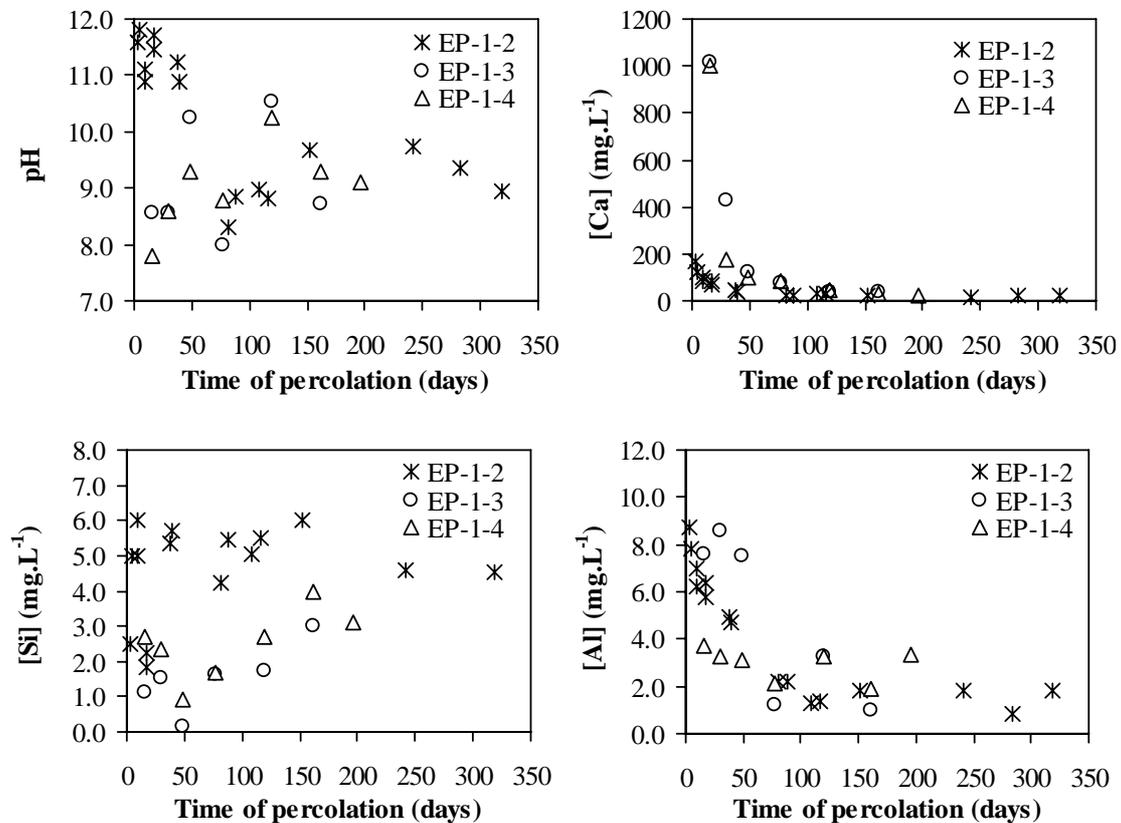


Figure 5. Evolution of the leachates pH, calcium concentrations, aluminium concentrations and silicon concentrations of specimens treated at 1 wt.% of lime.

Regarding the leachates pH, two distinct evolutions were recorded. The leachates pH of specimen EP-1-2 decreased from 11.8 at the beginning of the percolation to 9.0 after 75-day percolation, and remained thereafter constant to this value until 320-day percolation. By contrast, the leachates pH of specimens EP-1-3 and EP-1-4 shows an initial pH of 8.0-8.5 which slightly increased during the experiment to reach 9.0 at the end of the percolations. The leachates calcium concentrations of all the three specimens present the same trend despite the large differences that can be noted in the first days of leaching (leachates calcium concentrations of specimen EP-1-2 are much lower than that of specimens EP-1-3 and EP-1-4, respectively about 180 mg.L⁻¹ and 1000 mg.L⁻¹). In fact, they sharply decreased until 75-day leaching to reach a constant value of 25 mg.L⁻¹. Two distinct evolutions were also recorded concerning the leachates silicon concentrations. The leachates silicon concentrations

of specimen EP-1-2 seem to remain constant during leaching between 4.0 mg.L^{-1} and 6.0 mg.L^{-1} , whereas those of specimens EP-1-3 and EP-1-4 seem to slightly decrease until 50-day leaching before increasing to reach respectively 3.0 mg.L^{-1} and 4.0 mg.L^{-1} . The leachates aluminium concentrations of all the three specimens decreased until 75-day percolation and remained thereafter stable between 1.5 mg.L^{-1} and 3.0 mg.L^{-1} .

Figure 6 presents the changes of the carbonates content, available lime content, leached calcium and secondary compounds content of specimens treated with 1 wt.% of lime.

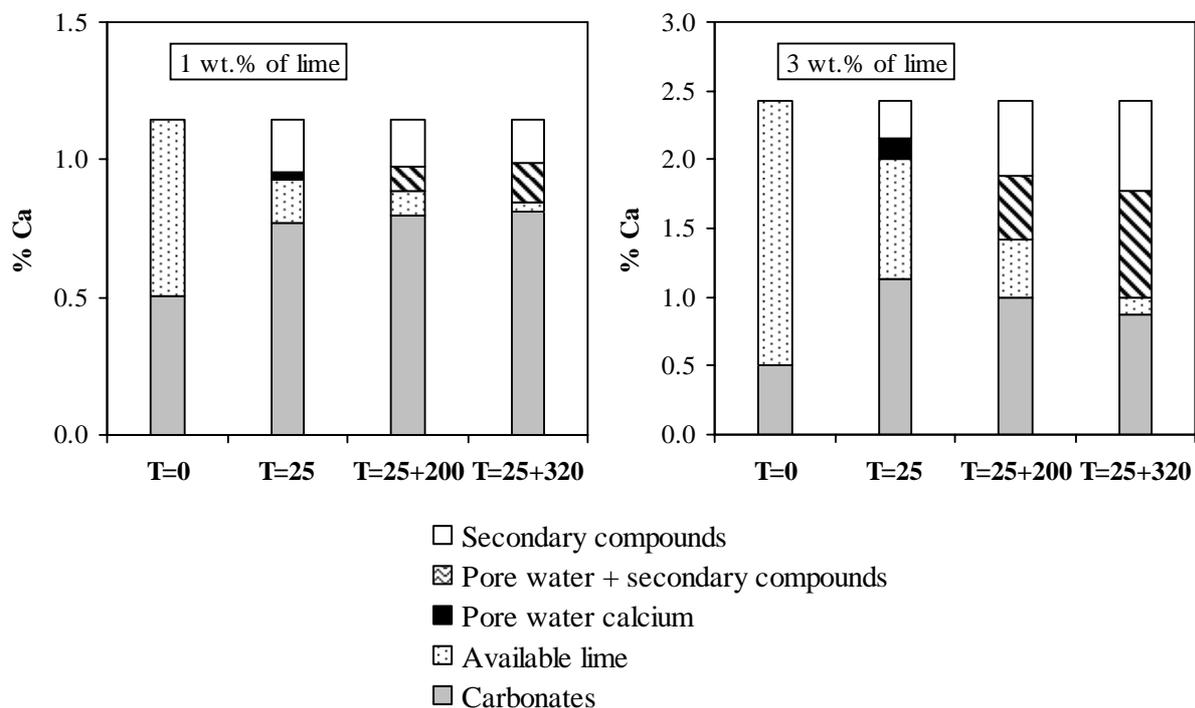


Figure 6. Speciation of calcium in lime-treated specimens according to the curing time and initial lime content (T=0 : lime treatment phase, T=25 : after 25 days of curing, T=25+200 : after 25 days of curing and 200 days of leaching and T=25+320 : after 25 days of curing and 320 days of leaching).

The amount of calcium contained in the soil porewater is considered as negligible and is not presented in this Figure. In fact, based on the assumption that the leachate calcium concentration recorded at a given time of percolation is equivalent to the mean calcium soil porewater concentration, the calcium contained in the soil porewater represents less than 0.006 wt.% Ca for the different percolation times considered in this study (i.e. 150 and 320 days). The carbonates contents of the specimens treated with 1 wt.% of lime remained stable even after 320-day leaching, whereas their available lime content decreased by 40 % after

200-day leaching and 56 % after 320-day leaching. It can be noticed that the mass percentage of leached calcium after 320-day percolation (i.e. 0.14 wt.% of Ca) is low as it only represents 8 % of the calcium initially present in the soil. Furthermore, it can be noticed that the secondary compounds content of specimens treated with 1 wt.% of lime remained the same after 320-day leaching as that after 25-day leaching, (i.e. 0.20 wt.% of Ca).

For the specimens treated with 3 wt.% of lime, Figure 7 presents the changes of the leachates pH, calcium concentrations, silicon concentrations and aluminium concentrations.

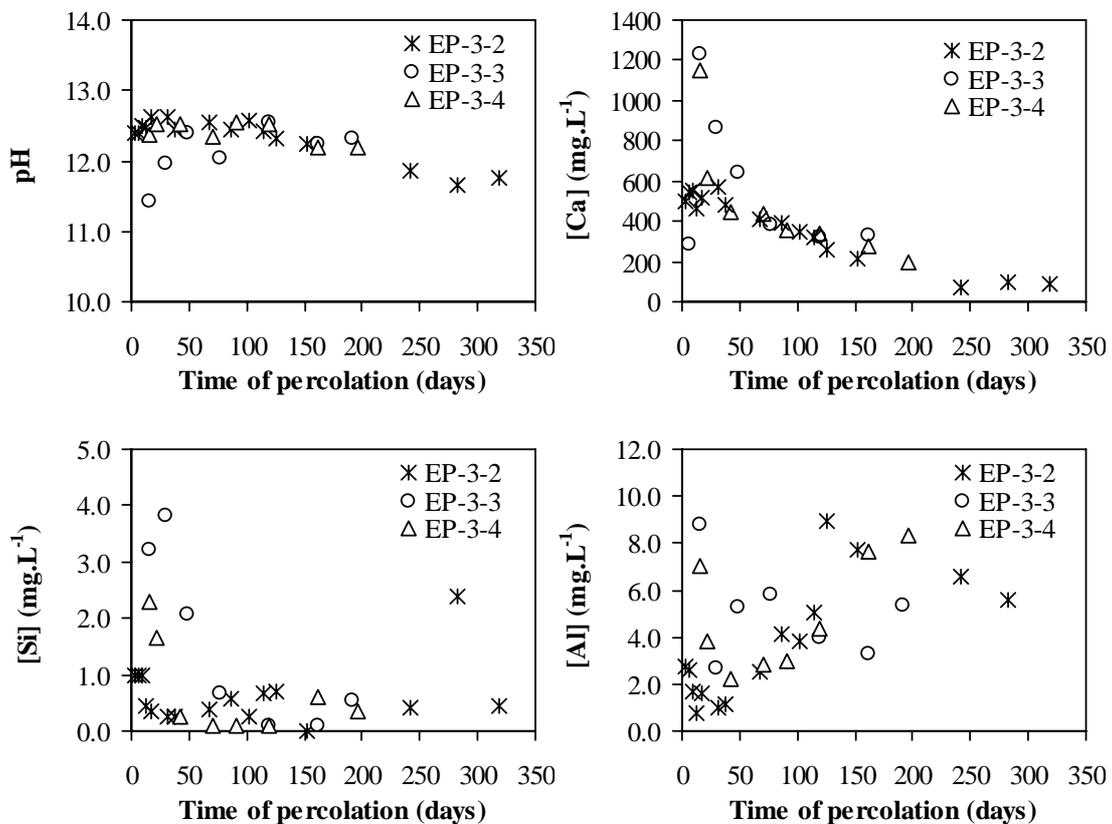


Figure 7. Evolution of the leachates pH, calcium concentrations, aluminium concentrations and silicon concentrations of specimens treated with 3 wt.% of lime.

The leachates pH of all the three specimens were ranging from 11.5 to 12.5 during percolation, the leachates pH of specimens EP-3-2 and EP-3-4 slightly decreasing during the experiment from 12.4 to 11.8. The leachates calcium concentrations of all the specimens changed in the same trend as those treated with 1 wt.% of lime. In fact, although the differences recorded until 50-day leaching (high leachates calcium concentrations, about 1200 mg.L⁻¹, for specimens EP-3-3 and EP-3-4 compared to that showed by specimen EP-3-2,

only 600 mg.L^{-1}), they all decreased to reach 200 mg.L^{-1} after 200-day leaching and 90 mg.L^{-1} after 320-day percolation. The leachates silicon concentrations of all the three specimens decreased from $1.0 - 4.0 \text{ mg.L}^{-1}$ at the beginning of the percolation to values under 0.5 mg.L^{-1} after 50-day percolation and remained thereafter stable between 0.1 mg.L^{-1} and 0.6 mg.L^{-1} . The leachates aluminium concentrations of specimen EP-3-2 increased during percolation from 2.0 mg.L^{-1} to 8.0 mg.L^{-1} after 320-day leaching. The same trend is observed for the specimens EP-3-3 and EP-3-4.

Figure 6 presents the changes of the carbonates content, available lime content, leached calcium and secondary compounds content of the specimens treated with 3 wt.% of lime. As for the specimens treated with 1 wt.% of lime, the amount of calcium contained in the soil porewater is not represented. It can be noticed that the carbonates content and available lime content decreased respectively by 25 % and 85 % after 320-day percolation, whereas their secondary compounds content increased by 50 %. Moreover, the mass percentage of leached calcium after 200-day leaching (i.e. 0.77 wt.% of Ca) represents 32 % of the calcium initially present in the soil.

5. Discussion

5.1 Physico-chemical behaviour of lime-treated soil during curing

The addition of 1 wt.% of lime to the Jossigny silt induced significant changes in its composition. From a pH of 8.1 for the initial soil, the addition of 1 wt.% of lime led rapidly to a high pH increase since it reached 12.5 after mixing and 12.3 after only one-day curing. This high pH value reflected the equilibrium with portlandite, Ca(OH)_2 . At the same time (i.e. first day of curing), 59 % of the initial amount of lime in terms of calcium ions was consumed and the carbonate content increased from 0.51 % of Ca to 0.77 %. After the first day of curing, the pH progressively decreased to reach a value of 10.8 after 25-day curing. The consumption of lime during this period is equivalent to that from the first and seventh day (9 %) and from the seventh and twenty-fifth day (10 %). The rapid drop of pH indicated a consumption of hydroxide ions (OH^-), which was probably due to the carbonate precipitation (CaCO_3). This carbonate precipitation must be the result of the presence of bicarbonate ions dissolved in the soil porewater since specimens were kept away during curing from the air. Based on these observations, it can be concluded that part of the calcium brought by lime was consumed by the precipitation of both portlandite and carbonates. Deducing the calcium contained in solution after 25-day curing, it can be estimated that 17 % of the added calcium contributed to

the formation of secondary compounds, so cementitious phases, and probably amorphous C-S-H gels. Their formation certainly resulted from the combination of the calcium ions released by lime and the dissolution, caused by the pH increase, of silica and alumina contained in the clay minerals.

In the case of the specimens treated with 3 wt.% of lime, the high initial pH was maintained longer reflecting the equilibrium or pseudo-equilibrium with portlandite (Ca(OH)₂) all through curing. The consumption of lime was more significant for these specimens compared to that for the specimens treated with 1 wt.% of lime. Part of this consumption would contribute to the increase of carbonates content observed after one-day curing (larger than that observed for the specimens treated with 1 wt.% of lime), as well as to the large proportion of cementitious phases formed. In fact, it can be assumed that the stability of the high pH conditions during curing gave rise to a more pronounced dissolution of clay minerals resulting in the formation of more secondary compounds. This assumption was confirmed by the secondary content recorded after 25-day curing (i.e. 0.30 % which is higher than that of specimens treated at the LMO, i.e. 0.20 %). The part of free lime, CaO + Ca(OH)₂, still available in the soil at the end of curing remained relatively high since it represented half of the initial amount of free lime added.

When quicklime is added to the soil, series of chemical reactions take place. These can be described as follows. First, the hydration of lime following:



Then the ionization of the calcium hydroxide leads to an increase of the soil pH by the release of OH⁻ and Ca²⁺:



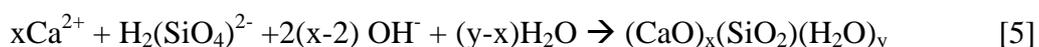
This pH increase provokes clay dissolution, following:



Then, the combination of Ca²⁺ and H₂(SiO₄)²⁻ after the dissociation of the silicic acid (pK_{a1}[H₄SiO₄/H₃(SiO₄)⁻]=9 and pK_{a2}[H₃(SiO₄)⁻/H₂(SiO₄)²⁻]=12) :



leads to the formation of C-S-H compounds. Their formation can be written as follows:



One can note from these different chemical reactions, that the dissolution of clay minerals and the formation of C-S-H compounds result in the consumption of OH⁻ ion which may in turn give rise to a decrease of pH. This assumption is confirmed by the physico-chemical results

obtained for both lime contents and especially for the specimens treated with 1 wt.% of lime. The series of carbonation reactions induces can also be described as follows:



which illustrates that carbonation can also contribute to lower the pH by the consumption of hydroxide ions. Then, CO_3^{2-} in porewater reacts with Ca^{2+} to precipitate carbonates phases according to:



Carbonates precipitation and C-S-H formation took place for both lime contents studied in the present work. However, it appears that the high pH induced by lime addition can be maintained at longer term with high lime content. From calcium data, and in terms of lime consumption balance, 53 % of the lime added was converted to carbonates and 40 % in C-S-H in the case of a treatment at the LMO (1 wt.% of lime), whereas in the case of a treatment with 3 wt.% of lime, 59 % of the lime added was converted to carbonates and only 27 % in C-S-H. However, the total amount of C-S-H formed was higher with an addition of 3 wt.% of lime.

5.2 Physico-chemical behaviour of lime-treated soil during the leaching

Two different phases can be distinguished when subjected a lime-treated specimen to leaching. During the first phase, from the beginning to about 75 days in the case of specimens treated with 1 wt.% and from the beginning to about 50 days in the case of 3 wt.% of lime, different behaviours can be noticed for a given lime content according to the specimen considered. These differences can be attributed to the time necessary for the system to reach steady state conditions. Besides, the fact that the differences noted for the specimens treated with 1 wt.% of lime are more pronounced than those observed for the specimens treated with 3 wt.% of lime may indicate that adding lime at the LMO could lead to variable development levels of pozzolanic reactions. In fact, according to several authors (Eades and Grim, 1966; Little, 1995), pozzolanic reactions could not develop or well develop when lime is added at the LMO.

The second phase of leaching, starting from 75 days (1 wt.%) or 50 days (3 wt.%) corresponds to the leaching behaviour of the different specimens once steady state conditions reached. In that phase, the leachates pH of all specimens tends to remain stable with the time of percolation. The leachates pH of the untreated specimen remained constant to 8.0, stable between 8.5 and 9.5 for the specimens treated with 1 wt.% and remained stable between 11.5 and 12.5 for the specimens treated with 3 wt.% of lime remains. It is interesting to note that

the stability of the leachates pH is contradictory to the linear decrease recorded by McCallister and Petry (1992) but in agreement to the results of De Bel et al. (2005). This difference of behaviour may be associated to the different nature of soils used in these studies. In fact, the soil used in this work largely differs from the plastic soils used by McCallister and Petry (1992) but is relatively close to that used by De Bel et al. (2005).

The leachates calcium concentrations of all specimens decreased with the time of percolation. The values for the specimens treated with 1 wt.% of lime decreased rapidly below 100 mg.L^{-1} and reached 25 mg.L^{-1} after 320-day leaching, whereas the values for the specimens treated with 3 wt.% of lime remained relatively high even after 320-day percolation: 90 mg.L^{-1} . Again, the calcium results recorded in this study differ from those obtained by McCallister and Petry (1992) who recorded a linear decrease of leachate calcium concentration during the first 90 days of leaching, but are similar to the trend observed by De Bel et al. (2005). This can be equally explained by the difference in soils nature.

The leachates silicon concentrations of the specimens treated with 1 wt.% of lime range from 3.0 mg.L^{-1} and 4.0 mg.L^{-1} after 200-day leaching, whereas these of the specimens treated with 3 wt.% of lime are almost constant between 0.1 mg.L^{-1} and 0.6 mg.L^{-1} during leaching. The leachates aluminium concentrations of the specimens treated with 1 wt.% of lime remained stable between 1.0 mg.L^{-1} and 3.0 mg.L^{-1} until 320-day percolation. In the case of the specimens treated with 3 wt.% of lime, the leachates aluminium concentrations tended to increase to reach a value of about 8 mg.L^{-1} after 320-day percolation. In terms of calcium balance, it can be considered that carbonates content of the specimens treated with 1 wt.% of lime remained stable during leaching, whereas that of the specimens treated with 3 wt.% of lime decreased by 25 %. The available lime contents of specimens treated with either 1 wt.% and 3 wt.% of lime decreased during leaching by respectively 56 % and 85 %. The content of cementitious compounds of specimens treated with 1 wt.% of lime was stable after 320-day percolation, whereas that of specimens treated with 3 wt.% of lime showed an increase of 50 %.

During leaching, various complex reactions occur resulting in a modification of the physico-chemical characteristics. The physico-chemical analysis of the soil after the curing period shows a pH of 10.9. Such a value is consistent with the leachates pH of specimen EP-1-2 at the beginning of leaching. In fact, it can be considered that part of the free lime in the soil was leached leading to a slight increase of pH. The low leachates pH of specimens EP-1-3 and EP-1-4 at the beginning of the percolation is however difficult to explain. Nevertheless,

two different hypotheses can be proposed. First, it can be assumed that water circulates in areas of the soil free of lime, the leachate representing in that case the equilibrium of the soil in its initial state without lime. This assumption not only suggests the development of preferential paths of water circulation but a heterogeneous distribution of the lime with a concentration of lime in certain areas of the specimens. The second assumption is based on the fact that these specimens may have followed a different evolution during curing to that described in this paper and thus exhibit different characteristics from those recorded after curing in Table 6 and Figure 3. In fact, it can be assumed that they have followed a more pronounced evolution during curing giving rise to a more significant consumption of lime thus resulting in a lower soil pH than that measured experimentally (Table 6). This lower pH could be due to the formation of more cementitious compounds or cementitious compounds with lower C/S ratio (Nonat and Lecocq, 1997), but also to the formation of more carbonates. The real evolution of these specimens treated with 1 wt.% of lime probably corresponds to part of both hypotheses even though the second seems more probable. Besides, the high calcium concentrations recorded in the leachates of specimens EP-1-3 and EP-1-4 could be the result of the initial decalcification of the C-S-H phases while the pH reflects the carbonated state of the sample.

Examination of the physico-chemical properties of the specimens treated with 1 wt.% of lime (see more detail in Table 6 and Figure 5) shows that the leaching period reveals a modification of the calcium distribution within the soil specimens. In fact, although the C-S-H content remained constant, a progressive decrease of the free lime content can be observed at the same time that the proportion of calcium leached increased. It can be therefore assumed that water circulation induced the dissolution of the portlandite that was not consumed during curing, but also a progressive decalcification of the C-S-H phase. This behaviour is similar to the decalcification process usually described for the dissolution of portlandite and C-S-H in hydrated cement system exposed to pure water (Glasser et al., 2008). The leaching of calcium appears to be a relatively slow process although the drastic conditions imposed on the soil specimens. One can therefore hypothesize that the kinetic of the dissolution of portlandite and C-S-H is slow. Another assumption can be put forward to explain the low amounts of calcium leached: the release of calcium element may be partially compensated by the precipitation of secondary phases. However, before concluding on the existence of such local equilibrium, mineralogical analysis need to be carried out to check the possible presence of areas with constant chemical and mineralogical compositions (Adenot, 1992; Revertegat et al., 1992). The mechanism of decalcification of the C-S-H phase is supported by the presence of silicon

in the leachates. The presence of aluminium in the leachates probably reveals that in addition to C-S-H, some C-A-H or C-A-S-H may have precipitated during curing and were dissolved during leaching.

In the case of the specimens treated with 3 wt.% of lime, it can be considered that the global evolution of the leachates concentrations is similar for each specimens since the same trends were recorded. The main difference with the specimens treated with 1 wt.% of lime concerns the evolution of the leachates pH. It was comprised between 12.5 and 11.5 during leaching and is more precisely maintained to values close to 12.4 until the first 150-day of leaching. This indicates the buffering of the solution in the stability domain of portlandite. The chemical scheme previously described for curing also seems to occur during leaching, although probably to a lesser extent. In fact, portlandite precipitates entailing high pH that contributes to high concentrations of Ca^{2+} and OH^- in solution which promote the dissolution of the clay minerals and the formation of cementitious compounds. The increase of the C-S-H content argues in favour of this hypothesis (Figure 7). Besides, because of the high amounts of calcium leached during the experiment, it cannot be excluded the dissolution of part of the portlandite or the dissolution of carbonates since the carbonates contents decreased. The decalcification of the cementitious compounds may also contribute to the calcium being leached. However, one can assume that C-S-H compounds could withstand leaching better than C-A-H compounds because of the very low concentrations of silicon and the higher concentrations in aluminium in the leachates.

When comparing the calcium balance and the proportion of cementitious phases and carbonates, at the end of the experiment (320 days), it appears that the part of carbonates contained in specimens treated with 3 wt.% of lime is much less important than in the specimens treated with 1 wt.% of lime. Considering that the calcium carbonates do not contribute to the performance gain of the soil, it can reasonably be hypothesized that the mechanical performance after 320-day leaching is higher in the case of 3 wt.% of lime. However, regarding the soil leaching and the dissolution of portlandite with the water circulation, mechanical performance must have probably decreased compared to that reached after the curing phase.

Obviously, the addition of a quantity of lime above the LMO probably enables the maintenance of high pH conditions during leaching leading to the formation of cementitious compounds. In the case of the addition corresponding to the LMO, one year experiment of water circulation can induce a marked decline in the supply of lime which continues slowly to

decrease simultaneously to the decalcification of the C-S-H, leading to a carbonated soil with probably low mechanical properties. The effects of the lime addition are gradually cancelled by leaching. As concluded by McCallister and Petry (1992), these data argue in favour of the use of quantities of lime beyond the LMO of the soils.

6. Conclusion

The lime-treated Jossigny silt was studied to assess the effect of lime quantity added to the soil during curing period as well as during water percolation period. The following conclusions can be drawn from the experimental observations:

1. During curing, carbonates precipitation and C-S-H formation take place for both lime contents considered in this study (1 wt.% and 3 wt.%). However, the high pH induced by the addition of lime appears to be maintained at longer term when adding lime above the soil LMO. Besides, the total amount of C-S-H formed is higher in the case of an addition of lime above the soil LMO.
2. The leaching behaviour of the soil treated at the LMO after 25-day curing differs from that obtained for the soil treated at a higher lime content. In the case of the specimens treated at the LMO, one-year of water circulation induces a marked decline in the supply of lime and a decalcification of the C-S-H compounds, leading to a carbonated soil. In the case of the specimens treated at a lime content above the LMO, in spite of the dissolution of portlandite and decalcification of part of cementitious compounds, conditions necessary to the formation of cementitious compounds seem to be maintained at longer term and lead to an increase in the amount of cementitious compounds. The mechanical performance of soil treated at lime content above the LMO is therefore expected to be better than that of the soil treated at the LMO.

Finally, it appears that long term water contact seems to gradually cancel the effect of lime. In this regard, the addition of high lime contents could be a mean for the durability of hydraulic earth structures at long term.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Water and Environment Department of the Laboratoire Central des Ponts et Chaussées of Nantes, and especially, Dominique Demare, Gilles Dormal and Valérie Panhalleux for undertaking the ICP-AES experimental measurements.

References

- Adenot F., 1992. Durabilité du béton : caractérisation et modélisation des processus physiques et chimiques de dégradation du ciment. PhD Thesis, University of Orléans.
- Bagonza, S., Peete, J.M., Freer-Hewish, R., Newill, D., 1987. Carbonation of stabilized soil-cement and soil-lime mixture. Proceeding of Seminar, PTRC Transport and Planning Summer Annual Meeting, University of Bath, pp. 29-48.
- Bell, F.G, 1996. Lime stabilization of clay minerals and soil. *Engineering Geology* 42, 223-237.
- Boardman, D.I., Glendinning, S., Rogers, C.D.F., 2001. Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes. *Géotechnique* 50(6), 533-543.
- Brandl, H., 1981. Alteration of soil parameters by stabilization with lime. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 3, pp. 587-594.
- Carde, C., François, R., 1997. Effect of ITZ leaching on durability of cement based materials. *Cement and Concrete Research* 27, 971-978.
- De Bel, R., Bollens, Q., Duvigneaud, P.H., Verbruge, J.C., 2005. Influence of curing time, percolation and temperature on the compressive strength of a loam treated with lime. International Symposium TREMTI, paper n°C022, 10p.
- Diamond, S., Kinter, E.B., 1965. Mechanisms of soil-lime stabilization. *Highway Research Record* 92, 83-102.
- Eades, J.L., Grim, R.E., 1966. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization, *Highway Research Board Bulletin* 262, 51-63.
- Ferber, V., Auriol, J.C., Cui, Y.J., Magnan, J.P., 2008. Wetting-induced volume changes in compacted silty clays and high-plasticity clays. *Canadian Geotechnical Journal* 45, 252-265.

- Glasser, F.P., Marchandand, J., Samson, E., 2008. Durability of concrete - Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. *Cement and Concrete Research* 38(2), 226-246.
- Hadji-Djafari, S., Wright, J.C., 1983. Determining the long term effects on interactions between waste permeants and porous media. *Hazardous and Industrial Solid Waste Testing*, ASTM STP 805, Philadelphia, Penn., 246-264.
- McCallister, L.D., Petry, T.M., 1992. Leach tests on lime-treated clays. *Geotechnical Testing Journal* 15(2), 106-114.
- Nonat, A., Lecoq X., 1997, The structure, stoichiometry and properties of C-S-H prepared by C3S hydration under controlled solution, in: P. Colombet, A.-R. Grimmer, H. Zanni, P. Sozzani (Eds.), *Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy of Cement Based Materials*, Springer, Berlin, pp. 197– 207.
- Revertegat, E., Richet, C., Gegout, G., 1992. Effect of pH on the durability of cement pastes. *Cement and Concrete Research* 22, 259-272.
- Rogers, C.D.F., Glendinning, S. 1996. Modification of clays soils using lime. In: *Lime stabilization*, Thomas Telford, London, pp. 99-112.
- Rogers, C.D.F., Glendinning, S., 2000. Lime requirements for stabilization. *Transportation Research Record* 1721, 9-18.

III.2. CONCLUSION

L'étude conduite et présentée dans ce chapitre a permis de confirmer un certain nombre des observations faites dans le premier chapitre (synthèse bibliographique), mais aussi d'apporter de nouveaux éléments pour la description et la compréhension du comportement physico-chimique d'un sol limoneux traité à la chaux au cours d'une courte période de cure de 25 jours et au cours d'une circulation d'eau à long terme (jusqu'à 320 jours).

Période de cure

Les résultats ont confirmé que des produits cimentaires se forment au cours de la période de cure et que leur proportion, pour un temps de cure donné, dépend de la quantité de chaux ajoutée : une forte teneur en chaux favorisant leur formation. Les résultats obtenus ont par ailleurs permis de mettre en évidence que la proportion de ces produits reste pour ce sol relativement faible. En effet, elle ne représente qu'entre 15 % et 30 % de la chaux ajoutée après 25 jours de cure. Cette étude a également permis de montrer que la formation des produits cimentaires à long terme semblait favorisée par l'ajout d'un dosage en chaux supérieur au PFC, puisque celui-ci permet de maintenir un fort pH à plus long terme.

Il a aussi été observé, comme de nombreux auteurs (par ex. Golberg & Klein, 1952 ; Glenn & Handy, 1963 ; Bell 1996 ; De Bel, 2005), que l'ajout de chaux dans le sol étudié conduisait à la carbonatation d'une partie de la chaux, et donc, à la précipitation de calcite. Cette étude a permis, par rapport aux connaissances actuelles, de préciser l'ampleur de ce phénomène ainsi que sa cinétique. En effet, il a été observé pour les deux dosages en chaux considérés, que la proportion de chaux carbonatée était importante (environ 35 % de la chaux ajoutée) et que sa cinétique de formation était très rapide (teneur en carbonates maximale atteinte après seulement 1 jour de cure).

Enfin, cette étude a aussi permis de souligner que, malgré une consommation importante de la chaux ajoutée pour la formation de composés cimentaires et de carbonates, une grande partie de la chaux restait inutilisée après 25 jours de cure : 24 % et 46 % pour un traitement respectivement à 1 % et 3 % de chaux. Les résultats obtenus n'ont cependant pas permis de déterminer la part de chaux inutilisée sous forme de chaux hydratée, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ou de chaux vive, CaO .

Circulation d'eau

Cette étude a permis de confirmer que le comportement physico-chimique des sols traités à la chaux résulte d'une compétition entre processus de dissolution/décalcification et processus de précipitation, les processus de dissolution/décalcification se produisant vraisemblablement pour ce type de matériau poreux dans les gros pores, où le flux de la circulation est important, et les processus de précipitation, dans les petits pores, où la circulation est moins active et les conditions plus favorables à la formation de produits secondaires.

Les analyses conduites dans cette étude n'ont toutefois pas permis de déterminer la part exacte de chacun de ces processus. Ainsi, il n'a pas été possible à partir des résultats obtenus de déterminer la part de calcium lessivé provenant de la décalcification des produits cimentaires ou de la chaux inutilisée (chaux hydratée ou chaux vive). L'ampleur du processus de décalcification reste donc incertaine.

Toutefois, plusieurs hypothèses ont pu être émises à partir de l'évolution des proportions de produits cimentaires obtenues au cours du temps de circulation. Ainsi, la stabilité de la proportion de produits cimentaires dans le sol observée pour un traitement au PFC laisse penser que la décalcification des produits cimentaires pourrait être pour ce dosage en chaux compensée par la précipitation de produits cimentaires. En revanche, dans le cas d'un traitement à un dosage en chaux supérieur au PFC, l'augmentation de la proportion de produits cimentaires au cours de la circulation d'eau sous-entend que le processus de décalcification pourrait être négligeable par rapport au processus de précipitation.

Pour conclure, ce chapitre a permis de préciser le comportement physico-chimique d'un sol peu argileux traité à la chaux au cours d'une courte période de cure et au cours d'une circulation d'eau. Les résultats obtenus et présentés dans ce chapitre seront utilisés dans les chapitres IV et V afin d'expliquer l'origine de l'évolution du comportement hydraulique et mécanique du sol traité étudié au cours de la période de cure et des différentes sollicitations hydriques considérées dans ce travail.

À l'issue de ce chapitre, de nombreuses questions restent sans réponse. Celles-ci concernent en particulier l'ampleur du processus de décalcification et l'origine exacte du calcium lessivé. Une des perspectives serait donc d'approfondir ce travail afin de conclure sur ces points. Une autre perspective serait de conduire les essais de circulation sous différentes charges hydrauliques, et notamment des charges plus faibles, proches des conditions

auxquelles les sols peuvent être soumis dans la réalité. Ces essais permettraient d'évaluer l'effet de la charge hydraulique sur les processus physico-chimiques. De même, l'influence de l'eau utilisée dans cette étude (eau déminéralisée) sur les différents processus physico-chimiques reste à déterminer. Des essais complémentaires doivent donc être conduits sur différents types d'eau. Enfin, une confrontation entre comportement en laboratoire et comportement sur des ouvrages grandeur nature apparaît aussi comme une étape nécessaire pour un transfert des résultats obtenus vers la pratique.

Chapitre IV – Microstructure et comportement hydraulique du limon de Jossigny traité à la chaux et soumis à une circulation d'eau

IV.1. INTRODUCTION

Le comportement hydraulique des sols limoneux traités à la chaux apparaît comme un des paramètres primordiaux lorsque la réutilisation de ces sols est envisagée pour la construction d'ouvrages hydrauliques ou de remblais en zone inondable.

En effet, la fonction première des ouvrages hydrauliques est de retenir l'eau. Il apparaît donc nécessaire de s'assurer que les sols employés pour leur construction présentent une perméabilité suffisamment faible à court terme mais aussi à long terme, c'est-à-dire une fois les ouvrages exposés aux différentes sollicitations de leur environnement, et plus particulièrement à des circulations d'eau. Le chapitre 1 a permis de mettre en évidence que la perméabilité des sols traités à la chaux est influencée par un certain nombre de paramètres pouvant être contrôlés sur un chantier : dosages en chaux, temps de cure et conditions de compactage. Toutefois, le rôle de ces différents paramètres sur la perméabilité des sols traités à la chaux reste mal connu. Ceci est particulièrement vrai pour les sols limoneux qui ne font l'objet que d'un petit nombre d'études (par ex. Brandl, 1981 ; Le Borgne, 2006). De même, ce chapitre a permis de souligner que l'évolution de la perméabilité des sols traités à la chaux exposés à une circulation d'eau, et en particulier des sols limoneux, reste incertaine.

Le chapitre 1 a par ailleurs permis de montrer que la pérennité des améliorations mécaniques apportées par la chaux à des sols plastiques exposés à une circulation d'eau (cas des ouvrages hydrauliques ou remblais en zone inondable) semble fortement liée à leur perméabilité. En effet, les résultats présentés par McCallister (1990) sur des sols plastiques traités à la chaux indiquent qu'une faible perméabilité semble permettre, au contraire d'une forte perméabilité, de maintenir à plus long terme les améliorations mécaniques apportées par la chaux. Il peut être supposé, dans une première approche, que cette conclusion s'applique également aux sols limoneux traités à la chaux. Cette hypothèse permet ainsi d'avancer

qu'une faible perméabilité pourrait être favorable à la durabilité des ouvrages hydrauliques ou des remblais en zone inondable construits en sols limoneux traités à la chaux.

Dans ce contexte, ce chapitre a pour but de préciser le rôle des paramètres pouvant être contrôlés sur un chantier sur la perméabilité d'un sol limoneux traité à la chaux, le limon de Jossigny, mais aussi l'effet d'une circulation d'eau sur l'évolution de sa perméabilité une fois le sol exposé à une circulation d'eau à long terme. Pour ce faire, il a été supposé, similairement à ce qui est observé dans le cas des sols non traités (Garcia-Bengochea *et al.*, 1979), que l'évolution de la perméabilité des sols traités devait être étroitement liée à l'évolution de leur microstructure. Le chapitre 1 a toutefois permis de montrer que l'état des connaissances actuelles ne permettait pas de conclure, compte tenu du petit nombre de travaux disponibles sur le sujet, quant à l'effet des paramètres pouvant être contrôlés sur un chantier sur la microstructure des sols limoneux traités à la chaux. Ainsi, l'étude de l'influence de ces paramètres sur la microstructure du limon de Jossigny traité à la chaux est apparue comme une étape préalable à la détermination des liens existants entre microstructure et perméabilité.

Ce chapitre se présente sous la forme d'un article soumis à la « Revue Canadienne de Géotechnique » (article 2). Toutefois, les différentes observations aux microscopes électroniques à balayage réalisées au cours de ce travail sont données dans la première partie de ce chapitre afin de se faire une première idée de l'aspect de surface, et donc de la microstructure du limon de Jossigny non traité et traité.

IV.2. OBSERVATIONS AU MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE À BALAYAGE

Des observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont été réalisées après 25 jours de cure sur des échantillons de limon de Jossigny non traité et traité à 1 % et 3 % de chaux compactés à leur optimum Proctor respectifs. Celles-ci ont permis de se faire une première idée de l'aspect de surface du limon de Jossigny non traité et traité (fig. 33, fig. 34, fig. 35 et fig. 36).

Contrairement à ce qui est généralement observé pour la majorité des sols argileux compactés (par ex. Delage *et al.*, 1996), les observations MEB réalisées sur le limon de Jossigny non traité ou traité n'ont pas permis de mettre en évidence un regroupement des particules en agrégats. Ce phénomène a été attribué à un effet de la procédure de compactage

dynamique employée dans cette étude. En effet, celle-ci pourrait conduire à une désagrégation des agrégats formés. La faible proportion d'argile présente dans le limon de Jossigny (~ 29 %) comparée aux sols argileux pourrait aussi contribuer à ce phénomène.

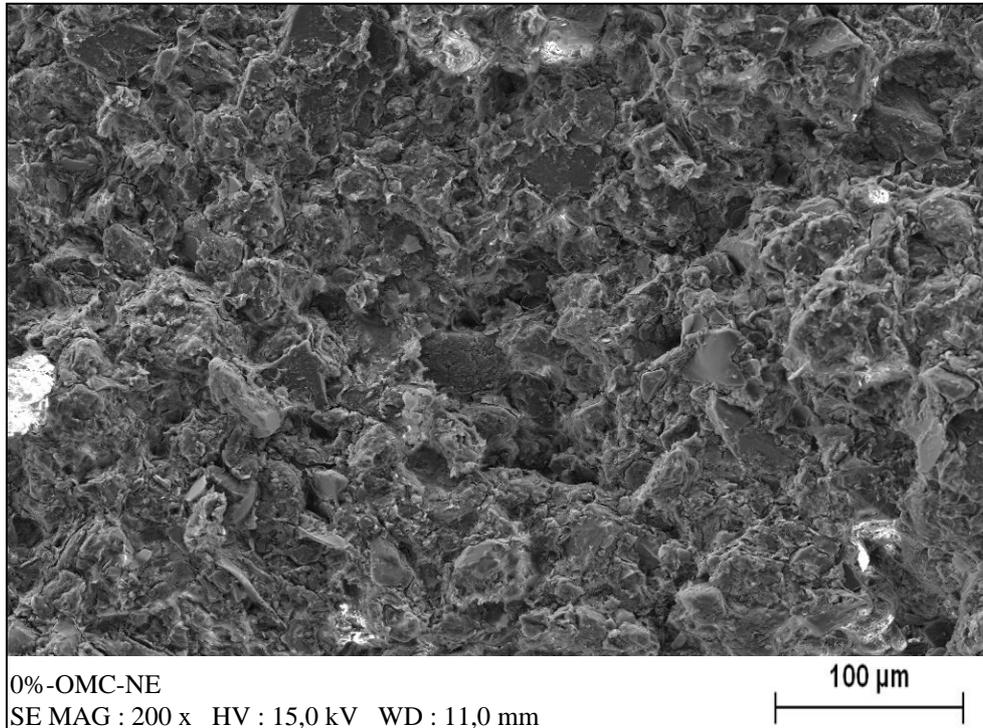


Figure 33. Observation de surface au MEB du limon de Jossigny non traité.

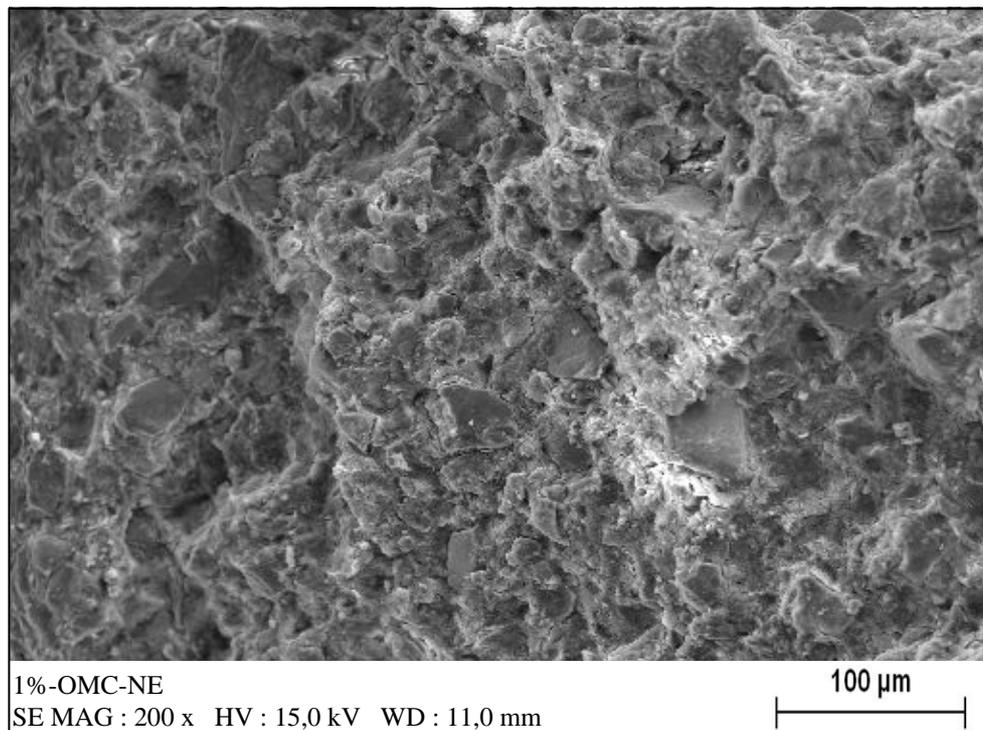


Figure 34. Observation de surface au MEB du limon de Jossigny traité à 1 % de chaux.

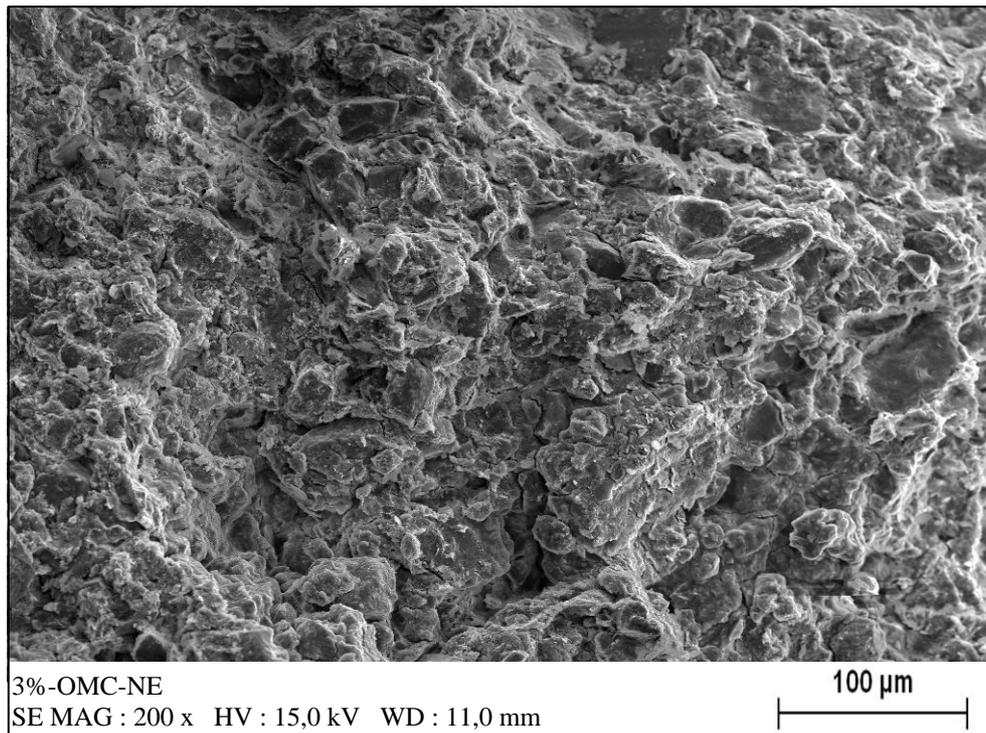


Figure 35. Observation de surface au MEB du limon de Jossigny traité à 3 % de chaux.

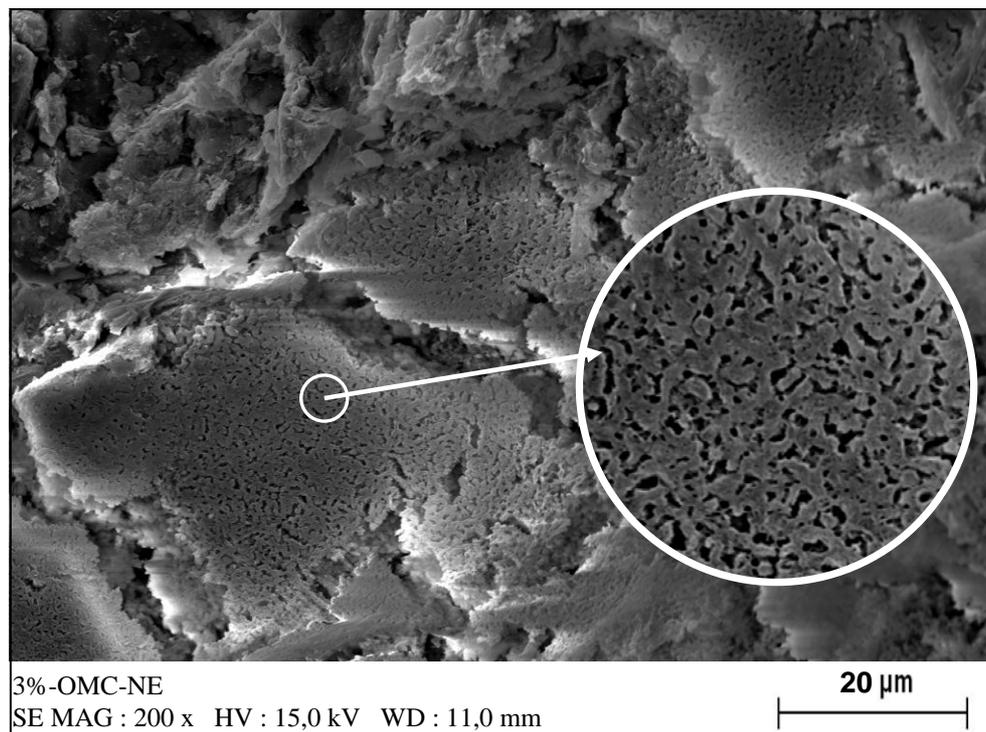


Figure 36. Observation de surface au MEB du limon de Jossigny traité à 3 % de chaux – Organisation à l'échelle de la microporosité.

Les observations au MEB ont néanmoins permis de constater que la surface des échantillons traités (fig. 34 et fig. 35) est légèrement plus rugueuse que celle du sol non traité,

ce notamment dans le cas d'un traitement à 3 % de chaux, pour lequel une nette prééminence de certaines particules de sol a pu être notée. Malgré ces aspérités plus marquées dans le cas des échantillons traités, il a été observé, similairement au limon de Jossigny non traité (fig. 33), que les particules de sol étaient extrêmement bien entremêlées les unes aux autres, ne laissant apparaître que très peu de vides, et rendant la distinction de nature entre particules difficile.

Les observations au MEB n'ont pas permis de confirmer les résultats physico-chimiques présentés dans le chapitre précédent. En effet, il n'a pas été possible, dans le cas des échantillons traités, de détecter la présence de composés cimentaires ou de carbonates. Ceci peut être attribué à la faible proportion de ces différents produits comparée à la masse de sol traité à la chaux ou à leur mauvaise cristallisation (produits sous forme de gel amorphe).

Enfin, par opposition aux autres échantillons, il a été mis en évidence dans le cas des échantillons traités à 3 % de chaux, des structures particulières organisées en nid d'abeille (fig. 36). La nature de ces arrangements reste néanmoins à classer.

IV.3. ARTICLE 2

Cet article a pour objectif de déterminer le rôle des paramètres initiaux (dosage en chaux, temps de cure et conditions de compactage) sur la perméabilité d'un sol limoneux, le limon de Jossigny, mais aussi l'effet d'une circulation d'eau sur l'évolution de sa perméabilité une fois le sol exposé à une circulation d'eau à long terme. Néanmoins, avant de conclure sur ces différents points, l'étude de l'influence des paramètres initiaux sur la microstructure du limon de Jossigny s'est avérée être une étape préalable nécessaire à ce travail.

La circulation d'eau a été simulée à partir d'un dispositif de percolation (décrit en détail dans le chapitre 2) basé sur des cellules similaires à des perméamètres à paroi flexible. Des essais de porosimétrie par intrusion de mercure ont été réalisés avant et après circulation d'eau sur des éprouvettes de sol traité et non traité compacté. Ces essais ont permis de suivre l'évolution de la distribution porale des échantillons. La perméabilité des éprouvettes de sol a été suivie au cours d'une circulation d'eau. Une approche physico-chimique, à partir des résultats présentés dans le chapitre précédent, a été proposée afin d'expliquer, d'une part l'évolution de la microstructure du sol traité en fonction des différents paramètres initiaux, et d'autre part, la relation entre microstructure et comportement hydraulique.

Différentes conditions de compactage, ainsi que différents dosages en chaux et temps de cure, ont été considérés dans ce travail pour évaluer l'influence des paramètres initiaux sur la microstructure et la perméabilité du limon de Jossigny. Deux teneurs en chaux ont ainsi été considérées : 1 % (PFC du limon de Jossigny) et 3 %. Trois teneurs en eau de compactage (compactage à l'optimum, du côté sec et du côté humide) ainsi que trois énergies de compactage (énergie Proctor normale, sur compactage et sous compactage) différentes ont été choisies. Finalement, 4 temps de cure différents ont été sélectionnés : 1, 7, 15 et 25 jours.

Les résultats obtenus ainsi que leur interprétation sont donnés dans la suite de ce paragraphe sous forme d'un article soumis à la « Revue Canadienne de Géotechnique ».

Impact of the initial state on fabric and permeability of a lime-treated silty soil subjected to long term leaching

B. Le Runigo^a, O. Cuisinier^{1a}, Y.C. Cui^b, V. Ferber^c, D. Deneele^a

^aLaboratoire Centrale des Ponts et Chaussées de Nantes, Division RMS

^bEcole Nationale des Ponts et Chaussées, UR Navier – CERMES

^cEntreprise Charier, 44550 Montoir de Bretagne

Soumis à la Revue Canadienne de Géotechnique, Juillet 2008

ABSTRACT

English version

Long term performance of lime-treated soils is still in question, especially in the case of the use of such soils to build earthen structures in permanent contact with water (dams, river levee, etc.). Indeed, water circulation may induce significant alteration of the improvements brought by lime. In this context, the present work intends to study the long term behaviour (durability) of lime-treated soils submitted to a water circulation as well as evidence the most favourable initial compaction conditions in term of lime-treated soil durability. First, the impact of lime addition on soil microstructure is investigated with mercury porosimetry tests. This was done in order to highlight the effect of curing time, lime content and compaction conditions on soil initial permeability that appeared to be a critical parameter in terms of long term behaviour of the lime treated soil. Then, lime-treated soil samples were submitted to the circulation of water over a period of 150 days. The obtained results showed that the soil permeability did not fluctuate with circulation time. The stability of the specimen fabric through the experiment confirmed this result.

Key-words: Lime-treated Jossigny silt, permeability, fabric, initial state, leaching.

¹ Corresponding author ; olivier.cuisinier@lpc.fr ; tel : +33 2 40 84 56 68 ; fax: +33 2 40 84 59 97

Version française

La performance à long terme des sols traités à la chaux est une question encore largement débattue, notamment dans le contexte de l'utilisation de ces sols pour la réalisation d'ouvrages en terre en contact permanent ou fréquent avec de l'eau (barrages, berges de rivière, etc.). Le contact à l'eau pourrait induire une altération des améliorations apportées par le traitement à la chaux. Ce travail vise à apporter quelques éléments de réponse sur la durabilité des performances d'un sol traité à la chaux soumis à un écoulement d'eau. Une partie de ce travail consiste aussi à identifier les conditions de compactage les plus favorables en terme de durabilité. Cette étude s'est focalisée dans un premier temps sur l'effet de l'ajout de chaux sur la microstructure d'un sol via des essais de porosimétrie au mercure. Cette étape s'est avérée nécessaire pour une meilleure compréhension de l'impact du dosage en chaux, du temps de cure et des conditions de compactages sur la perméabilité initiale des sols, celle-ci apparaissant comme un paramètre primordiale dans le comportement à long terme des sols traités à la chaux. Le sol traité a ensuite été soumis à une circulation d'eau sur une période de 150 jours. Les résultats ont montré que la perméabilité du matériau n'évoluait pas en cours de la circulation. La stabilité de la microstructure du sol observée au cours des essais de circulation d'eau confirme ce résultat.

Mots-clés : Limon de Jossigny traité à la chaux, perméabilité, microstructure, état initial, lixiviation.

1. Introduction

Lime stabilization is a widespread technique in the field of earthworks that can both improve the workability but also the mechanical properties of wet soils. In fact, cation exchange process combined with the presence of large amounts of calcium ions on the adsorbed clay particles surface (calcium coming from the lime added) lead to a reduction of the double diffuse layer size of the clay particles. This phenomenon results in lower repelling force between clay particles and thereby gives rise to the clay particles flocculation. It is generally accepted that cation exchange and flocculation processes occur immediately after the addition of lime and result in a decrease of the soil plasticity (e.g. Eades and Grim 1966; Rogers and Glendinning 1996). Moreover, the addition of lime also entails a high pH environment which enables the dissolution of both silica and alumina present in the soil. As a

result, cementitious compounds such as hydrated calcium silicates or hydrated calcium aluminates (CSH and CAH) can be formed. On the whole, the formation of these compounds leads to an increase in the soil mechanical properties (e.g. Brandl 1981; Bell 1996).

Despite the extensive use of lime in earthworks, several questions subsist on the long term performance of lime-treated since few studies were conducted on this specific subject (e.g. Thompson and Demsey 1969; Petry and Wohlgemuth 1989; Guney *et al.* 2007). One aspect concerns the case of earth structure in permanent contact with free water, i.e. dams, river levees, etc. Different questions rise up when considering the use of lime-treated soils for the construction of such structures especially the impacts of long term water contact on the durability of the mechanical improvements brought by lime due to the possible dissolution of cementitious compounds and portlandite. Such effect has been evidenced on cement pastes (e.g. Revertegat *et al.* 1992). Moreover, it is likely that such processes could induce at long term variations in the soil permeability, parameter being of prime importance since hydraulic earth structures are meant to retain water. In this context, De Bel *et al.* (2005) subjected a lime-treated silt to water leaching. Their results indicate that long term water circulation could be detrimental to the long term performance of hydraulic earth structures since the unconfined compression of lime-treated specimens significantly decreased during percolation. Part of this decrease can be explained by the leaching of large amounts of calcium coming from the decalcification of the cementitious compounds. Besides, the authors mentioned that strength loss, as well as calcium leaching, seem to be minimized by increasing the curing time because of a better crystallization of the cementitious compounds. McCallister (1990) and McCallister and Petry (1992) studied the effect of leaching on lime-treated plastic clays compacted under different compaction moisture contents (dry of optimum, at the optimum and wet of the optimum). They also evidenced that leaching leads to a decrease in soil strength by 15.1 % to 86 % depending on the soil nature and lime content; and that this strength decrease could be slowed down by adding large amounts of lime. These authors further showed that specimens compacted dry of optimum exhibited the largest strength decrease and the highest permeability whereas specimens compacted wet of optimum exhibited, on the contrary, the lowest strength decrease and the lowest permeability. In addition, the permeability of lime-treated soil slightly decreased with the time of percolation possibly due to the precipitation of increasing cementitious compounds. Based on these observations, it can be hypothesized that the durability of lime-treated soil depends on the quantity of water circulating within the soil structure. In this regard, lime-treated soils presenting low permeabilities should be favoured to those presenting high permeabilities when seeking for long-life hydraulic earth structures.

According to several authors (Ranganatham 1961; Nalbantoglu and Tuncer 2001; Rajasekaran and Rao 2002), adding lime induces, for a given compaction energy, an increase in soil permeability due to a decrease of soil dry density. However, other authors (El-Rawi and Awad 1981; McCallister and Petry 1992) evidenced that the moisture content could have also significant effects on the permeability of lime-treated soils. In fact, they found that the permeability of specimens compacted dry of optimum or at the optimum was higher than that of the untreated soil by about one order of magnitude, whereas the permeability of specimens compacted wet of optimum was of the same order of magnitude as that of the untreated soil. Other authors (Brandl 1981; McCallister and Petry 1992) showed that the permeability of lime treated specimens is also related to the amount of lime added: the permeability of lime-treated soils increases with lime content until a certain value corresponding to the lime modification optimum of the soil (LMO), the LMO being the minimal amount of lime required to promote pozzolanic reactions at long term (Hilt and Davidson 1960; Eades and Grim 1966). According to these authors, at this specific lime content, the permeability reaches a maximum, and, begins to slowly decrease for higher lime contents due to the precipitation of cementitious compounds blocking the flow channels and reducing the water flow. Based on these observations, it appears difficult to establish a general framework to predict the permeability of lime-treated soil, and hence, the impact of initial state (i.e. compaction conditions, lime content, curing) on the durability.

Nevertheless, it can be assumed that the study of the impact of lime on the soil texture could, as in the case of untreated soils, help to provide a general framework to predict the initial permeability of lime treated soils. According to Garcia-Bengochea *et al.* (1979), the permeability of untreated soils is highly correlated to their soil fabric. Untreated specimens compacted dry of the optimum show a bimodal pore size distribution with large pores entailing high permeability. As the compaction moisture content is increasing towards the optimum, the radius of large pore decreases which results in a decrease of soil permeability. In addition, beyond a specific moisture content, the soil fabric becomes homogenous, only one class of microspores remains present and the permeability of the soil becomes lower than that at optimum. Garcia-Bengochea *et al.* (1979) further evidenced that the porous network geometry could control the permeability of the soil. On the basis of these observations, it appears necessary to investigate the effect of lime addition on the compacted lime-treated soil fabric and porous network in order to provide, as for untreated specimens, an approach allowing the prediction of the initial permeability of lime-treated soil. Several researches have been conducted on the microtexture of lime-treated soils (Wild *et al.* 1986; Choquette *et al.*

1987; Locat *et al.* 1996; Rajasekaran and Rao 1999, Cuisinier *et al.* 2008). Most of these studies only describe the soil microstructure using scanning electron microscopy, which does not allow the quantification of the changes brought by lime. Besides, lack of information appears in the literature to conclude on the impact of the initial state on the microstructure of lime-treated soils. Moreover, most of the studies were conducted on plastic soils and on high water content soils, these results being difficult to extrapolate on compacted silty soils used in earthworks.

In this context, the present work aims at determining the relationship between the initial state of a lime-treated silty soil and its microtextural and hydraulic behaviour before and after long-term water circulation. The impacts of the initial compaction conditions, curing and lime content on the microstructure of the lime-treated silty soil are first investigated. Then, the modifications of both permeability and microstructure after leaching are considered. It is expected that these investigations would give insights into the evaluation of the long term behaviour and the durability of lime-treated soils used in the construction of hydraulic earth structure. Moreover, another objective is to specify the initial conditions that should be promoted to obtain long-life lime-treated hydraulic earth structures.

2. Materials

2.1 Materials characteristics

The soil used in this study is a silty soil sampled nearby Jossigny village, east Paris, France. It is commonly called Jossigny silt. After sampling, the soil was first air dried at ambient temperature (20 ± 5 C) for three days. It was then grinded and sieved at 2 mm and finally homogenized. The main identification properties of the prepared soil are given in Table 1. The mineralogical composition of the untreated soil was evaluated using X-ray diffraction. The results showed that the soil is mainly composed of quartz and feldspar, its clay fraction being composed of illite and kaolinite with a significant amount of interstratified illite and smectite minerals.

The lime used in this study is an industrial quicklime containing 90.4 % of free calcium oxide. The lime modification optimum of the soil was determined using the ASTM standard D 6276 and was found equal to 1 % of lime. Two different lime contents were considered in this study: the first one was chosen equal to the LMO of the soil, 1 % of lime; a higher one, 3 % of lime, was also chosen so as to assess the impact of a high lime content on the soil durability.

Table 1. Main geotechnical and physico-chemical properties of the Jossigny loam.

Geotechnical properties	
Liquid limit, w_L (%)	37.0
Plastic limit, w_P (%)	18.7
Plasticity index, I_p (%)	18.3
Soil density, ρ_s (Mg.m^{-3})	2.69
Clay fraction, $< 2 \mu\text{m}$ (%)	29.4
Physico-chemical properties	
Soil pH	8.0
Cation exchange capacity (meq/100g)	15.1
Carbonates content, (%)	1.30
Lime modification optimum, LMO (% of lime)	1.0

2.2 Specimens preparation

The powder soil was first mixed with distilled water in order to reach the desired moisture content and was thereafter sealed in a plastic bag for at least 48 h for homogenisation of moisture content. Then, the moist soil and the lime were thoroughly mixed and dynamically compacted one hour after mixing. The compaction was performed directly in cylinder moulds of 100 mm height and 50 mm diameter using a mini Proctor compaction device similar to that used by Ferber *et al.* (2008). The compaction was carried out in 10 layers so as to ensure a homogenous compaction within the specimens.

Untreated specimens were compacted at their optimum Proctor (optimum moisture content, $\text{OMC} = 17\%$ and dry density of 1.760 Mg.m^{-3}). However, it appeared after verification that the moisture content really reached was lower by 1 % to that of the optimum moisture content, i.e. 16 % instead of 17 %. In the case of lime-treated specimens, different compactions conditions were tested so as to specify their impact on the soil texture and permeability. Three different moisture contents were considered in order to describe the soil behaviour in various compaction states. In fact, apart the optimum moisture content of each material (i.e. soil treated at 1 % of lime, $\text{OMC} = 21\%$, soil treated at 3 % of lime, $\text{OMC} = 23\%$), two other moisture contents were chosen, respectively 3 % above (wet side of the Proctor curve, termed WMC) and below (dry side of the Proctor curve, termed DMC) the optimum moisture content of each mixture. Three different compaction energies were also considered so as to specify the impact of density on the behaviour of lime-treated soil. Apart the normal Proctor compaction energy, termed NE, a low compaction energy corresponding to 50 % of

NE, termed LE, and a high compaction energy corresponding to 150 % of NE, termed HE, were chosen.

After compaction, specimens were sealed using both cellophane film and wax so as to protect their moisture contents. Compacted specimens were then left in cure at ambient laboratory temperature ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) for periods varying from 0 to 25 days. Figure 1 illustrates the different compaction characteristics reached by lime-treated specimens after 25 days of curing when compacted under the different compaction conditions. It can be noted that the dry density largely varies with compaction energy for specimens compacted dry of optimum and that the impact of compaction energy decreases as moisture content increases. Table 2 provides the compaction characteristics of lime-treated specimens subjected to shorter curing time and compacted under their optimum moisture content and under normal Proctor energy.

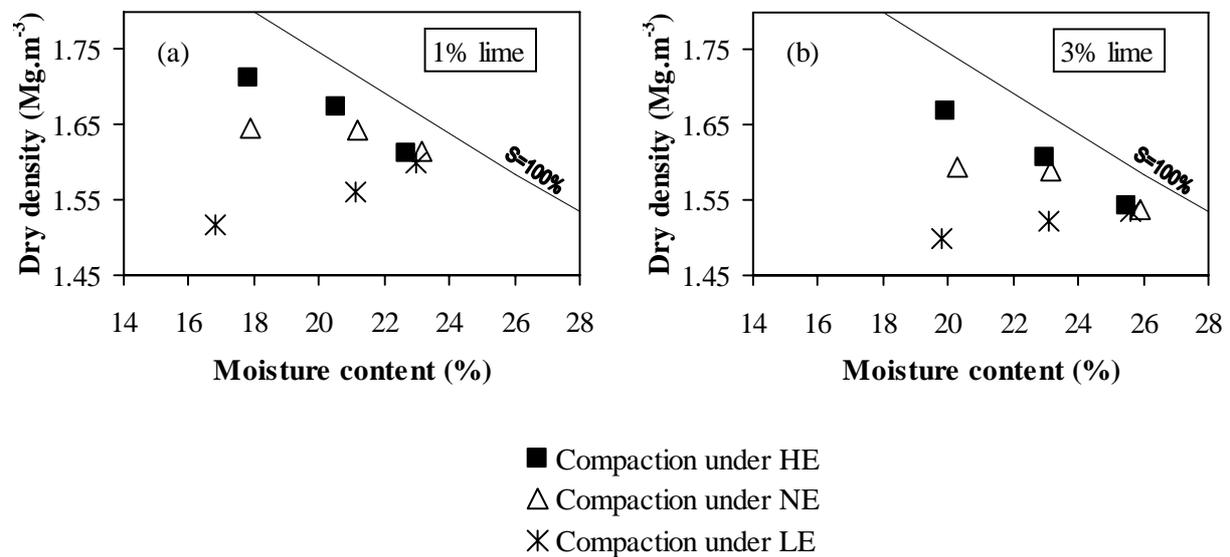


Figure 1. Characteristics of lime-treated specimens according to different compaction conditions after 25 days of curing: (a) specimens treated at 1 % of lime, (b) specimens treated at 3 % of lime.

Table 2. Characteristics of lime-treated specimens compacted at their optimum moisture content and under normal Proctor energy for different curing times.

Specimens treated at 1 % of lime			Specimens treated at 3 % of lime		
Curing time (days)	w_i (%)	ρ_d (Mg.m^{-3})	Curing time (days)	w_i (%)	ρ_d (Mg.m^{-3})
0	21.0	1.663	0	23.1	1.602
7	21.7	1.643	7	23.4	1.591
15	21.4	1.646	15	23.5	1.584
25	21.2	1.642	25	23.2	1.596

3. Experimental procedure

3.1 Percolation equipment and conditions

The impact of water circulations at long term on both soil fabric and permeability were studied using special percolation equipment. Twelve cells, similar to flexible wall permeameters, were designed: each being constituted by two aluminium plates of 100 mm diameter and a plexiglas cylinder of 52 mm diameter and 120 mm height. Compacted specimens were leached for time periods ranging from 110 days to 160 days at a constant temperature of 20°C. The percolation was conducted *per ascensum*. Distilled water was chosen as leaching fluid. The leaching tests were performed under a constant hydraulic head of 8 m. A constant confining cell pressure of 120 kPa was applied. The leachates were collected into plastic bottles as water passed through the specimens. Permeability of the specimens was determined based on the Darcy's law from the quantity of water collected for a given time of percolation.

According to the percolation procedure used in this study, it is estimated that 200 days of percolation represents a rainfall period of 11.5 years in France (based on an annual mean rainfall infiltration of 300 L.m⁻²).

3.2 Microtextural tests

Mercury intrusion porosimetry (MIP) was used to examine the evolution of the fabric of lime-treated soils compacted under different initial states. According to the Washburn's equation (1) used in MIP tests, the entrance radius of a pore space that can be penetrated by mercury is inversely proportional to the applied pressure. As a result, the MIP test consists of forcing the intrusion of mercury in a dry porous media by increasing mercury pressure so as to obtain a description of its porous network.

$$[1] \quad r = \frac{2 \sigma \cos \theta}{P}$$

where r is the pore radius, σ the surface tension of the liquid (0.48 N.m⁻¹ for mercury), θ the solid/liquid contact angle (about 140° for mercury and soils), and P applied pressure (Pa).

MIP test must be carried out on dry samples. The freeze-drying method was chosen as it limits shrinkage due to the departure of water compared to more traditional method such as oven drying (e.g. Delage and Pellerin 1984). Fragments of chosen compacted soil specimens (~ 1 g) were quick-frozen using liquid nitrogen in depression (temperature of -210°C). Soil samples were then lyophilised. Samples dry densities were calculated from the volume of mercury intruded in the soil specimens and compared to that after compaction. It was found that the differences between the two dry densities remained less than 0.05 Mg.m^{-3} . These differences show that the specimen porosity was not totally measured with MIP test because the range of pressure used allowed only the identification of the pores with entrance radius varying from $0.003 \mu\text{m}$ and $250 \mu\text{m}$.

Note also that for each initial state considered in this study, two samples taken from two different compacted soil specimens were considered so as to evaluate the repeatability of the tests.

3.3 Physico-chemical analysis

Carbonates contents and available lime contents were determined at different curing and leaching times. Carbonates contents were determined using the “Dietrich-Frühling” calcimeter which is based on the measurement of CO_2 volume emitted by acid reacting with the powdered soil. The method used to determine the available lime contents of the soil (i.e. lime either in the form of portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, and calcium oxide, CaO) is based on the Leduc method. It consists in solubilizing lime by reaction with sugar to form calcium sucrate which is then titrated using a standard acid and a solution of 1/3 bromocresol green and 2/3 phenolphthalein as indicator. The acid solution used in this study was a 0.1 N hydrochloric acid solution.

Porewater calcium concentration after 25-day curing was estimated by the measurement of the calcium concentration of a solution after 24-hour immersion of soil samples cured 25 days and treated with 1 % or 3 % of lime (liquid to solid ratio of 10). Leachates calcium concentrations were measured using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) at different times of percolation. Specimens porewater calcium were also estimated at different leaching times on the basis that the leachate calcium concentration recorded at a given time of percolation is equivalent to the mean porewater calcium concentration within the soil specimen. This assumption suggests that the porewater calcium concentration represents less than 0.006 % of the calcium initially present. As a

result, porewater calcium concentrations during leaching were considered as negligible. Besides, based on the quantity of calcium present in the soil specimens after the addition of lime, it was possible to determine the part of calcium contained in cementitious compounds formed in the soil.

4. Lime-treated soil fabric

4.1 Effect of the addition of lime

Figure 2 provides the MIP results obtained for untreated and treated specimens compacted at their respective optimum moisture content (OMC) under the normal Proctor compaction energy (NE) just after compaction. Samples were trimmed from the compacted specimens. The results are presented as cumulative mercury intrusion curves, but also as pore size density function curves (i.e. derivatives of the cumulative mercury intrusion curves). It can be observed that the total volume of mercury intruded is less significant in untreated specimens than in lime-treated specimens. This can be explained by the lower dry densities of the treated specimens than that of the untreated specimens (Figure 1). Two distinct pores families are identified in untreated specimens, the first being centered at 2 μm and the second at 0.4 μm . This bimodal porosity is unusual for such specimens. In fact, according to Delage *et al.* (1996), untreated specimens compacted at OMC or WMC under NE only show a single porosity, whereas untreated specimens compacted at DMC under NE show a bimodal porosity. However, this result could be explained by the fact that the compaction moisture content reached for untreated specimens was in fact slightly below than that of the OMC (around 16 % instead of 17 %). The main differences between the fabric of untreated and lime-treated specimens occur for entrance pore radius comprised between 0.01 and 0.2 μm . Lime-treated specimens present a large pore family at 0.05 μm that is not present in the untreated soil. Cuisinier *et al.* (2008) who have been working on a compacted silty soil also evidenced that the addition of lime led to an increase in the amount of pores comprise between 0.01 and 0.3 μm . The study of Bin *et al.* (2007) on the microstructure of clayey soils using nitrogen adsorption and desorption tests, showed that the addition of lime leads to an increase in the amount of pores with a diameter above 200 Å. They also evidenced that this increase was related to a reduction in the amount of pores lower than 30 Å. These modifications of the soil fabric may be related to the flocculation process brought by lime.

It can be concluded that the difference in dry density between the untreated and lime-treated compacted soils under a given moisture content and energy arises from a dramatic

modification of the soil micropores (entrance pore radius below 1 μm). This phenomenon may be associated to the flocculation process of the soil particles consequently to the addition of lime. It should also be noted that the amount of lime added did not influence significantly the amount of micropores between 0.01 μm and 0.2 μm . This may be related to the fact that both lime contents used are not so different and relatively close to the LMO of the soil.

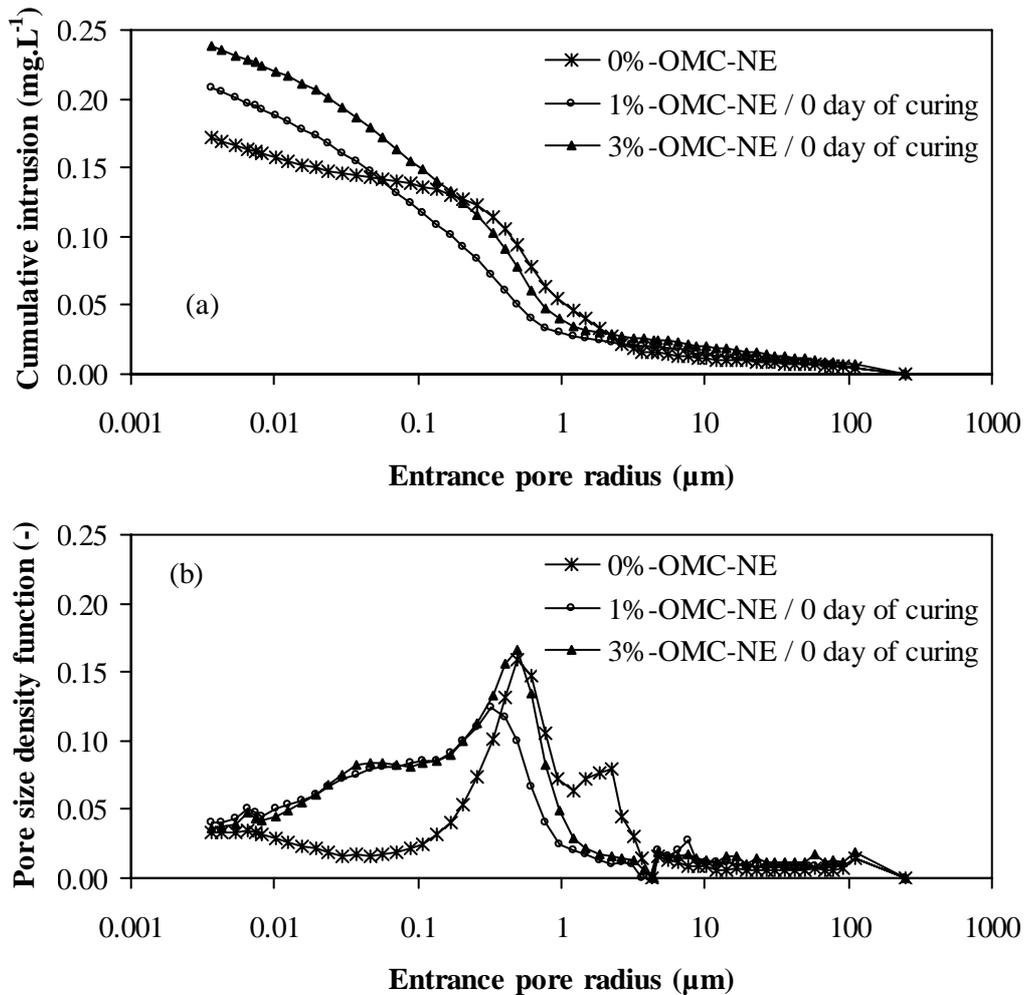


Figure 2. Microstructure of untreated specimens and of specimens treated at both at 1 % and 3 % of lime just after the addition of lime: (a) cumulative intrusion curves and (b) pore size density function.

4.2 Effect of curing time

Figure 3 gives the MIP results obtained for different curing times (0, 7, 15 and 25 days) for specimens treated respectively with 1 % of lime and 3 % of lime. For each lime contents, four samples were taken for MIP tests from a compacted specimen at different time of curing. Besides, in order to evaluate the repeatability of the experiments, another sample

was taken from a different compacted soil specimen after 25 day-curing. The specimens prepared to check repeatability are quoted –b in Figure 3.

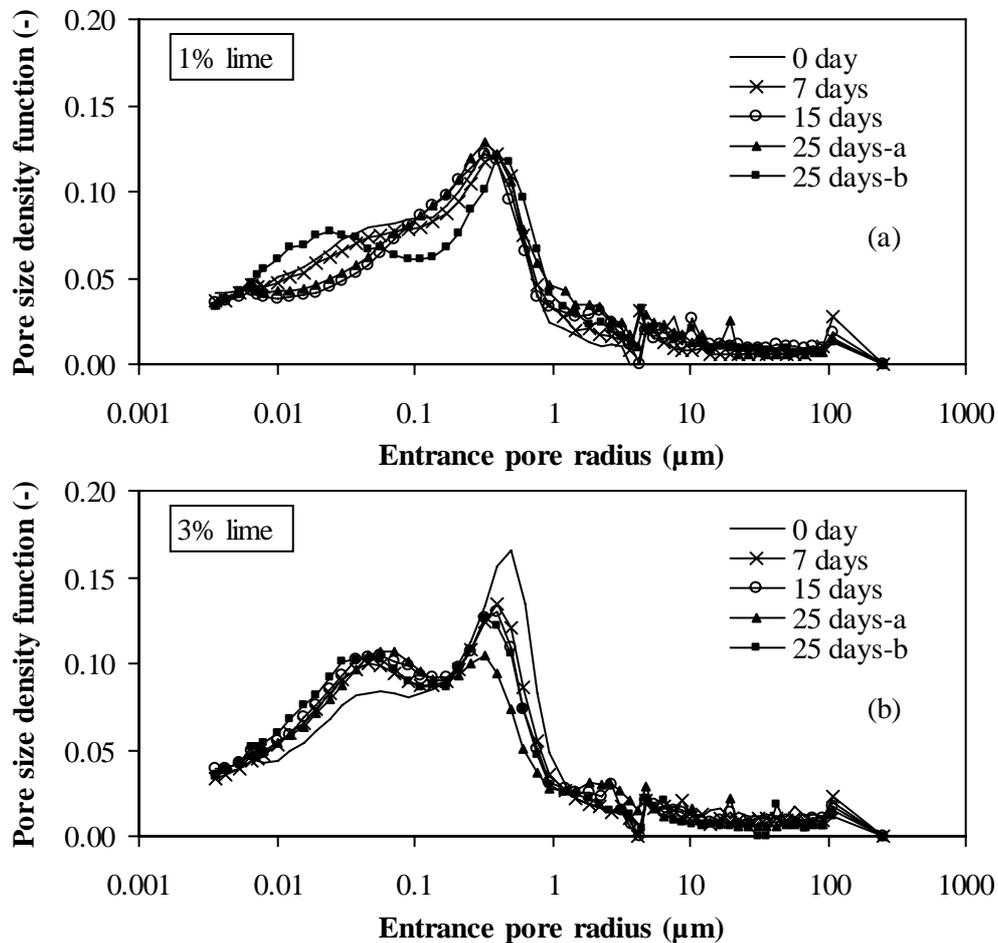


Figure 3. Microstructure of specimens treated at (a) 1 % and (b) 3 % of lime compacted under normal Proctor energy at their optimum moisture content after different curing times (0, 7, 15 and 25 days).

It can be noted that the curing time has only limited influence on the fabric of the soils treated at 1 % or 3 % of lime. In the case of specimens treated with 3 % of lime, it can be observed that a short curing time of 7 days leads to a decrease in the amount of pores between 0.1 and 1 μm and to an increase of the amount of pores between 0.01 and 0.1 μm, this phenomenon being slightly enhanced as curing was prolonged. The evolution of the speciation of calcium within the soil specimens during curing (Figure 4) helps to interpret these results. A significant increase was noted in the carbonates content of lime-treated soils after one-day curing. However, passed this period, their carbonates content remained constant during the rest of curing. It was also evidenced from the amount of cementitious compounds formed

after 25-day curing that the 1 % lime-treated specimens were less reactive than the 3 % lime-treated specimens. It can thus be deduced from these results that the decrease of the amount of pores between 0.1 and 1 μm observed for specimens treated at 3 % of lime during curing could be related to the formation of carbonates and the increasing amount of cementitious compounds. In the case of specimens treated at 1 % of lime, the variations in the soil fabric modification induced by curing (pore size density curves after 25-day curing, Figure 3) suggest that an addition of lime at the LMO content (1 % of lime) was probably not sufficient to enable pozzolanic reactions in all cases. Eades and Grim (1966) as well as Little (1995) also observed that cementitious compounds could not well develop for lime contents below or equal to the LMO. The smaller amount of cementitious compounds formed after 25-day curing and the smaller increase of carbonates content in the case of 1 % of lime may explain the relative stability of their soil fabric during curing.

Finally, when considering the changes noted with curing time to those observed for different lime-treated soil specimens after 25 day-curing, it can be concluded that curing had little influence on the fabric of the Jossigny silt treated with lime.

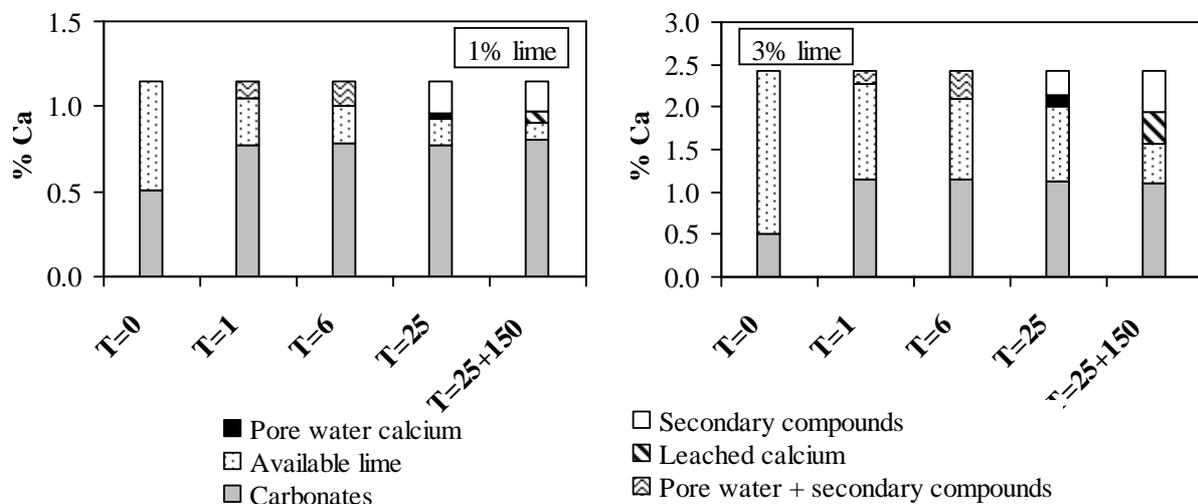


Figure 4. Evolution of the speciation of calcium contained in the specimens treated at 1 % and 3 % of lime during curing and after 150 days of leaching (BT : before treatment, T=0 : lime treatment phase, T=1, 6, and 25 : after 1, 6 and 25 days of curing, T=25+150 : after 25 days of curing and 150 days of leaching).

4.3 Effect of compaction conditions on the soil fabric

Only specimens after 25-day curing are considered to analyse the effect of compaction conditions. Figure 5 illustrates the effect of the compaction moisture content on the

microstructure at 1 % (Figure 5a) and at 3 % of lime (Figure 5b) under NE. Specimens treated at 1 % of lime and compacted dry of optimum exhibit a family of macropores between 1 and 7 μm . However, this family of macropores disappears as the compaction moisture content increases. In the same time, the amount of pores between 0.1 and 1 μm increases. In addition, it can be noted that the flocculation induced by the addition of lime seems to be decreased for specimens compacted dry of their optimum since their amount of pores between 0.01 and 0.2 μm is smaller compared to that showed by specimens compacted at higher moisture contents. In the case of 3 % of lime, compaction moisture content does not affect the pores classes, but rather the quantity of pores within each class. In fact, the amount of pores within the two pores families (respectively at 0.05 μm and 0.4 μm) increased with the moisture content. This increase may be related to the raise in the porous volume induced by the decrease in the soil dry densities observed as moisture content increases (Figure. 1).

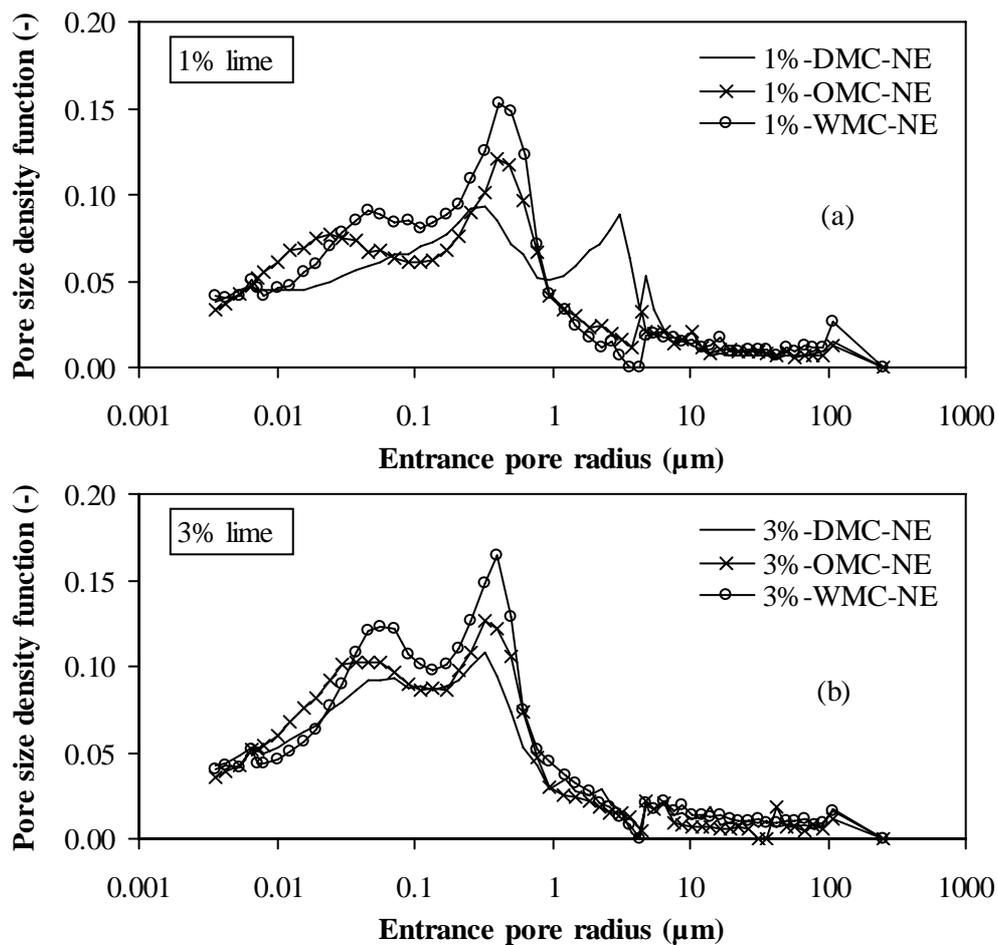


Figure 5. Pore size density function curves of specimens treated at (a) 1 % and (b) 3 % of lime compacted under normal Proctor energy (LE) and at different moisture contents (DMC, OMC, WMC).

Figure 6 presents the effect of compaction energy on the fabric of specimens treated both at 1 % (Figure 6a) and 3 % of lime (Figure 6b) and compacted dry of optimum. It can be noted that all the specimens treated at 1 % of lime present a bimodal porosity. However, their pore size distribution slightly differs according to the compaction energy applied. Compaction energy does not seem to have a significant effect on the pores smaller than 1 μm , but seems to affect sensitively the pores families above 1 μm : their mean pore entrance radius is shifting towards smaller entrance radius, and the amounts of pores within these families decrease as the compaction energy is increased. In the case of specimens treated at 3 % of lime, only undercompacted specimens show a bimodal porosity with a family of pores at 12 μm . Specimens compacted under NE and HE present an unimodal porosity and their pore size distributions are similar: this is somehow opposed to the large differences noted in their dry densities (Figure 1). Nevertheless, this similarity in their fabrics could be explained by the fact that MIP may have been conducted on a more compacted or less compacted part of the soil specimens, thus resulting in very close dry densities and hence soil fabrics.

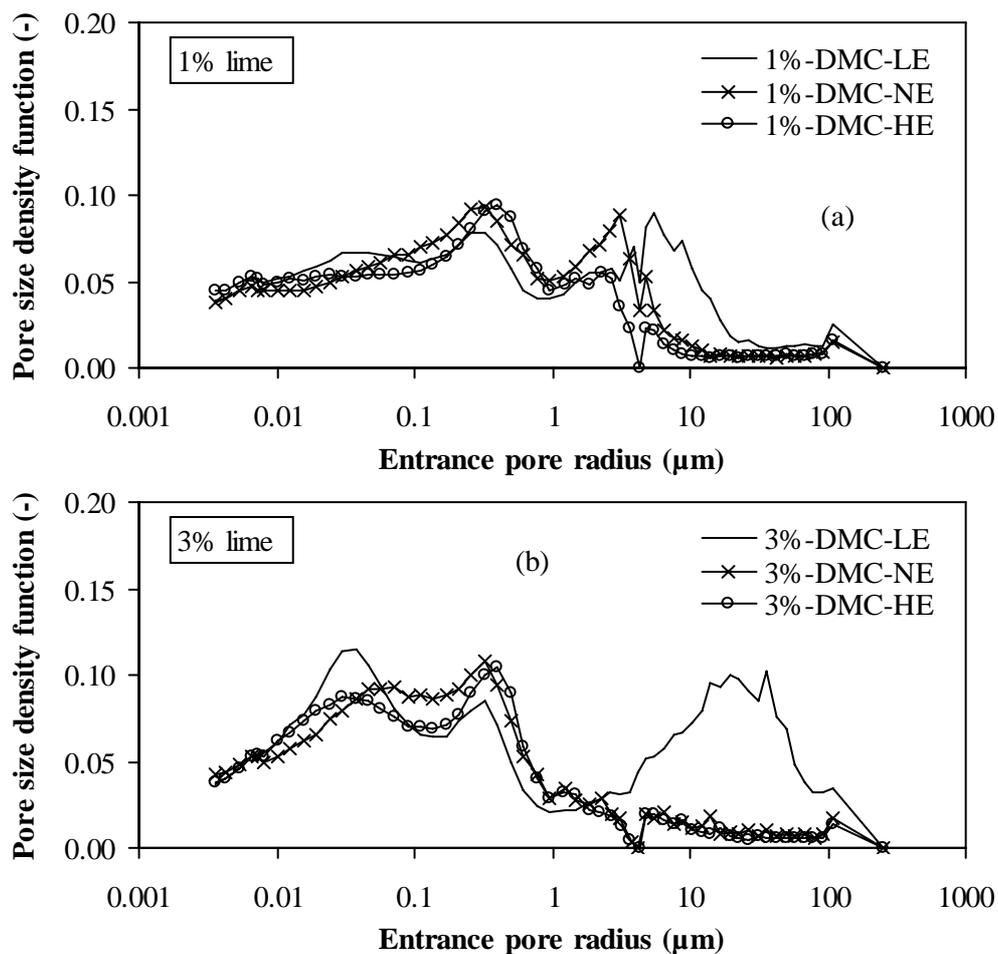


Figure 6. Pore size density function curves of specimens treated at (a) 1 % and (b) 3 % of lime compacted dry of their optimum moisture content (DMC) under different energy (LE, NE, HE).

Figure 7 presents the effect of compaction energy on the fabric of specimens treated at 1 % and 3 % of lime and compacted under their optimum moisture content. It can be noticed, as when compacted dry of their optimum, that the fabric of the specimens treated at 1 % of lime also changes following the compaction energy applied, but in a lesser manner. The MIP results recorded for the specimens treated at 3 % of lime and compacted at OMC suggest that the compaction energy have no effect on pores below 1 μm , and a negligible effect on pores larger than 1 μm .

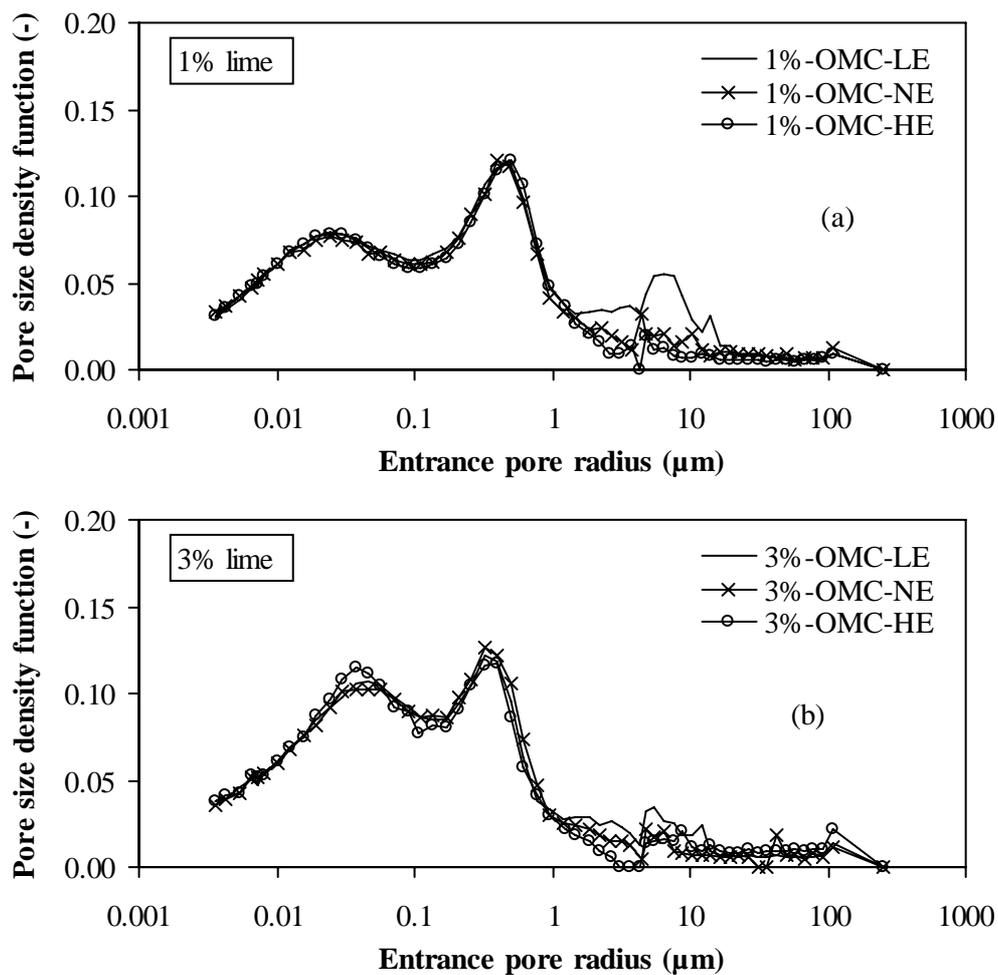


Figure 7. Pore size density function curves recorded for specimens treated at (a) 1 % and (b) 3 % of lime compacted at their optimum moisture content (OMC) under different energy (LE, NE, HE).

Figure 8 presents the effect of compaction energy for the specimens treated at 1 % and 3 % of lime and compacted wet of their optimum moisture content. It can be noticed that the fabrics at both 1 % and 3 % of lime remain almost the same whatever the compaction energy applied, suggesting that neither large and small pores of lime-treated specimens compacted at a moisture content wet of optimum are sensitive to the compaction energy applied.

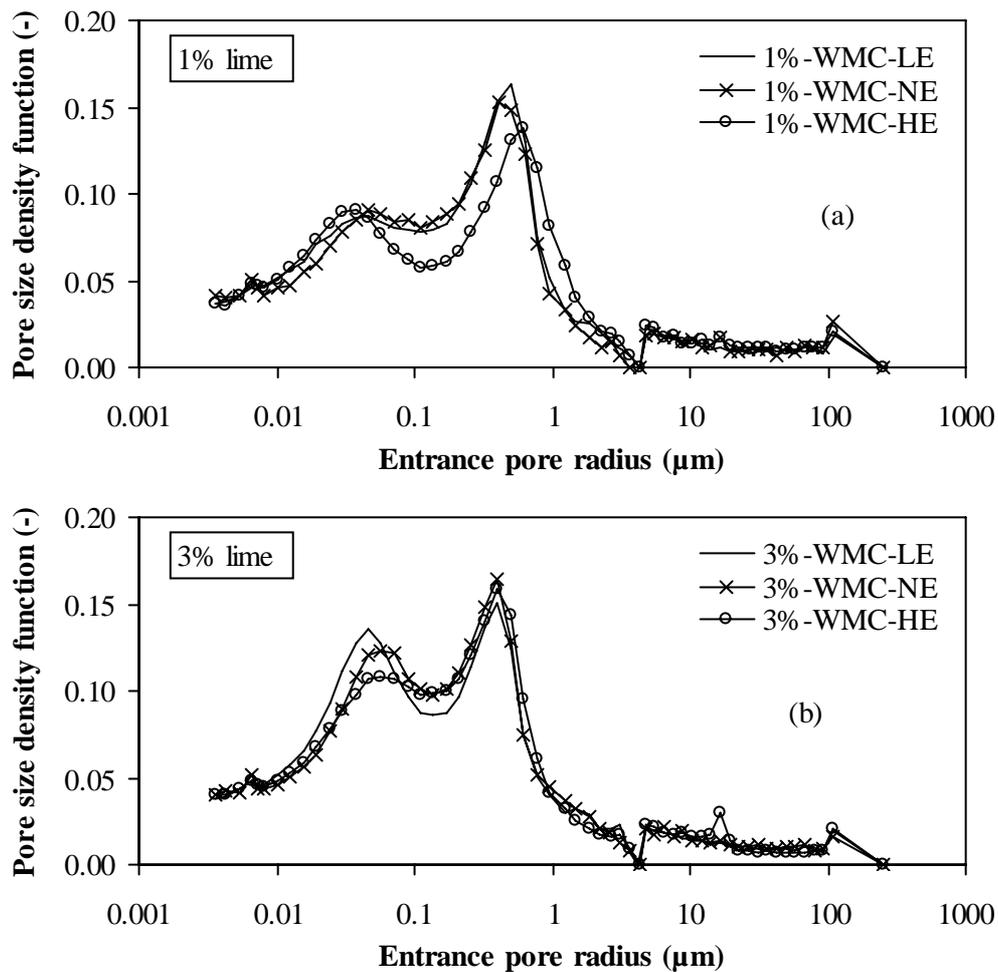


Figure 8. Pore size density function curves recorded for specimens treated at (a) 1 % and (b) 3 % of lime compacted wet of their optimum moisture content (WMC) under different energy (LE, NE, HE).

The MIP results obtained on the specimens treated at 1 % of lime and compacted under normal Proctor energy suggest that their fabric is a function of the compaction moisture content (Figure 5). The families of large pores are shifting towards the left as the compaction moisture content increases, indicating that their fabric becomes more and more closed as the compaction moisture content increases. The MIP results recorded for specimens treated at 1 % of lime further show that their fabric changes for a given moisture content with the compaction energy (Figures 6, 7 and 8). The results indicate that the fabric of specimens compacted dry of optimum and at optimum is changing towards a more closed texture as the compaction energy is increased. However, this is not true for specimens compacted wet of the optimum, suggesting that once a certain moisture content is reached the soil fabric of specimens becomes more homogenous and less sensitive to compaction conditions. The same

type of observations can be made in the case of the specimens treated at 3 % of lime. However, it can be noticed that they are less sensitive to the change in compaction conditions. This could be explained by their initial fabric that is somehow more homogenous than that of the specimens treated at 1 % of lime, since they have a higher initial moisture content.

4.4 Summary

The main observation presented in this section can be summarized as follows: i) The addition of lime leads, under a given compaction energy, to a decrease in soil dry density which is associated to a modification of the soil fabric with the formation of a small class of pores between 0.01 and 0.2 μm . This phenomenon may be explained by the flocculation process induced by the addition of lime. ii) Curing leads, according to the lime content used, to a slight increase in the amount of pores below 0.1 μm probably caused by the precipitation of both carbonates and cementitious compounds. iii) The amount of micropores contained in the lime-treated soil (pores between 0.01 and 0.2 μm) seems to be sensitive to the compaction moisture content. However, it does not seem to be affected by the compaction energy. In fact compaction on the dry side of the optimum seems to reduce the amount of pores formed from the flocculation process.

5. Relationship between the fabric and permeability of lime treated soils under long term leaching

Two different aspects are investigated in this section so as to analyse the relationship between the initial state of lime-treated silty soils, their microtextural and hydraulic behaviour before and after long term water circulations. Two extreme initial states were considered in this study: i) the effect of under compaction (i.e. OMC-LE) and ii) the effect of high moisture content (i.e. WMC-NE) which appears of prime importance since most of lime-treated soils present, in practice, high initial moisture content.

After compaction, each specimen was cured for 25 days at constant moisture content and temperature (20°C) before the start of the water circulation. After between 110 day and 150 day percolation, several soil samples of about 1 g were trimmed from the leached specimens. Part of the samples was used for the physico-chemical analyses, the other part were freeze-dried for the MIP investigations.

5.1 Impact of initial state on permeability

The initial permeability of each specimen was determined using the data recorded after 7-day leaching. The saturation was considered achieved after this circulation period. Several replicates specimens were available for each combination of initial conditions. Table 3 provides the variation ranges of the sample initial permeabilities determined on the different specimens used with regards to their compaction initial states after 25-day curing. One can note that the initial permeability of the specimens treated at 1 % of lime and compacted at optimum under normal Proctor energy largely varies which is not the case of the other specimens. These large variations could be explained by the variations noted in the soil fabric of these specimens after 25-day curing (Figure 3).

Table 3. Initial permeabilities of untreated and lime-treated soils subjected to leaching.

Compaction conditions	Initial permeability, k_i ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
0%-OMC-NE	$7.5 \times 10^{-10} < k_i < 1.0 \times 10^{-9}$
1%-OMC-LE	$1.3 \times 10^{-8} < k_i < 1.9 \times 10^{-8}$
1%-OMC-NE	$7.1 \times 10^{-10} < k_i < 7.4 \times 10^{-9}$
1%-WMC-NE	$2.5 \times 10^{-10} < k_i < 3.3 \times 10^{-10}$
3%-OMC-LE	$1.9 \times 10^{-8} < k_i < 2.4 \times 10^{-8}$
3%-OMC-NE	$1.2 \times 10^{-9} < k_i < 1.7 \times 10^{-9}$
3%-WMC-NE	$4.5 \times 10^{-10} < k_i < 5.0 \times 10^{-10}$

The results obtained on the specimens compacted at their optimum moisture content and under normal Proctor energy can be compared. Despite the differences between the dry densities of the untreated specimens ($1.76 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$) and of the specimens treated at 3 % of lime ($1.59 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$), their initial permeabilities remain in the same order of magnitude. Hence, the differences in dry densities induced by the amount of lime added (Figure 1) seem to have only a small impact on the soil initial permeability. The following assumption may be put forward to explain this observation. It is generally accepted that permeability is rather controlled by the larger pores than by the amount of pores within the soil specimen. The microtextural changes induced by the addition of lime concern mainly small pores, i.e. the pores smaller than $1 \mu\text{m}$, and the macroporosity of all specimens remains more or less the same: this may thus explain that the fact that the initial permeability recorded for these specimens is similar for a given modality.

Secondly, the impact of the compaction moisture content can be assessed. It appeared that the higher the moisture content, the lowest the initial permeability of the specimens. The

compaction energy also alters the permeability of the soil: the higher the energy, the lower the permeability. These observations can be explained by the soil fabric modifications observed as compaction energy is increased and as compaction moisture content is increased (evidenced by the microtextural investigations Figures 5 to 8).

5.2 Impact of long term water circulations

Experimental results

Figure 9 gives the evolution of the permeability during leaching of specimens treated at 1 % of lime and compacted under different conditions. The results for the untreated specimen compacted at its optimum Proctor are also given for comparison. It can be noticed that the permeability of the specimens remains stable all through the leaching period excepted in the case of undercompacted specimens for which the permeability significantly decreases during the first 20 days of percolations.

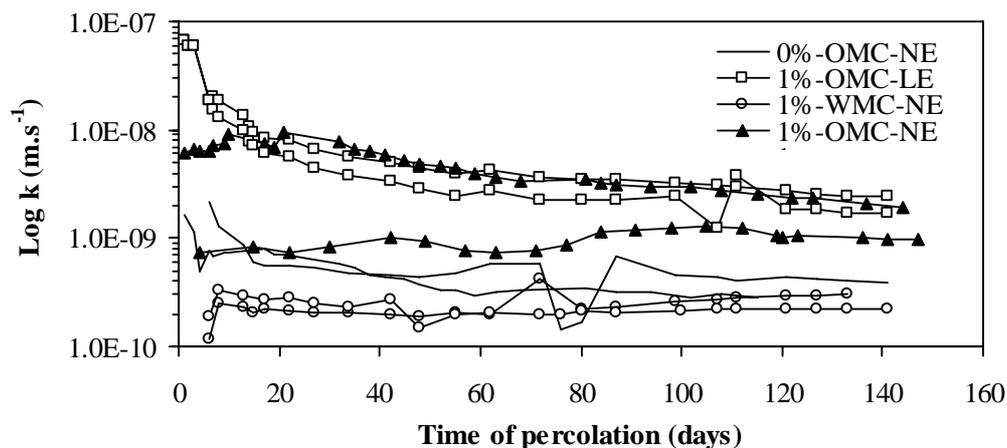


Figure 9. Evolution during percolation of the permeability of specimens treated at 1 % of lime and compacted under different conditions.

The determination of the soil fabric of these samples was carried out after 150-day percolation and is presented in Figure 10 by comparison to the soil fabric obtained before leaching. A small increase can be noticed for all specimens after leaching in the amount of pores between 0.6 and 4 μm at the same time to a small decrease in the amount of pores between 0.05 and 0.6 μm . An additional test was performed to determine whether these changes were related to the leaching process or to the initial saturation of the specimens.

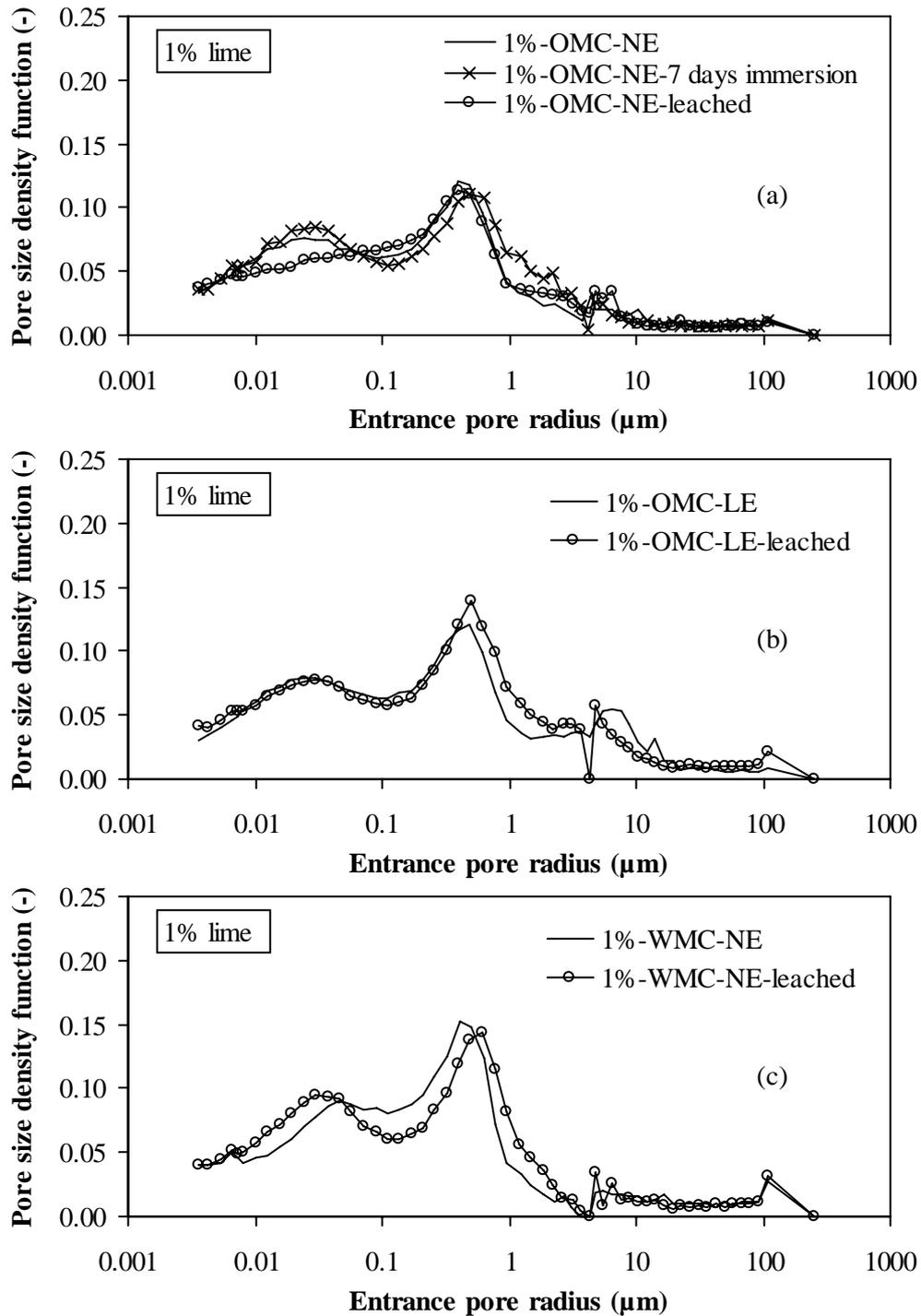


Figure 10. Microstructure of specimens treated at 1 % of lime before leaching after 7 days of water contact, and 150 days of leaching compacted: (a) at optimum moisture content and normal Proctor energy, (b) at optimum moisture content and low energy, (c) wet of their optimum moisture content and normal Proctor energy.

It can be noted in the case of specimens compacted at their optimum moisture content under normal Proctor energy that the changes recorded in soil fabric after 7-day immersion (i.e. time at which specimens were considered saturated) are similar to the changes obtained after

leaching (Figure 10a). It can therefore be concluded from this observation that water circulations are not related to the changes in soil fabric recorded after 150 day-leaching, these being rather caused by the saturation process. Only small effects of the circulations can be evidenced for specimens compacted wet of the optimum: these correspond to a small increase in the amount of pores below 0.05 μm .

Figure 11 gives the evolution of the permeability during leaching of specimens treated at 3 % of lime and compacted under different conditions. The results for the untreated specimen compacted at its optimum Proctor are also presented for comparison. Similar trends to that recorded for specimens treated at 1 % of lime can be observed. In fact, except the permeability of the undercompacted specimens that largely decreases during the first 20 days of leaching, the permeability of the other specimens remains relatively stable during leaching.

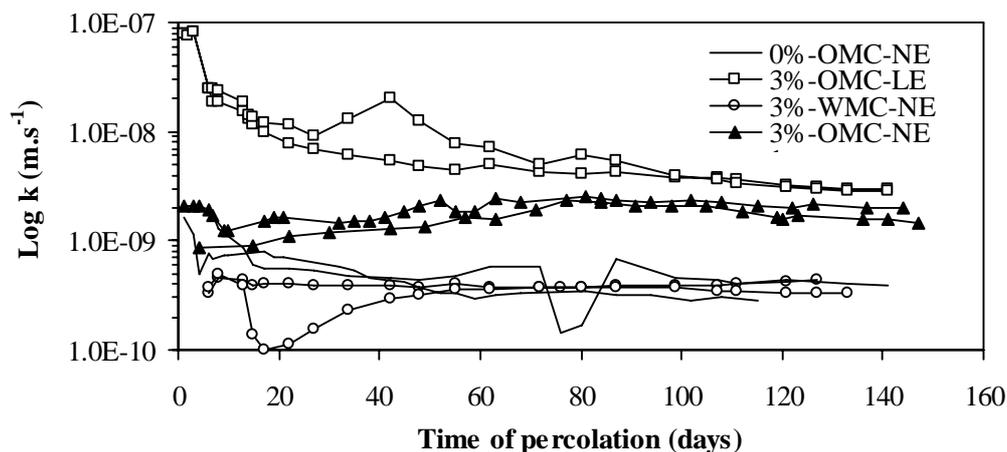


Figure 11. Evolution during percolation of the permeability of specimens treated at 3 % of lime and compacted under different conditions.

Figure 12 provides the evolution of the soil fabric before and after 150-day leaching for specimens treated at 3 % of lime and compacted under the different compaction conditions considered. Similarly to specimens treated at 1 % of lime, a small increase in the amount of pores between 0.6 and 4 μm and a small decrease in the amount of pores between 0.05 and 0.6 μm can be noticed for all specimens after leaching. Based on Figure 12a, these changes can also be explained by the saturation phenomenon process taking place within the first days of leaching. Besides, as in the case of specimens treated at 1 % of lime and compacted wet of the optimum, small increases in the pores below 0.05 μm were recorded for all specimens.

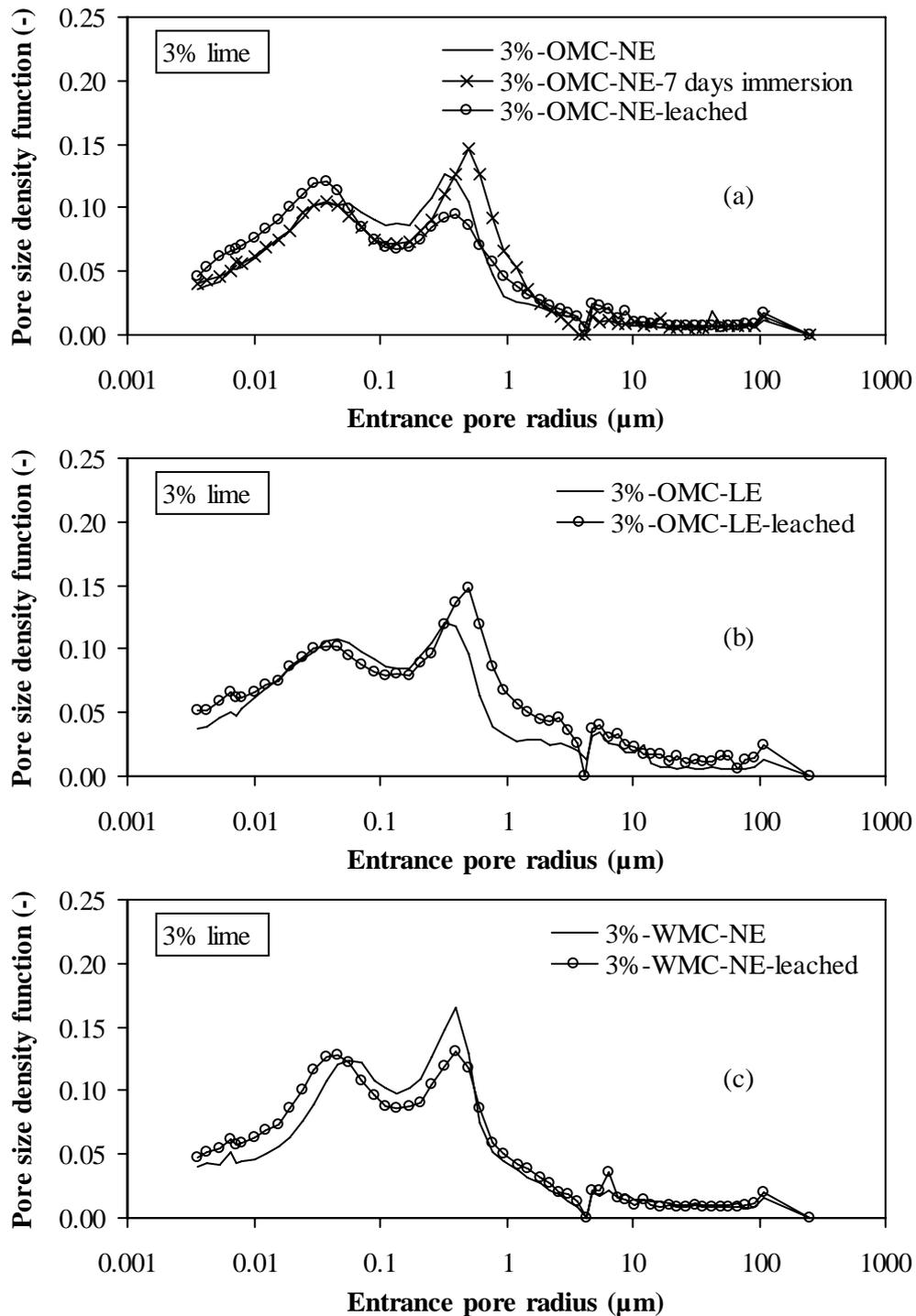


Figure 12. Microstructure of specimens treated at 3 % of lime before and after 150 days of leaching: (a) compacted at their optimum moisture content and normal Proctor energy, (b) compacted at their optimum moisture content and low energy, (c) compacted wet of their optimum moisture content wet of optimum and normal Proctor energy.

Discussion

The physico-chemical investigations performed would help to explain these results. Figure 4 indicates that a significant amount of calcium is being leached for the specimens

treated both at 1 % and 3 % of lime and compacted at their respective optimum Proctor. It can be speculated that the calcium being leached directly results from the dissolution of lime but and portlandite that has precipitated but also from the decalcification of part of the cementitious compounds being formed (as evidenced by Le Runigo *et al.*²). In contrast, the physico-chemical results also suggest that water flow did not prevent the formation of new cementitious compounds: the amount of cementitious compounds remained stable during leaching for the specimens treated at 1 % of lime and compacted at their optimum Proctor, an increase of these compounds even occurred during leaching for the specimens treated at 3 % of lime.

The following hypothesis can be proposed to explain these phenomena. In such porous media, the fluid circulation is mainly concentrated in the biggest pores, i.e. pores above a radius of 0.1 μm for the lime-treated Jossigny silt. It is likely that the dissolution of portlandite and decalcification of cementitious compounds occurred along these “preferential paths” since water flow concentrated in these pores. In the micropores, where water flow is less active, the local physico-chemical conditions could be more favourable to the formation of pozzolanic reactions products, the formation of these cementitious compounds leading, as mentioned previously, to the filling of the micropores and thus to the reduction of their size. The increase in the amount of pores below 0.05 μm recorded for specimens treated at 1 % of lime and compacted on the wet side (Figure 10c) and for all specimens treated at 3 % of lime (Figure 12) may indicate the precipitation of cementation products. As a consequence of these assumptions, it can be hypothesized that the evolution of the permeability with time is not exclusively related as mentioned by McCallister (1990) to the amount of cementitious compounds formed but rather results of a competition between dissolution and precipitation processes. In the case of this study, it can reasonably be concluded from the stability of the cementitious compounds calcium content observed for the specimens treated at 1 % of lime that the precipitation processes are in equilibrium with the dissolution processes induced by the fluid circulation, thus explaining the stability of the permeability. On the contrary, in the case of specimens treated at 3 % of lime, the process of precipitation seems preponderant, suggesting that their permeability should decrease during leaching. However, it remained stable. This may be related to the too small amount of cementitious being formed. The fact that the precipitation process affects small pores rather than large pores which are controlling the permeability may also contribute to this stability. The significant permeability decreases

² Le Runigo, B., Deneele, D., Ferber, V. Cuisiner, O. and Cui, Y.J. Leaching characteristics of a lime-treated silty soil: assessment of the long term behaviour. Submitted June 2008 to Applied Clay Science.

recorded by McCallister and Petry (1992) for three plastic soils during leaching over long term periods (45 and 90 days) indicate that in their case the formation of cementitious compounds may have largely dominated the dissolution process induced by the fluid circulation. This difference of behaviour may be related to the nature of their soils being more plastic and containing more reactive clay minerals to that used in this study and thus being more reactive to lime treatment. One can note that the absence of formation of cementitious compounds in the MIP results obtained for specimens treated at 1 % of lime and compacted at optimum Proctor (Figure 10a) or undercompacted (Figure 10b) may be related to the small amounts of lime added leading to a less homogenous distribution of lime or to too small amounts of cementitious compounds formed. Besides, the increase of the amount of pores below 0.05 μm for specimens treated at 1 % of lime and compacted on the wet side (Figure 10c) suggests that the low permeability showed by these specimens may favour the formation of cementitious compounds.

Finally, different hypothesis can be put forward to explain the behaviour of the samples that exhibited a permeability decrease during the first 20 days of water circulations. In fact, since these specimens show relatively low dry densities (Figure 1), it could be assumed that the decrease of their permeability is either due i) to fines movements since the hydraulic gradient (i.e. $i = 80$) to which the specimens are subjected to is high or ii) to secondary consolidation since specimens are also subjected to confinement (i.e. confining pressure of 120 kPa) over long term periods. However, fines movements are unlikely to appear since lime-treatment is used to limit the erodability of silty soils (Machan *et al.* 1977). Besides, the small modifications recorded in their fabric after leaching (Figures 10b and 12b) are not compatible with a significant secondary consolidation process. Nevertheless, it might be possible that the confinement pressure altered macropores larger than the maximum pore size that can be measured with the porosimeter device used in this study. Further research is necessary to conclude on the veracity of one of these assumptions.

6. Conclusion

The effects of the initial compaction conditions, curing and lime content on the microstructure of the lime-treated Jossigny silt have been investigated. The modifications of both permeability and microstructure after leaching have been examined. The following conclusions can be drawn from the obtained results:

- i. Flocculation process induced by the addition of lime leads to an increase of the amount of small pores that can be related to the decrease in dry density observed for lime-treated soils.
- ii. The fabrics of lime-treated silty soils, as well as their initial permeability, seem to follow the same rules to those of untreated soils when compacted at different compaction conditions. High permeability can be expected when compacting the soil dry of optimum or when under-compacting it. Low permeabilities can be expected when compacting the soil on wet side of optimum or when over-compacting it.
- iii. For a given compaction condition, it appears that the amount of lime has a low effect on the soil permeability, this is in spite of the difference noted in the soil dry density. This result may be due to the fact that the microstructure changes induced by the addition of lime concerns rather the pores below 1 μm than the large pores, these latter controlling the soil permeability.
- iv. It is speculated that the evolution of the permeability of lime-treated soils subjected to leaching results from a competition between dissolution and precipitation processes. It was demonstrated in this study that long term water circulation did not seem to have a significant impact on both soil fabric and permeability.

Finally, it can be concluded from an engineering point of view that a default of compaction could lead to high initial permeability. This may enhance the leaching of large quantity of calcium coming from the decalcification of the cementitious compounds which may probably result in less sustainable structures. On the contrary, it appears that the use of lime-treated soils compacted wet of optimum leads to low initial permeability which may result in more sustainable structures. Besides, the results also suggest promoting the high lime contents (i.e. above the LMO) for the durability of lime-treated soils as addition of lime to the LMO can lead to high permeability.

Acknowledgments

The mercury intrusion porosimetry were conducted at the Ecole des Mines of Nantes. The authors would like to thank Eric Chevrel for his kindness and precious help for the conduction of the mercury intrusion porosimetry.

References

- Bin, S., Zhibin, L., Yi, C., and Xiaoping, Z. 2007. Micropore structure of aggregates in treated soils. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, **19**: 99-105.
- Brandl, H. 1981. Alteration of soil parameters by stabilization with lime. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, **3**: 587-594.
- Choquette, M., Berube, M.A., and Locat, J. 1987. Mineralogical and microtextural changes associated with lime stabilization of marine clays from eastern Canada. *Applied Clay Science*, **2**: 215-232.
- Cuisinier, O., Masrouri, F., Pelletier, M., Villiéras, F. and Mosser-Ruck, R. 2008. Microstructure of a compacted soil submitted to an alkaline plume. *Applied clay science*, **40**: 159-170.
- De Bel, R., Bollens, Q., Duvigneaud, P.H., and Verbruge, J.C. 2005. Influence of curing time, percolation and temperature on the compressive strength of a loam treated with lime. International symposium TREMTI, Paris, paper n°C022 : 10p.
- Delage, P., Audiguier, M., Cui, Y.J., and Howat, M. 1996. Microstructure of a compacted silt. *Canadian Geotechnical Journal*, **33**: 150-158.
- Eades, J.L., and Grim, R.E. 1966. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. *Highway Research Board bulletin*, **262**: 51-63.
- El-Rawi, N.M., and Awad, A.A.A. 1981. Permeability of lime treated soils. *Transportation Engineering Journal, ASCE*, **107**: 25-35.
- Ferber, V., Auriol, J.C., Cui, Y.J., and Magnan, J.P. 2008. Wetting-induced volume changes in compacted silty clays and high-plasticity clays. *Canadian Geotechnical Journal*, **45** : 252-265.
- Garcia-Bengochea, I., Lovell, C.W., and Altchaefl, A.G. 1979. Pore distribution and permeability of silty clays. *Journal on the soil mechanics and foundation division, ASCE*, **105** : 839-856.
- Guney, Y., Sari, D., Cetin, M. and Tuncan, M. 2007. Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilised soil. *Building and environment*: **42**: 681-688.
- Hilt, G.H., and Davidson, D.T. 1960. Lime fixation on clayey soils. *Highway Research Board bulletin*, **262**: 20-32.

- Le Runigo, B., Deneele, D., Cui, Y.J., Cuisinier, O., Ferber, V. 2008. Leaching characteristics of a lime-treated silty soil: assessment of the long term behaviour. Submitted to Applied Clay Science.
- Little, D.N. 1995. Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. National Lime Association, Arlington, 219 p.
- Locat, J., Trembaly, H., and Leroueil, S. 1996. Mechanical and hydraulic behaviour of a soft inorganic clay treated with lime. Canadian Geotechnical Journal, **33**: 654-669.
- Machan, G., Squier, L.R., Diamond, S. and Leo, E. 1977. Laboratory study of the effectiveness of cement and lime stabilisation for erosion control. Transportation research record, **641**: 24-28.
- McCallister, L.D. 1990. The effects of leaching on lime-treated expansive clays. PhD thesis, University of Texas at Arlington, 417 p.
- McCallister, L.D. and Petry, T.M. 1992. Leach tests on lime-treated clays. Geotechnical Testing Journal, **15**: 106-114.
- Nalbantoglu, Z., and Tuncer, E.R. 2001. Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay. Canadian Geotechnical Journal, **38** : 154-160.
- Petry, T.M. and Wohlgemuth S.K. 1989. Effects of pulverization on the shear strength and durability of highly active clay soils stabilized with lime and Protland cement. Transportation research record, **1190**: 38-45.
- Rajasekaran, G., and Rao, S. 1999. Microstructure of lime stabilized marine clay. Ocean Engineering, **24** : 867-878.
- Rajasekaran, G., and Rao, S. 2002. Permability characteristics of lime treated marine clay. Ocean Engineering, **29** : 113-127.
- Ranganatham, B.V. 1961. Soil structure and consolidation characteristics of black cotton clay. Géotechnique, **11** : 331-338.
- Revertegat, E., Richet, C., and Gegout, G. 1992. Effect of pH on the durability of cement pastes. Cement and Concrete Research, **22** : 259-272
- Rogers, C.D.F., and Glendinning, S. 1996. Modification of clays soils using lime. *In* Lime stabilization. Thomas Telford, London. 99-112.
- Thompson, M.R. and Dempsey, B.J.D. 1969. Autogenous healing of lime-soil mixtures. Highway research record, **263**: 1-7.

Wild, S., Arabi, M., and Rowlands, G.O. 1986. Relation between pore size distribution, permeability, and cementitious gel formation in cured clay-lime systems. *Material Science and Technology*, **3**: 1005-1011.

IV.3. CONCLUSION

L'étude conduite et présentée dans ce chapitre a permis de préciser l'évolution de la microstructure et de la perméabilité du limon de Jossigny traité à la chaux à court terme, en fonction du dosage en chaux et des conditions de compactage. Cette étude a aussi été l'occasion de déterminer l'évolution de la perméabilité du limon de Jossigny traité à la chaux au cours d'une circulation d'eau.

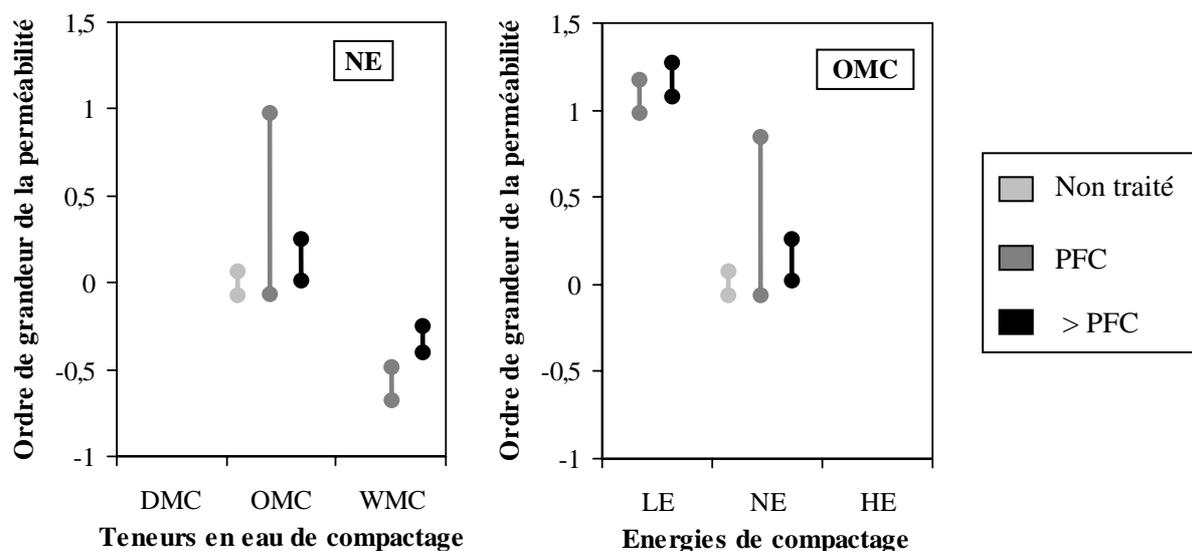
Évolution de la perméabilité du limon de Jossigny à court terme

Cette étude a permis de confirmer que l'ajout de chaux conduit, pour une condition de compactage donnée, en une augmentation de la perméabilité. Toutefois, il a été observé, d'une façon générale, que le dosage en chaux semble avoir peu d'influence sur l'ampleur de cette augmentation dans le cas des sols limoneux : celle-ci est maintenue à moins d'un demi ordre de grandeur que la quantité de chaux ajoutée soit égale ou supérieure au PFC du sol. L'origine de cette faible variation de perméabilité avec le dosage en chaux s'explique par le fait que l'ajout de chaux affecte préférentiellement les micropores de ces sols (pores $< 1 \mu\text{m}$), plutôt que leurs macropores, qui sont à l'origine du contrôle de la perméabilité. Néanmoins, il a été noté, dans le cas d'un traitement au PFC et d'un compactage à l'optimum Proctor, que le traitement à la chaux pouvait conduire à des perméabilités très variables (différences de plus d'un ordre de grandeur). L'origine de ces variations reste difficile à expliquer. Toutefois, différentes hypothèses qui nécessitent d'être confirmées ont été proposées. Il a ainsi été supposé compte tenu de la faible quantité de chaux ajoutée que celle-ci pourrait ne pas être toujours distribuée de façon homogène dans le sol, résultant ainsi en une microstructure peu homogène et donc en des perméabilités variables. Il a aussi été avancé que la faible quantité de chaux ajoutée correspondant au PFC pourrait ne pas systématiquement conduire à des conditions favorables à la formation de composés cimentaires, entraînant ainsi une microstructure moins homogène et donc une variabilité de la perméabilité.

Cette étude a aussi permis, par rapport aux connaissances actuelles, de mieux appréhender l'évolution de la microstructure et de la perméabilité des sols limoneux en fonction des conditions de compactage employées. En effet, il a été montré, quel que soit le dosage en chaux considéré, que la microstructure et la perméabilité des sols limoneux traités à la chaux évoluent de la même manière que celles des sols non traités, lorsque ceux-ci sont compactés à différentes teneurs en eau et énergies de compactage. Ainsi, il a été observé que

plus la teneur en eau de compactage est forte, plus la microstructure du sol est fermée et plus sa perméabilité est faible. De même, plus l'énergie de compactage est importante, plus la microstructure du sol est homogène, et plus sa perméabilité est faible.

Finalement, cette étude permet de fournir un premier cadre théorique pour évaluer et prévoir la perméabilité des sols limoneux traités à la chaux en fonction du dosage en chaux et des conditions de compactage. Celui-ci est illustré par la figure 37.



* OMC = teneur en eau optimale, DMC = côté sec, WMC = côté humide, NE = énergie de compactage normale, LE = sous compactage, HE = sur compactage

Figure 37. Observation de surface au MEB du limon de Jossigny non traité.

Ce cadre théorique doit toutefois être considéré avec prudence. En effet, tout d'abord, il apparaît important de rappeler que les essais n'ont été conduits que sur un seul sol. Une des perspectives de ce travail serait donc de conduire des essais complémentaires sur d'autres sols de même nature, afin de valider ce cadre théorique à l'ensemble des sols limoneux. De même, avant toute généralisation, une étude complémentaire devrait être menée pour valider les résultats obtenus pour davantage de dosages en chaux et de conditions de compactage que ceux utilisés dans cette étude. Ce cadre théorique nécessite en particulier d'être complété pour les états de compactage du côté sec (DMC) ou de sur-compactage (HE), ces conditions n'ayant pas été considérées au cours de cette étude. Enfin, il peut être noté que ce cadre théorique pourrait s'avérer un outil de travail intéressant aux ingénieurs en charge de la construction d'ouvrages hydrauliques ou de remblais en zone inondable. Néanmoins, la

validation des résultats obtenus en laboratoire sur des ouvrages grandeur nature apparaît comme une étape préalable à l'utilisation de ce cadre pour la pratique.

Évolution de la perméabilité du limon de Jossigny au cours d'une circulation d'eau

Il a été avancé dans cette étude à partir des résultats physico-chimiques présentés dans le chapitre précédent que la perméabilité des sols traités à la chaux résulte de la prépondérance de l'un ou l'autre des processus physico-chimiques se produisant au cours d'une circulation d'eau : processus de dissolution/décalcification et processus de précipitation. En effet, la prépondérance des processus de dissolution/décalcification mènerait à une augmentation de la perméabilité des sols traités, ces processus entraînant une ouverture de la porosité des matériaux suite au lessivage du calcium. Au contraire, la prépondérance des processus de précipitation conduirait à une diminution de la perméabilité des sols traités, ces processus entraînant le bouchage progressif des pores.

Cette étude a permis de confirmer cette hypothèse dans le cas du limon traité à 1 % de chaux. En effet, il a été constaté que la stabilité de la perméabilité du limon de Jossigny traité à 1 % de chaux au cours de la circulation d'eau était corrélée à un équilibre existant entre les processus de dissolution/décalcification et de précipitation. En revanche, malgré une prépondérance des processus de précipitation, il a été noté que la perméabilité du limon de Jossigny traité à 3 % de chaux restait stable au cours de la circulation imposée. Différentes hypothèses ont été avancées pour expliquer cette stabilité. Ainsi, il a été supposé que celle-ci pouvait être attribuée aux trop faibles quantités de produits cimentaires formés ou au fait que les produits cimentaires semblent préférentiellement être précipités dans les petits pores qui ont peu d'influence sur la perméabilité.

Pour conclure, il peut raisonnablement être avancé que l'évolution de la perméabilité des sols traités exposés à une circulation d'eau ne dépend pas seulement de la prépondérance de l'un ou l'autre des processus physico-chimiques se produisant au cours d'une circulation d'eau. En effet, elle semble fortement modulée par l'ampleur de ces processus, c'est-à-dire par la quantité de produits cimentaires formés et/ou lessivés, ainsi que par les zones que ces processus affectent, c'est-à-dire les micropores ou macropores. Les résultats obtenus dans le cas du limon de Jossigny laissent penser que l'évolution de la perméabilité des sols limoneux traités à la chaux au cours d'une circulation d'eau n'est pas affectée par ces processus.

Néanmoins, il apparaît nécessaire de rappeler que les résultats obtenus ne s'appliquent vraisemblablement qu'aux conditions de circulation utilisées dans cette étude ($i = 80$ et eau

déminéralisée pour liquide perméant). Il apparaît ainsi intéressant, afin de généraliser les conclusions données ci-dessus, de conduire des essais complémentaires pour d'autres charges hydrauliques et types d'eau. L'utilisation de plus faibles charges hydrauliques permettrait, par ailleurs, de mettre en évidence l'évolution du comportement hydraulique des sols limoneux traités sous-compactés. En effet celui-ci n'a pas pu être établi dans la présente étude, compte tenu de la baisse de perméabilité causée par la trop forte pression de confinement utilisée ou le trop fort gradient hydraulique employé (entraînement de fine). De plus, des essais supplémentaires devraient être réalisés sur d'autres sols limoneux afin de confirmer les résultats obtenus avec le limon de Jossigny. Finalement, une confrontation entre comportement en laboratoire et comportement sur des ouvrages grandeur nature apparaît aussi comme une étape nécessaire pour un transfert des résultats obtenus vers la pratique.

Chapitre V – Comportement mécanique du limon de Jossigny traité à la chaux et soumis à différentes sollicitations hydriques

V.1. PRÉSENTATION DE L'ARTICLE

Le comportement mécanique des sols limoneux traités à la chaux apparaît comme un des paramètres primordiaux lorsque la réutilisation de ces sols est envisagée pour la construction d'ouvrages hydrauliques ou de remblais en zone inondable. En effet, les sols utilisés pour la construction de ces ouvrages doivent présenter à court terme des performances mécaniques suffisamment fortes pour permettre la mise en œuvre de ces ouvrages. De même, ces sols doivent aussi présenter, une fois les ouvrages mis en service, c'est-à-dire une fois les ouvrages exposés aux sollicitations hydriques de leur environnement (contacts prolongés à l'eau et/ou circulations d'eau), des performances mécaniques suffisamment fortes pour leur permettre de rester stables et de supporter les différentes charges auxquelles ils peuvent être soumis.

Le chapitre 1 a permis de mettre en évidence que l'efficacité de la chaux à court terme sur les performances mécaniques était une fonction du dosage en chaux ajoutée, du temps de cure et des conditions de compactage. Ainsi, plus le dosage en chaux est important, et plus le temps de cure est long, plus les performances mécaniques des sols traités sont fortes. Toutefois, l'influence des conditions de compactage sur ces performances à court terme reste controversée (par ex : Wissa, 1965 ; Ralling, 1971, Estéoule & Perret, 1979 ; Petry & Berger, 2006).

Le chapitre 1 a aussi permis de montrer que le phénomène de saturation intervenant dans les sols traités à la chaux soumis à un contact prolongé à l'eau ou à une circulation d'eau semble entraîner des pertes de performances mécaniques significatives. Toutefois, compte tenu du petit nombre d'études sur ce sujet (par ex. De Bel, 2005), ce phénomène reste mal connu. De même, la plupart des études réalisées (Malhotra & Bhaskar, 1983 ; McCallister, 1990, McCallister & Petry, 1992; Khattab *et al.*, 2007) ne prenant pas en compte l'impact du phénomène de saturation sur les performances mécaniques des sols, la part réelle des pertes de

performance liée à la circulation d'eau reste incertaine. Il apparaît ainsi légitime de se demander si les circulations d'eau auxquelles peuvent être soumises les ouvrages hydrauliques ou les remblais en zone inondable sont plus aggravantes en terme de durabilité que de simples contacts à l'eau.

Enfin, il a été avancé dans le chapitre précédent qu'une faible perméabilité pourrait être favorable à la durabilité des ouvrages hydrauliques ou des remblais en zone inondable construits en sols limoneux traités à la chaux. Cette hypothèse doit être confirmée. Par ailleurs, la perméabilité des sols traités à la chaux étant fortement liée aux paramètres pouvant être contrôlés sur un chantier, et en particulier, aux conditions de compactage (voir chapitre IV), il apparaît intéressant de préciser le rôle de ces paramètres sur la pérennité des performances mécaniques des sols traités exposés à une circulation d'eau.

Dans ce contexte, le travail présenté dans ce chapitre sous forme d'un article soumis à la revue de l'ASCE « Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering » (article 3) a pour but de préciser, d'un point de vue mécanique, l'efficacité du traitement à la chaux à court terme, mais aussi sa durabilité en fonction des conditions initiales du sol (dosage en chaux et conditions de compactage) et des sollicitations hydriques auxquelles le sol est soumis : contact prolongé à l'eau et circulation d'eau. Pour ce faire, les liens existants entre comportement physico-chimique, hydraulique et mécanique ont été déterminés en fonction du dosage en chaux et des conditions de compactage.

L'efficacité du traitement à court terme a été évaluée à partir des performances mécaniques atteintes par le sol après une courte période de cure réalisée à température ambiante et teneur en eau constante. Le contact prolongé à l'eau ainsi que les circulations d'eau ont été simulées à partir des dispositifs expérimentaux décrits en détail dans le chapitre 2.

Deux teneurs en chaux différentes, 1 % (PFC du limon de Jossigny) et 3 %, ainsi que trois états de compactage ont été considérés dans une première approche. Ces conditions initiales choisies sont représentatives des conditions pouvant être rencontrées sur un chantier (compactage à l'optimum Proctor, compactage du côté humide et sous compactage).

Le comportement mécanique du limon de Jossigny traité a été évalué après différents temps de cure (0, 7, et 25 jours), temps d'immersion (0, 7, 28, 50 et 110 jours) et temps de lessivage (de 110 à 320 jours). Deux indicateurs mécaniques ont été utilisés pour décrire l'évolution de son comportement mécanique : la résistance à la compression simple et la résistance au cisaillement (essais triaxiaux). Les liens entre comportement mécanique,

hydraulique et physico-chimique ont été établis à partir des résultats présentés dans les chapitres III et IV (perméabilité du limon de Jossigny et distribution du calcium dans le sol).

L'article est présenté dans la suite de ce paragraphe tel qu'il a été soumis à la revue de l'ASCE, « Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ».

Assessing the durability of mechanical performance of a lime-treated silty soil under different long-term hydraulic conditions

B. Le Runigo^a, V. Ferber^b, Y.C. Cui^{1c}, O. Cuisinier^a, D. Deneele^a

^aLaboratoire Centrale des Ponts et Chaussées de Nantes, Division RMS

^bEntreprise Charier, 44550 Montoir de Bretagne

^cEcole Nationale des Ponts et Chaussées, UR Navier – CERMES

Soumis au Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Août 2008

ABSTRACT

The durability of the mechanical improvements brought by lime once the involved earth structures are exposed to long-term hydraulic conditions (long-term water contact and water circulation) is still under discussion. This paper aims at assessing i) the impact of such hydraulic conditions on the mechanical performance of a lime-treated silty soil, and ii) the effect of initial conditions (lime content and compaction conditions) on the lime treatment durability. The results showed that water contact leads to a suction decrease and thus a significant decrease in shear strength. The results also indicated that the mechanical performance of soils exposed to water circulation is highly related to the quantity of water passing through the soil specimens and hence to the permeability of the soils: the lower the permeability, the better the durability. From a practical point of view, the low permeability can be obtained either by employing high compaction energy or by compacting wet of optimum. Finally, the results also showed that a lime content higher than the lime modification optimum (LMO) enables a better homogeneity of the treatment, giving rise to a longer resistance to water circulation.

Key-words: Jossigny silt, lime treatment, durability, water circulation, mechanical strength, permeability.

¹ Corresponding author ; cui@cermes.enpc.fr ; tel : +33 1 64 15 35 50 ; fax: +33 1 64 15 35 62

1. Introduction

In the context of Sustainable Development, there is an increasing need of retrieving and re-employing the materials encountered in the vicinity of the earthwork projects, whatever their nature or hydrous state. In this regard, fine soils represent an important issue due to their low mechanical characteristics and relatively high natural moisture content. Lime stabilization is one of the methods widely used nowadays to overcome these problems. In fact, it leads, through the development of physico-chemical processes to an improvement of the soils workability and mechanical properties. Cation exchange process combined with the presence of large amounts of calcium ions on the adsorbed clay particles surface (calcium coming from the lime added) leads to the reduction of the double diffuse layer size of the clay particles, giving rise to their flocculation. It is generally accepted that the cation exchange and the flocculation occur immediately after the addition of lime and leads to a decrease of the soil plasticity (Eades and Grim 1966; Rogers and Glendinning 1996). Besides, the addition of lime also results in a high pH environment which enables the dissolution of both silica and alumina present in the soil from which cementitious compounds such as hydrated calcium silicates or hydrated calcium aluminates (C-S-H and C-A-H) can be formed. As a result, an increase in the soil mechanical properties can be expected, the extent of the increase being dependent on the amount of lime added, the curing time and the nature of the soil treated (Fossberg 1965; Wissa *et al.*, 1965; Brandl 1981; Balasubramaniam and Buensuceso 1989; Bell 1996, Little 1995; Balasubramaniam *et al.* 2005). The obtained results suggest that lime-treated soils behave as overconsolidated clays, with an increased overconsolidation pressure. Furthermore, the lime addition increases the shear strength parameters, i.e. the internal friction angle, φ' , and the effective cohesion, c' . It has been found that the shear strength increase depends on the soil properties (clay fraction, clay type, Atterberg limits, etc.). The increase of φ' is generally attributed to the modifications induced by cation exchange and flocculation processes as it remains stable during curing. By contrast, the increase of c' is generally attributed to the formation of cementitious compounds as it increases with the curing time.

Although lime treatment has been widely used for embankment construction, its use for the construction of hydraulic structures (dikes, river levees, dams, etc.) or of embankments in flooding areas remains, at least in France, controversial. In fact, the durability (i.e. the capacity of the structures to maintain for long time the performance defined by the design) of the mechanical improvements brought by lime once earth structures are exposed to long-term

water contact or water circulations is still unclear. This is probably due to the low number of studies carried out on this subject. De Bel *et al.* (2005) conducted a study on a lime-treated silt subjected to different leaching times; their results indicate that long-term water circulation is detrimental to the durability of hydraulic earth structures since the unconfined compression strength of the lime-treated soil decreased significantly with the leaching time. Different assumptions were proposed by the authors to explain this decrease: i) the saturation of the soil and thus the increase in their moisture content, ii) the calcium leaching due to the decalcification of the cementitious compounds. The strength loss as well as the calcium leaching seemed to be less pronounced when the curing time was long. This may be due to a better crystallization of the cementitious compounds with long curing time. Other authors (McCallister 1990; McCallister and Petry 1992) who studied the leaching effect on lime-treated plastic clays compacted under different moisture contents also showed that leaching leads to a decrease in the soils strength by 15.1 % to 86.0 %, depending on the soil nature and lime contents. They also showed that the strength decrease could be minimized even neutralised by adding large amounts of lime (from 4 % to 8 %, depending on the soil considered).

Another unanswered question involves the impact of the soil initial state on the short and long-term mechanical performances, especially under long-term leaching conditions. In other words, from a practical point of view, it would be very helpful to know whether controlling compaction moisture content and dry density can contribute to improve the long-term mechanical properties. Several works were conducted, investigating the impact of compaction moisture content on the soil mechanical properties; but the effect of the compaction energy has been scarcely studied. Estéoule and Perret (1979) indicated that compaction moisture content plays an important role in the evolution of the unconfined compression strength of a lime-treated silt. Petry and Berger (2006) studied three different clayey soils and showed that the highest unconfined strength is reached when compacting the soils close to their optimum moisture content. This may be due to the higher dry density reached in that case. On the other hand, the results obtained by Wissa *et al.* (1965) suggest that compaction moisture content does not have any significant effect on the internal friction angle and the effective cohesion. Their study further evidenced that an increase in the dry density of lime-treated soils could lead to an increase of the effective cohesion, the internal friction angle remaining stable. Finally, the study conducted by McCallister (1990) showed that soils compacted dry of optimum exhibit the highest permeability and the most significant strength decrease when exposed to water circulation, whereas soils compacted wet of

optimum exhibit, on the contrary, the lowest permeability and the smallest strength decrease with water circulation. These results suggest that the durability of lime-treated soils could depend not only on the amount of lime added or the curing time but also on the soil permeability and thus on the soil initial state as they are both closely correlated (Le Runigo *et al.*²).

In this context, the present paper aims at assessing i) the impact of different hydraulic conditions, i.e. water contact or water circulation, on the mechanical performance of a lime-treated silty soil, and ii) the impact of the soil initial states (lime content, and compaction conditions) on the durability of the mechanical performance. The mechanical properties of the specimens compacted under different initial states after short curing periods will also be investigated. These results will serve as a comparison reference. Then, the impact of water contact and long-term water circulation on the mechanical properties will be described. A physico-chemical approach will be proposed to explain the differences observed in the behaviour of the lime-treated soil.

2. Materials and experimental procedures

2.1 Materials characteristics

The soil used in this study is the Jossigny silt (see also Cui and Delage 1996; Delage et al. 1996, Cui et al. 2003), sampled in the eastern region of Paris, France. It was dried at ambient temperature ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) for three days, then grinded, sieved at 2 mm and finally homogenized. The main physical properties are given in Table 1.

Table 1. Main geotechnical and physico-chemical properties of the soil.

Geotechnical properties	
Liquid limit, w_L (%)	37.0
Plastic limit, w_P (%)	18.7
Plasticity index, I_P (%)	18.3
Soil density, ρ_s ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2.69
Clay fraction, $< 2 \mu\text{m}$ (%)	29.4
Physico-chemical properties	
Soil pH	8.0
Cation exchange capacity (meq/100g)	15.1
Carbonates content, (%)	1.30
Lime modification optimum, LMO (% of lime)	1.0

² Le Runigo, B., Cuisinier, O., Cui, Y.J., Ferber, V., Deneele, D. Impact of the soil initial state on fabric and permeability of a lime treated silt under long term leaching. Submitted to Canadian Geotechnical Journal, July 2008.

The X-ray diffraction technique was used to determine the natural soil mineralogical composition. The results showed that it is mainly composed of quartz and feldspar, its clay fraction being composed of illite and kaolinite with a significant amount of interstratified illite and smectite minerals.

The lime used is an industrial quicklime provided by Lhoist which contains 90.4 % of free oxide calcium. The lime modification optimum (LMO) of the soil was determined using the ASTM standard D 6276 and was found equal to 1 % of lime. Two different lime contents were tested in this study; the first one equal to the LMO of the soil: 1 %, and the second one slightly higher, 3 %.

2.2 Preparation and characteristics of compacted specimens

The soil was firstly mixed with distilled water in order to reach the desired moisture content and was thereafter sealed in a plastic bag for 48 h for moisture content homogenisation. Then, the moist soil and the lime were thoroughly mixed and dynamically compacted one hour after mixing. The compaction was performed directly in cylinder moulds of 100 mm high and 50 mm in diameter using a miniaturised Proctor compaction device similar to that used by Ferber *et al.* (2008). The compaction was carried out in 10 layers so as to ensure a satisfactory homogeneity.

Untreated specimens were compacted under normal Proctor energy (NE) and at a moisture content close to the optimum Proctor moisture content (OMC): the OMC is 17 % but the compaction was conducted at 16 % moisture content and 1.76 Mg.m^{-3} dry density. In the case of lime-treated specimens, three different initial states were considered. The first one corresponds to the state generally looked for at construction sites, namely compaction at the optimum Proctor: compaction at OMC under normal Proctor energy, NE; the second one corresponds to a low compaction (50 % of the normal Proctor energy, LE) and the third one corresponds to a compaction at a moisture content higher than the OMC (3 % higher, WMC). The latter two states are two critical cases possibly encountered at construction sites.

After compaction, specimens were sealed using both cellophane paper and wax so as to avoid moisture loss. Compacted specimens were then left in cure at ambient laboratory temperature ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) for periods varying from 0 to 25 days. Figure 1 illustrates the different compaction characteristics reached by lime-treated specimens after 25-days curing.

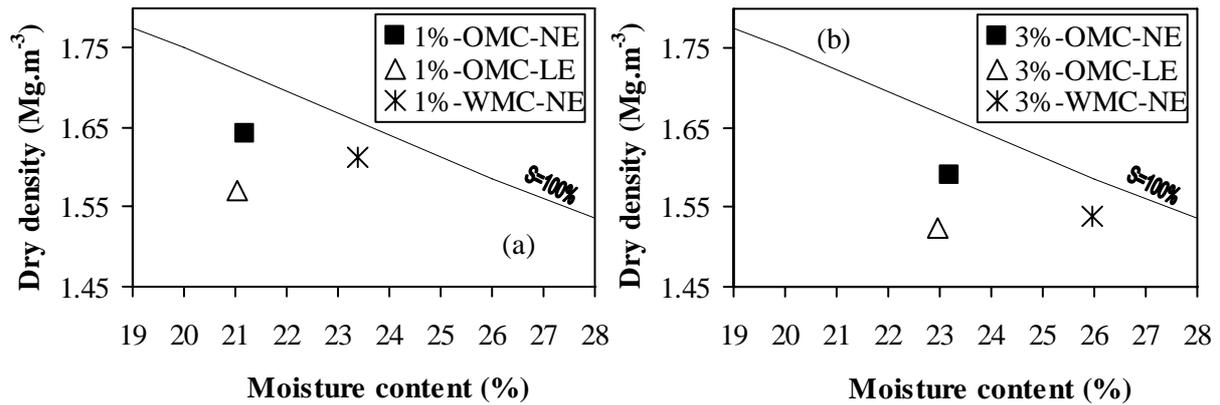


Figure 1. Characteristics of lime-treated specimens compacted under different initial conditions: 1 % of lime (a), 3 % of lime (b).

2.3 Water contact and long term percolation equipment and conditions

The impact of water contact was investigated by immersing soil specimens after 25-day curing in a solution of distilled water, the liquid to solid ratio being 1. In order to examine the evolution of the soil mechanical properties with immersion time, four immersion durations were considered: 7, 25, 50 and 110 days.

The effects of long-term water circulation were investigated using a special percolation device. Twelve cells similar to flexible wall permeameter were designed. They are constituted of two aluminium plates of 100 mm diameter and a plexiglas cylinder of 52 mm inner diameter and 120 mm high. Compacted specimens were leached for time periods varying from 110 to 320 days at a constant temperature of 20°C. The percolation was conducted *per ascensum* so as to facilitate the air evacuation. Distilled water was chosen as leaching fluid. The tests were performed under a constant hydraulic head of 8 m (80 kPa). A constant confining pressure of 120 kPa was applied in order to avoid preferential paths along the side of the specimens. The leachates were collected into plastic bottles as water passed through the specimens. Permeability of the specimens was determined based on the Darcy's law from the quantity of water collected for a given time of percolation.

It was estimated that 200-day percolation corresponds to a rainfall period of 11.5 years in France. This estimation was based on an annual mean rainfall infiltration of 300 L.m⁻² that corresponds to one third of the total annual amount of rainfall in France, the other two thirds being considered as consumed by interception, runoff and evapotranspiration.

2.4 Mechanical tests

Unconfined compression tests were carried out on compacted specimens at the end of curing (before immersion) and after different times of immersion and leaching. The tests were carried out at a constant displacement rate of $1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

A standard triaxial testing system was used to perform consolidated undrained tests (CU tests with porewater pressure measurement) on untreated specimens and lime-treated specimens. Three cell pressures were applied: 350, 500 and 800 kPa. For the specimens saturation, a back-pressure of 210 kPa was applied; this defines three effective confining pressures: 140, 290 and 590 kPa. Once the consolidation was achieved, the specimens were sheared at a constant rate of $0.03 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. The tests were continued until the deviator stress reached a maximum level. Two different failure criteria were considered to analyse the results: peak deviator stress, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{max}}$, and peak stress ratio, $(\sigma_1 / \sigma_3)_{\text{max}}$. The strength parameters (effective cohesion c' and internal friction angle φ') were determined based on these two criteria.

2.5 Physico-chemical tests

Carbonates contents and available lime contents were determined at different time of curing and leaching. Carbonates contents were determined using the “Dietrich-Frühling” calcimeter by measuring the volume of CO_2 developed by acid reacting with the powdered soil. The method used to determine the available lime content of the soil (i.e. lime either in the form of portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, or calcium oxide, CaO) is based on the Leduc method. It consists in solubilizing lime by reaction with sugar to form calcium sucrate which is then titrated using a standard acid and a solution of 1/3 bromocresol green and 2/3 phenolphthalein as indicator. The acid solution used in this study was a 0.1 N hydrochloric acid solution.

Porewater calcium concentration after 25-day curing was estimated by measuring the calcium concentration of the solution after 24-hour immersion of soil samples cured for 25 days and treated at 1 % or 3 % of lime (liquid to solid ratio of 10). Leachates calcium concentrations were measured using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) at different times of percolation. Specimens porewater calcium concentrations were also estimated at different time of leaching, on the basis that the leachate calcium concentration recorded at a given time of percolation is equivalent to the porewater calcium concentration of the soil specimen. It was observed that the porewater calcium concentrations during leaching represents less than 0.006 % of the calcium initially present, and thus can be considered as negligible.

3. Results

3.1 Before immersion

3.1.1 Physico-chemical aspect

Tables 2 and 3 provide the speciation of calcium in the lime-treated specimens compacted at their optimum Proctor during curing. The addition of lime induces a significant increase in the carbonates calcium content for both lime contents: from 0.51 % to 0.77 % in case of 1 % of lime and to 1.13 % in case of 3 % of lime after 25-day curing. The results also show that 77 % of the lime added was consumed after 25-day curing in the case of 1 % of lime, whereas only 54 % of the added lime was consumed in the case of 3 % of lime.

Table 2. Speciation of calcium before after 0 and 25-day curing and after different leaching time for specimens treated at 1 % of lime and compacted at different initial states

Specimens type	Curing (days)	Leaching time (days)	Carbonates (% Ca)	Available lime (% Ca)	Porewater calcium ^a (% Ca)	Leached calcium (% Ca)	Total calcium ^b (% Ca)
1%-OMC-NE	0	-	0.51	0.64	-	-	1.15
1%-OMC-NE	25	-	0.77	0.15	0.03	-	0.95
1%-OMC-NE-C1	25	90	-	0.04	-	0.12	-
1%-OMC-NE-C1	25	320	0.78	0.04	-	0.14	0.96
1%-OMC-NE-C2	25	150	0.77	0.10	-	0.07	0.94
1%-OMC-NE-C2	25	200	0.78	0.09	-	0.09	0.96
1%-OMC-LE	25	150	0.87	0.04	-	0.17	1.08
1%-WMC-NE	25	150	0.77	0.11	-	0.07	0.95

^a < 0.006 % of Ca during leaching, hence negligible

^b corresponds to the addition of carbonates, available lime, porewater calcium and leached calcium

Table 3. Speciation of calcium after 0 and 25-day curing and after different leaching time for specimens treated at 3 % of lime and compacted at different initial states

Specimens type	Curing (days)	Leaching time (days)	Carbonates (% Ca)	Available lime (% Ca)	Porewater calcium ^a (% Ca)	Leached calcium (% Ca)	Total calcium ^b (% Ca)
3%-OMC-NE	0	-	0.51	1.92	-	-	2.43
3%-OMC-NE	25	-	1.13	0.88	0.14	-	2.15
3%-OMC-NE	25	120	-	0.59	-	0.31	-
3%-OMC-NE	25	150	1.10	0.47	-	0.36	1.93
3%-OMC-NE	25	200	1.00	0.41	-	0.47	1.88
3%-OMC-NE	25	320	0.88	0.12	-	0.77	1.77
3%-OMC-LE	25	150	1.15	0.23	-	0.77	2.15
3%-WMC-NE	25	150	1.05	0.66	-	0.16	1.87

^a < 0.006 % of Ca during leaching, hence negligible

^b corresponds to the addition of carbonates, available lime, porewater calcium and leached calcium

It can be also noted that the total calcium content corresponding to the sum of the porewater calcium, carbonates and available lime calcium contents presented by each of the lime-treated specimens after 25-day curing is significantly below the calcium content initially present in the soil specimens: a difference of 0.19 % and 0.28 % for specimens treated respectively at 1 % and 3 % of lime. It is likely that this difference corresponds to the uptake of calcium for the formation of cementitious compounds. Obviously, the quantity of cementitious compounds formed after 25-day curing would be more significant with a treatment at 3 % of lime than a treatment at 1 % of lime.

3.1.2 Mechanical properties

Figure 2 presents the effects of curing and lime content on the unconfined compression strength (UCS) of specimens compacted at their optimum Proctor. Curing leads to an increase in UCS for both lime contents. However, the increase is more significant for specimens treated with 3 % of lime. In fact, the UCS of specimens treated at 1 % of lime increases by only 119 % after 25-day curing, whereas that of specimens treated at 3 % of lime increases by 142 %.

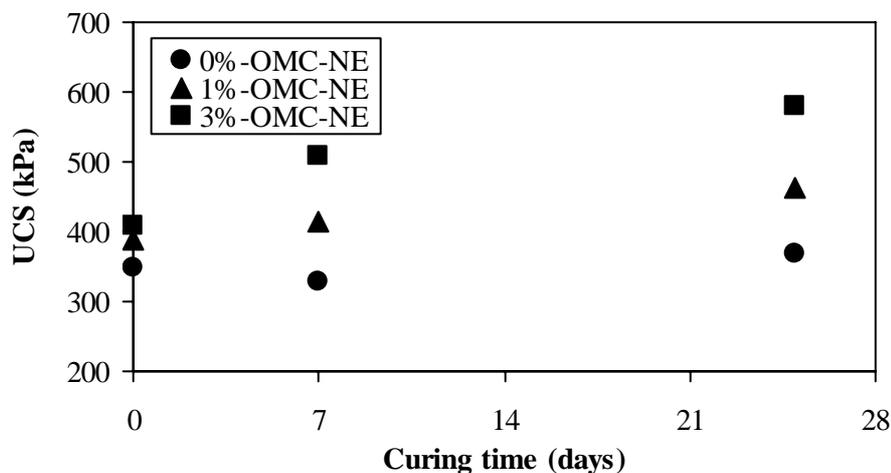


Figure 2. Effect of curing and of lime content on the unconfined compression strength of specimens compacted at their optimum moisture content under normal Proctor energy.

The values of effective cohesion and internal friction angle obtained using the two different failure criteria for the non-treated and lime-treated specimens compacted at their optimum are given in Table 4. Note that it was not possible to determine the shear strength parameters after 25-day curing due to a technical reason. However, triaxial tests were performed after 90-day curing for specimens treated at 1 % of lime and 50-day curing for specimens treated at 3 % of lime. The addition of lime leads, after the different curing periods

and whatever the failure criterion considered, to an increase of the effective cohesion and the internal friction angle for both lime contents. Some differences can be noticed between the shear strength parameters determined according to the two different failure criteria considered. These differences are attributed to the mathematical regression treatment used to evaluate these parameters. The results indicate that the mechanical improvements obtained with a treatment at 3 % of lime and a curing time of 50 days are slightly better than those reached for a treatment at 1 % of lime and a curing time of 90 days.

Table 4. Shear strength parameters after curing and leaching for untreated and lime-treated specimens compacted at their optimum Proctor.

	Curing time (days)	Leaching time (days)	$(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$		$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$	
			c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
0%-OMC-NE	-	-	19.2	26.9	0.0	29.9
1%-OMC-NE	90	-	60.3	32.5	64.4	29.9
3%-OMC-NE	50	-	74.0	33.3	85.0	31.8
1%-OMC-NE-C2	25	150	20.0	26.9	29.2	26.4
3%-OMC-NE	25	200	67.9	39.5	105.8	30.1

Figure 3 presents the effects of compaction conditions on the UCS of lime-treated specimens. A strong impact is evidenced: compaction at the optimum leads to the highest UCS for both lime contents, about 19 % to 64 % higher than in the case of compaction on the wet side or undercompaction. In addition, despite the higher dry density of lime-treated specimens compacted on the wet side as compared to that of undercompacted specimens, their UCS was lower than that of undercompacted specimens. This observation suggests that the influence of moisture content is prevailing to that of dry density.

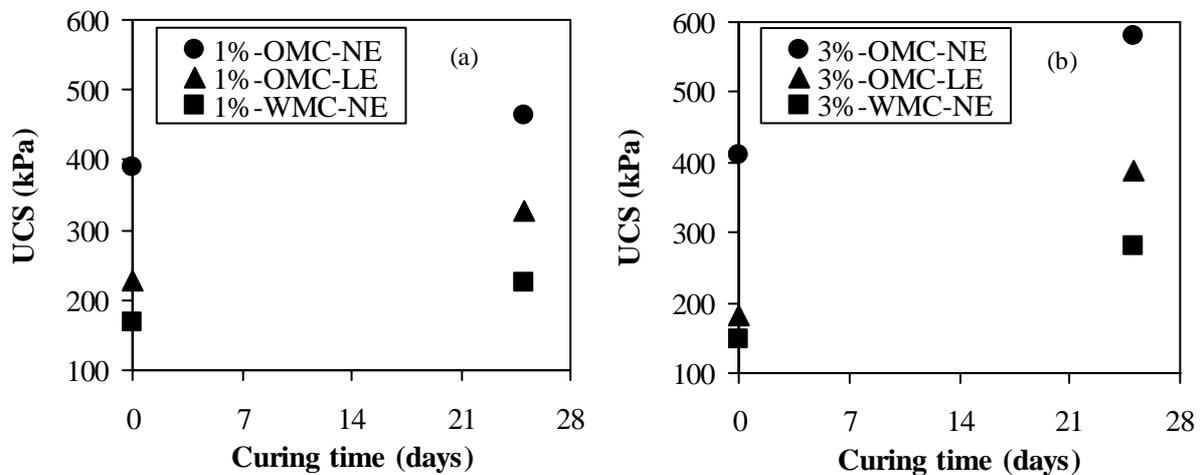


Figure 3. Effect of initial compaction conditions on the unconfined compression strength of specimens treated both at 1 % (a) and 3 % (b) of lime during curing.

3.2 After immersion

3.2.1 Physico-chemical aspect

Table 5 presents the evolution of the calcium concentrations recorded at different immersion times: 7, 25, 50 and 110 days. It can be noted that after 7 days, i.e., time needed for the saturation of soil specimens, the calcium concentrations of the specimens treated both at 1 % and 3 % of lime are stabilized. This suggests that equilibrium is reached between the solution and lime-treated specimens. The calcium concentrations recorded for specimens treated at 3 % of lime (mean value of 600 mg.L⁻¹) are much higher than those of specimens treated at 1 % of lime (mean value of 115 mg.L⁻¹).

Table 5. Evolution according to time of the calcium concentrations of the solution in which lime-treated specimens compacted at their optimum Proctor are immersed.

	Calcium concentrations (mg.L ⁻¹)				
	0 day	7 days	25 days	50 days	110 days
1%-OMC-NE	0	110	120	99	130
3%-OMC-NE	0	580	625	590	620

3.2.1 Mechanical properties

The evolution with immersion time of UCS of lime-treated specimens compacted at their optimum Proctor is presented in Figure 4, together with the values before immersion.

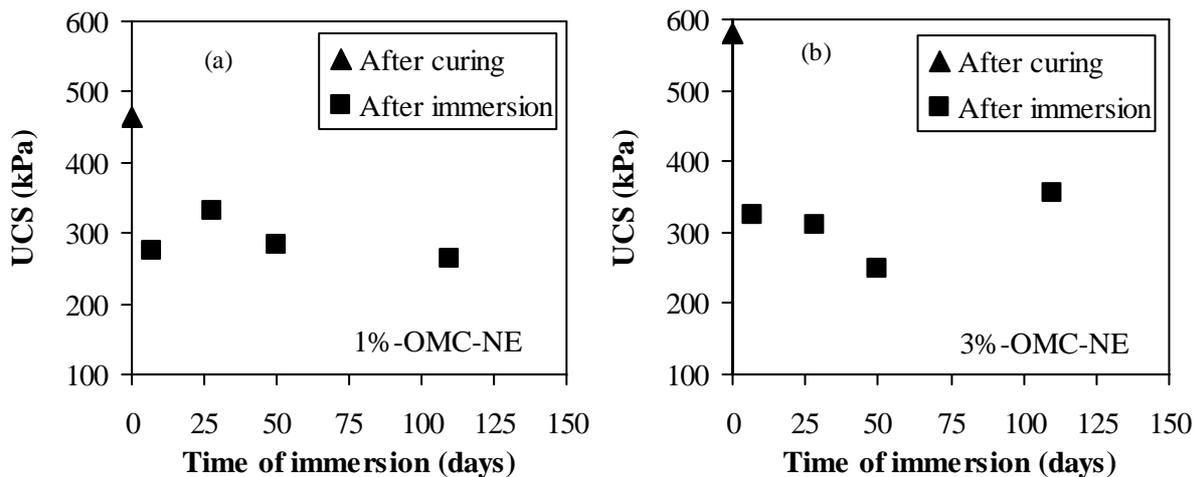


Figure 4. Effect of immersion on the unconfined compression strength of lime-treated specimens compacted at their optimum: 1% of lime (a), 3 % of lime (b).

Note that it was not possible to determine the effect of immersion on the UCS of untreated specimens as they almost immediately began to disintegrate when immersed in water. Their UCS was therefore considered as zero once immersed. In the case of lime-treated specimens, an immersion of 7 days (i.e. saturation of specimens) leads to a significant UCS decrease. However, their UCS remained largely above that evaluated for the untreated specimens. The results also showed that an immersion time longer than 7-day does not result in further UCS decrease: for both lime contents, the UCS remained close to that measured after 7-day immersion. A relatively larger decrease was observed for the 3 % lime-treated specimens than for the 1 % lime-treated specimens (37 % and 47 % for specimens treated respectively at 1 % and 3 % of lime). As a consequence, the large difference in UCS recorded after 25-day curing between 1 % of lime and 3 % of lime (Figure 2) was reduced after immersion: the specimens treated at 1 % and 3 % of lime presented similar UCS, with a mean value of 290 kPa for 1 % of lime after saturation and a mean value of 310 kPa for 3 % of lime after saturation.

3.3 During and after leaching

3.3.2 Physico-chemical aspects

Table 2 provides the speciation of calcium during curing and leaching for the specimens treated at 1 % of lime and compacted at different initial conditions. Two distinct evolutions can be observed for the specimens compacted at the optimum Proctor during leaching. These are quoted as C1 and C2. The part of calcium leached at a given time of percolation appears to be larger for the specimens 1%-OMC-NE-C1 than for the specimens 1%-OMC-NE-C2: 0.12 % of calcium was leached for the specimens 1%-OMC-NE-C1 after 90 days against 0.09 % for the specimens 1%-OMC-NE-C2 after 200 days. The available calcium content of the specimens 1%-OMC-NE-C1 appears lower than that of the specimens 1%-OMC-NE-C2 at a given time of percolation (only 0.04 % of Ca for the specimens 1%-OMC-NE-C1 after 90-day leaching and still 0.09 % after 200- day leaching for the specimens 1%-OMC-NE-C2). However, despite these differences, the carbonates and the total calcium content of the specimens 1%-OMC-NE-C1 and 1%-OMC-NE-C2 are similar whatever the leaching time. If considering that the difference between the calcium content initially present in the soil and the total calcium content at a given time is representative of the amount of cementitious compounds, it can be deduced that the quantity of cementitious compounds remain unchanged during leaching.

The behaviour of specimens compacted wet of optimum is similar to that of specimens 1%-OMC-NE-C2. The behaviour of undercompacted specimens can be compared to that of specimens 1%-OMC-NE-C1: in both cases, large quantity of calcium was leached rapidly. However, unlike for the specimens 1%-OMC-NE-C1, the total calcium content of the undercompacted specimens is higher than that of specimens compacted at their optimum Proctor after the same leaching time, thus indicating a lower quantity of cementitious compounds in the undercompacted specimens.

Table 3 gives the speciation of calcium during curing and leaching for the specimens treated at 3 % of lime and compacted at different initial conditions. Available lime or carbonates calcium contents of the specimens compacted at the optimum decreases with percolation time: 86 % decrease for available lime and 22 % decrease for carbonates are recorded after 320-day leaching compared to the values measured after curing. In addition, as for the specimens 1%-OMC-NE-C2, the part of leached calcium increases. However, unlike the specimens treated at 1 % of lime, the total calcium content decreases upon leaching. Based on the assumption that the difference between the initial calcium content and the total calcium content at a given time represents the amount of cementitious compounds, it can be deduced that cementitious compounds were formed during leaching. The results further show that undercompaction leads to a rapid leaching of large calcium quantity: the part of leached calcium after 150-day percolation is comparable with that after 320-day percolation for the specimens compacted at the optimum Proctor; the total calcium content of the undercompacted specimens after 150-day leaching is similar to that of specimens compacted at the optimum after curing. Moreover, the part of leached calcium after 150-day percolation for a compaction on the wet side appears to be significantly lower than that for the specimens compacted at their optimum. Finally, it can be noted after 150-day leaching that the total and available lime calcium contents of the specimens compacted wet of optimum are higher than that of the specimens compacted at the optimum. This suggests that larger quantity of cementitious compounds could be formed in the specimens compacted wet of optimum.

3.3.2 Geotechnical properties

Table 6 gives the initial permeability (measured immediately after saturation) of the different specimens considered in this study. The permeability of the specimens treated at 1 % of lime and compacted at the optimum Proctor varies according to the type of the specimen considered. In fact, the initial permeability of the specimens 1%-OMC-NE-C1 and 1%-OMC-NE-C2 differ by about one order of magnitude, the initial permeability of the specimens 1%-

OMC-NE-C1 being higher. The results further show that the initial permeability of the specimens treated at 3 % of lime and compacted at the optimum is close to that of the specimens 1%-OMC-NE-C2 ($k_i \sim 7.1 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ for specimens 1%-OMC-NE-C2 and $k_i \sim 1.4 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ for specimens treated at 3% of lime and compacted at their optimum Proctor). Furthermore, the values of initial permeability of undercompacted lime-treated specimens are quite close for both lime contents; they are significantly larger than that of the specimens compacted at the optimum Proctor, except for specimens 1%-OMC-NE-C1 with an initial permeability close to that of undercompacted specimens. Finally, the initial permeability of lime-treated specimens compacted on the wet side are similar; it is slightly lower than that of the specimens compacted at the optimum Proctor (except for specimens 1%-OMC-NE-C1).

Table 6. Initial permeabilities of untreated and lime-treated soils subjected to leaching.

Compaction conditions		Initial permeability, k_i (m.s^{-1})
0%-OMC-NE		$7.5 \times 10^{-10} < k_i < 1.0 \times 10^{-9}$
1%-OMC-LE		$1.3 \times 10^{-8} < k_i < 1.9 \times 10^{-8}$
1%-OMC-NE	C1	$7.1 \times 10^{-9} < k_i < 5.1 \times 10^{-9}$
	C2	$6.7 \times 10^{-10} < k_i < 7.5 \times 10^{-10}$
1%-WMC-NE		$2.5 \times 10^{-10} < k_i < 3.3 \times 10^{-10}$
3%-OMC-LE		$1.9 \times 10^{-8} < k_i < 2.4 \times 10^{-8}$
3%-OMC-NE		$1.2 \times 10^{-9} < k_i < 1.7 \times 10^{-9}$
3%-WMC-NE		$4.5 \times 10^{-10} < k_i < 5.0 \times 10^{-10}$

Figure 5 presents the leaching effect on the UCS of untreated and lime-treated specimens compacted at their optimum Proctor. Interestingly, leached untreated specimens showed higher UCS than that showed by immersed untreated specimens (Figure 5a). Secondary consolidation of the soil specimens caused by the confining pressure applied could be at the origin of this result. In the case of specimens treated at 1 % of lime, large scatter is observed (Figure 5b). Specimens 1%-OMC-NE-C1 showed a large UCS decrease after only 90-day leaching (i.e. decrease of 69 %); the UCS after 90-day leaching is similar to that of untreated specimens after leaching. The decrease recorded after 320-day leaching for these specimens is of the same order (i.e. decrease of 77 %). By contrast, the UCS of the specimens 1%-OMC-NE-C2 remained close to that after saturation (i.e. 290 kPa) even after 200-day percolation, and much higher than that of untreated specimens. In the case of specimens treated at 3 % of lime, a small UCS increase was recorded after 120-day and 200-day leaching (Figure 5c). However, a significant decrease (i.e. 32%) was noted after 320-day leaching. Nevertheless, the UCS presented by these specimens after 320-day leaching remained

significantly higher than that observed on the untreated specimens after 150-day leaching. Finally, the UCS after leaching observed on specimens 1%-OMC-NE-C1 is much lower than that observed on specimens treated at 3 % of lime; the UCS of specimens 1%-OMC-NE-C2 after 200 day-leaching is comparable with that of specimens treated at 3 % of lime.

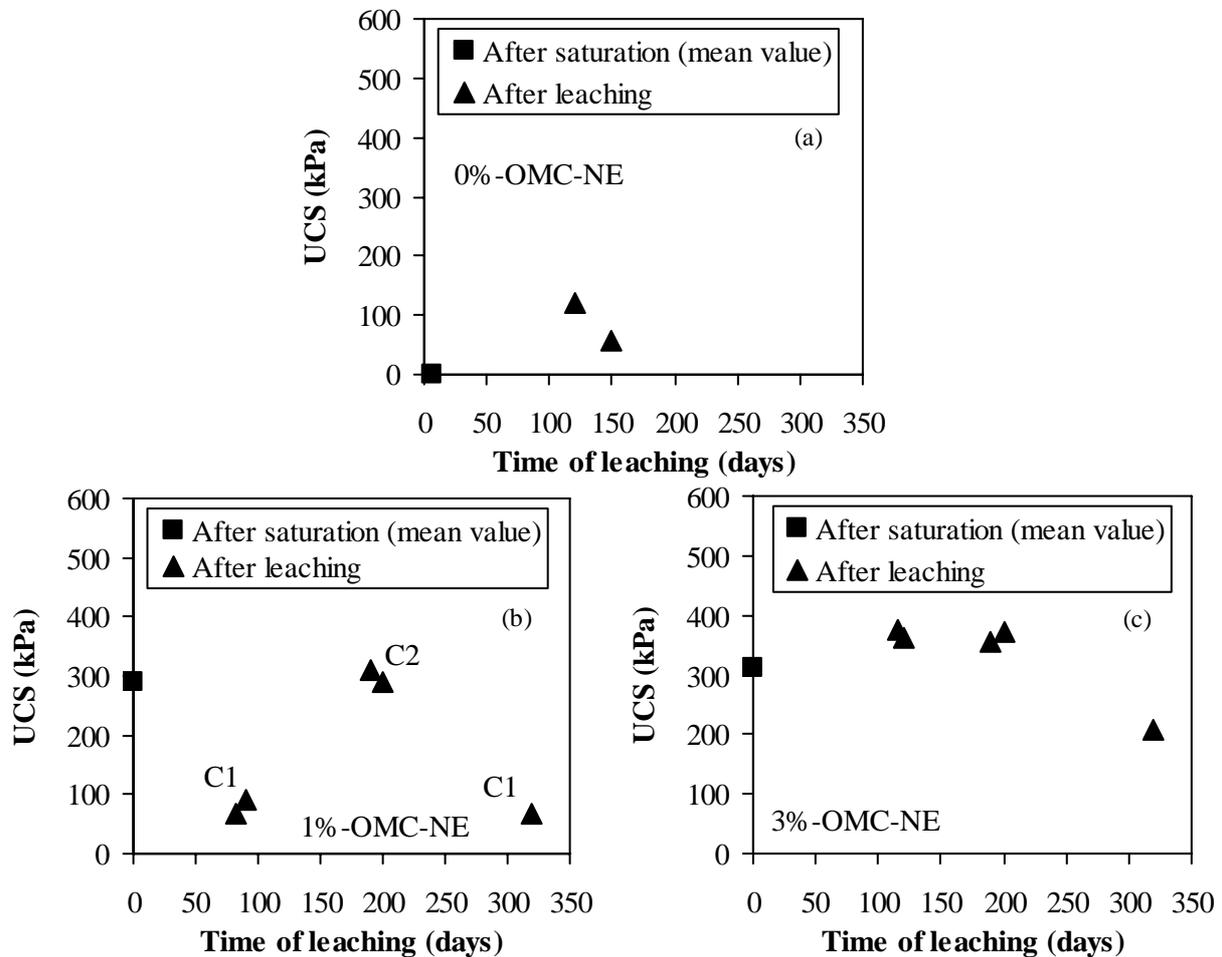


Figure 5. Effect of leaching on the unconfined compression strength of lime treated specimens compacted at their optimum: 0% of lime (a), 1 % of lime (b), 3 % of lime (c).

Table 4 gives the values of effective cohesion and internal friction angle for lime-treated specimens compacted at the optimum Proctor after curing and leaching. The results obtained for the untreated specimen are also presented for comparison. Significant difference is observed between the specimens treated at 1 % of lime after 90-day curing and the specimens 1%-OMC-NE-C2 subjected to 25-day curing and 150-day leaching, indicating that the positive effects of lime treatment can be lost during water percolation. By contrast, leaching does not seem to have a significant effect on the shear strength parameters of the specimens treated at 3 % of lime: the parameters of these specimens after 25 day-curing

followed by 200-day leaching changes slightly compared to that determined after 50-day curing.

Figure 6 presents the effect of leaching on the UCS of specimens treated at both 1 % and 3 % of lime and compacted under different initial conditions. The UCS of undercompacted specimens (Figure 6a, 1%-OMC-LE; Figure 6b, 3%-OMC-LE) decreases significantly for both lime contents after 150-day leaching: 77 % decrease for 1 % of lime and 82 % decrease for 3 % of lime were recorded.

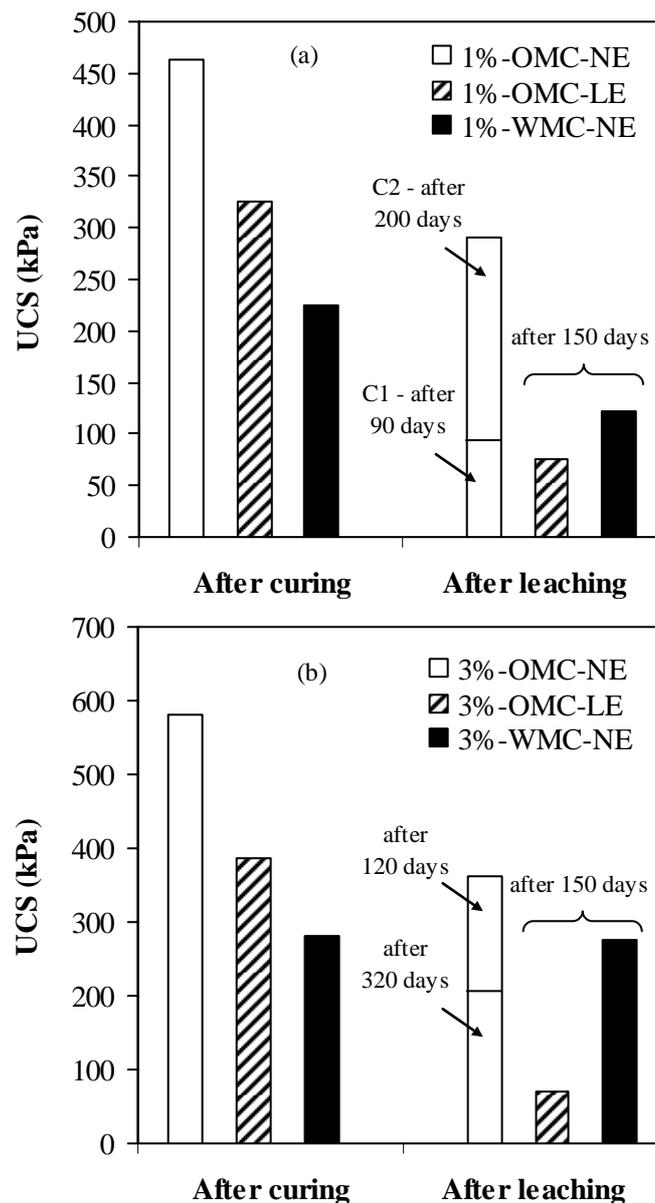


Figure 6. Effect of leaching on the unconfined compression strength of lime treated specimens compacted according different initial conditions: 1 % of lime (a), 3 % of lime (b).

These decreases are similar to that observed on the specimens 1%-OMC-NE-C1. The UCS of specimens treated at 1 % of lime and compacted wet of optimum (Figure 9a, 1%-WMC-NE) also decreases after 150-day leaching, but in a lesser extent. The decrease is similar to that observed on the specimens 1%-OMC-NE-C2 (around 40 % and 45 %). In the case of specimens treated at 3 % of lime and compacted wet of optimum (Figure 9b, 3%-WMC-NE), 150-day leaching does not seem to have any impact on their strength; the UCS value is close to that recorded after curing (around 280 kPa). Finally, it appears that for undercompacted samples, leaching leads to significant UCS decrease. By contrast, for the specimens compacted at high moisture contents and especially the specimens treated at high lime contents, the UCS seems to be less sensitive to leaching.

4. Discussion

From a hydraulic point of view, the life of a lime-treated soil in an embankment or an hydraulic earth structures (i.e. dikes, dams, canals) can be characterised by three stages: curing, immersion and in some cases water circulation.

The first stage corresponds to the time period after lime treatment and compaction, and in the present study to the curing period. During this stage, the external hydraulic conditions are supposed to remain approximately constant in practice without heavy flooding, intense rainfall or drying. The addition of lime induces a significant improvement of the soil strength that increases with time (Figure 2). This improvement is also noted for specimens compacted on the wet side or with a low energy; but such initial states appear unfavourable as they lead to lower strengths (Figure 3). The origin of these mechanical improvements are commonly attributed to the different physico-chemical modifications of the soil, including the large pH increase and the cementitious compounds precipitations (Brandl 1981; Balasubramaniam and Buensuceso 1989; Bell 1996; Little 1995). The increase with time of the mechanical performance can be attributed, as mentioned by several authors (Eades and Grim 1960, Omrsby and Kinter 1973; Little 1995), to the increasing amount of cementitious compounds as well as their better crystallisation.

The higher mechanical performance recorded for specimens treated at a high lime content (i.e. 3 % of lime) could be associated to the larger quantity of cementitious compounds formed, as indicated by the physico-chemical results (Tables 2 and 3). The physico-chemical analyses also show that a large part of the added lime is still available after

curing (Tables 2 and 3), especially in the case of 3 % of lime, indicating that only a small part participates in the cementation of the soil.

In the second stage, the soil is wetted and possibly saturated; this can be the case for the base of an embankment submitted to flooding or for hydraulic earth structures. The results clearly show that the mechanical strength decreases significantly, whatever the lime content added (Figure 4). Despite these decreases, it has been found that the soil behaviour is deeply modified by the addition of lime since the UCS recorded after immersion is much higher than that observed on non-immersed untreated specimens. The increase of effective cohesion and internal friction angle brought by the lime-treatment (Table 4) confirms this observation. The decrease of the unconfined compressive strength is probably in a large part the consequence of the suction decrease due to water uptake. Moreover, it appears when considering the UCS reached after saturation that the final mechanical strength does not seem to be dependent on the initial lime content (approximately 300 kPa for both lime contents considered). On the contrary, the results from triaxial tests suggest that a treatment at 3 % of lime provides higher performance despite a shorter curing time compared with a treatment at 1% of lime (i.e. 50 day-curing for 3 % of lime and 90 day-curing for 1 % of lime). This could be associated to the larger amount of cementitious compounds formed during 50-day curing with a treatment at 3 % of lime. Indeed, as indicated by Eades and Grim (1966) and Little (1995), the addition of a lime quantity corresponding to the LMO of the soil (1 % for the studied Jossigny silt) does not seem to be sufficient to create good conditions for the formation of pozzolanic compounds.

In the last stage, water circulates through the soil; this can be the case of hydraulic earth structures as dikes, dams and canals. The UCS results clearly show that the worst consequence of water circulation is obtained with specimens presenting the highest permeability, i.e., the undercompacted specimens and one of the specimens treated with 1 % of lime (series C1). Furthermore, the lowest permeability, e.g. for specimens compacted wet of optimum, leads to the smallest strength decrease (Figures 5 and 6). The relative stability of the shear strength parameters determined from triaxial tests on specimens treated at 3 % of lime after leaching supports these observations. However, the specimens treated at 1 % of lime and quoted as C2 present, after 25-day curing followed by 150-day leaching, quite small values of shear strength parameters (Table 4). More tests are needed to clarify this point. In spite of this, it can be concluded as a general rule that the larger the quantity of water circulating within the soil specimen, the faster and the larger the strength decrease. This indicates that the prevailing parameter in term of durability is not the percolation time but

rather the volume of water which passes through the soil. The clear UCS decrease observed on specimens treated at 3 % of lime after 320 days (Figure 5) suggests that a critical water volume was reached for these specimens, despite their low permeability (Table 6).

The physico-chemical results show that percolation leads to a non-negligible calcium leaching in lime-treated specimens and especially in the case of 3 % of lime. In addition, the increase of leached calcium is comparable with the decrease of available lime (Tables 2 and 3). For instance, in specimens treated at 3 % of lime (Table 3), the leached calcium increased from 0.31 to 0.77 % (+0.46 %) in the period from 120 to 320 days of percolation and the available lime decreased from 0.59 to 0.12 % (-0.47 %). It can be assumed from this observation that the leached calcium could, for a large part, come from the leaching of unconsumed lime. However, as mentioned by Le Runigo *et al.*³, the decalcification of the cementitious compounds, and specifically in the case of specimens treated at the LMO, may also contribute to the calcium leaching. This decalcification processes could be the cause of the decrease in mechanical strength observed on specimens treated at 3 % of lime after 320-day percolation.

The fast decrease of mechanical strength observed on some specimens treated at 1 % of lime and on the specimens at 3 % of lime after 320-day leaching shows that percolation deeply affects the mechanical performance and progressively annihilates the positive effect of the lime treatment. Nevertheless, it must be noted that, even though 3 % of lime can not prevent from strength decrease due to long percolation, the final strength of specimens treated at 3 % of lime (Figure 6c, around 200 kPa) remains higher than the strength of specimens treated at 1 % of lime (Figure 6b, around 90 kPa) and the strength of the untreated specimens (Figure 6a, around 80 kPa), showing the advantage of using high lime contents in soil treatment.

5. Conclusion

This paper assessed the impact of different hydraulic conditions, as water immersion and water circulation, on the mechanical performance of a lime-treated silty soil. The effect of the soil initial states (lime content and compaction conditions) was also investigated. Emphasize was made on the effect of curing time.

³Le Runigo, B., Deneele, D., Cui, Y.J., Cuisiner, O, Ferber, V.. Leaching characteristics of a lime-treated silty soil: assessment of the long term behaviour. Submitted on June 2008 to Applied Clay Science.

The results indicated that curing time leads to the formation of increasing amount of cementitious compounds and hence strengthen the soil. It was also evidenced that the higher the lime content, the higher the mechanical performance.

Water contact led to a significant decrease in the unconfined compressive strength, mainly due to the suction decrease induced by water uptake. Once the soil was saturated, the impact of lime content was found to be less significant than during curing.

The mechanical performance of the soil exposed to water circulation is related to the quantity of water passing through the soil and hence to its permeability rather to the duration of water circulation. As a result, low permeability limits the strength decrease due to water circulation. Such a permeability can be obtained by compacting the soil under either a high energy or at high moisture contents.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Laboratoire Environnement, Géomécanique et Ouvrages (LAEGO) for undertaking the triaxial testing.

References

- Balasubramaniam, A.S., and Buensuceso, B.R. 1989. On the overconsolidated behaviour of lime-treated soft clay. 11th international conference on soil mechanics and foundation engineering, Rio de Janeiro, Bresil. p. 35-30.
- Balasubramaniam, A.S., Buensuceso, B.R., Oh, E.Y., Bolton, M., Bergado, D.T., and Lorenzo, G.A. 2005. Strength degradation and critical state seeking behaviour of lime treated soft clay. In Best Practice and recent advances 1, International conference on deep mixing, Deep mixing '05, Stockholm, (Sweden). p. 35-40.
- Bell, F.G. 1996. Lime stabilization of clay minerals and soil. Engineering geology, vol. 42, p. 223-237.
- Brandl, H. 1981. Alteration of soil parameters by stabilization with lime. 10th international conference on soil mechanics and foundation engineering, Stockholm. p. 587-594.
- Cui Y. J., Delage P. 1996. Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. Géotechnique 46, No. 2, p. 291-311.
- Cui Y.J., Delage P., Alzoghbi P. 2003. Retention and transport of a hydrocarbon in a silt. Géotechnique, Vol. LIII, No 1, p. 83-91.
- Delage P., Audiguier M., Cui Y. J. & Howat M. 1996. Microstructure of a compacted silty clay. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33, p. 150-158.
- De Bel, R., Bollens, Q., Duvigneaud, P.H., and Verbrugge, J.C. 2005. Influence of curing time, percolation and temperature on the compressive strength of a loam treated with lime. International symposium TREMTI, paper n°C022 : 10p.
- Fossberg, P.E. 1965. Some fundamentals engineering properties of a lime stabilized clay. 6th international conference on soil mechanics and foundation engineering, Montréal. p. 21-225.
- Little, D.N. 1995. Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. Edition National Lime Association, 219 p.
- McCallister, L.D. 1990. The effects of leaching on lime-treated expensive clays. PhD thesis, University of Texas at Arlington, 417p.
- McCallister, L.D. and Petry, T.M. 1992. Leach tests on lime-treated clays. Geotechnical testing journal, vol. 15, n°2, p. 106-114.

- Petry, T.M. and Berger, E.A. 2006. Impact of moisture content on strength gain in lime-treated soils. Transportation research board, 85th annual meeting, article n°06-2764, 16p.
- Rogers, C.D.F., and Glendinning, S. 1996. Modification of clays soils using lime. *In* Lime stabilization. Thomas Telford, London. p 99-112.
- Wissa, A.E.Z., Ladd, C.C. and Lambe, T.W. 1965. Effective stress strength parameters of stabilized soils. International conference on soil mechanics and foundation engineering, Montréal. p. 412-416.

V.2. CONCLUSION

L'étude conduite et présentée dans ce chapitre a permis de déterminer l'effet de différentes sollicitations hydriques sur les performances mécaniques du limon de Jossigny traité à la chaux, mais aussi d'évaluer le rôle des conditions de compactage et du dosage en chaux sur les performances mécaniques à court et long terme.

Évolution du comportement mécanique à court terme

Les résultats obtenus ont confirmé que l'augmentation des performances mécaniques observée au cours de la période de cure pour les sols traitées à la chaux (augmentation entre 120 % et 210 % après 25 jours de cure selon les conditions de compactage et dosage en chaux considérés) est corrélée à la précipitation croissante de produits cimentaires.

Il a par ailleurs été observé, similairement à de nombreux auteurs (par ex. Perret, 1979 ; Brandl, 1981 ; Balasubramaniam & Buensuceso, 1989 ; Bell, 1996 ; Little, 1995), que les performances mécaniques varient, pour un temps de cure donné, avec la quantité de chaux ajoutée. Ainsi, quelles que soient les conditions de compactage, les performances mécaniques atteintes sont meilleures dans le cas des plus forts dosages en chaux. Ce phénomène a été attribué aux plus fortes proportions de produits cimentaires formés pour ces dosages.

Les résultats ont aussi permis de préciser l'effet de la teneur en eau de compactage et de l'énergie de compactage sur les performances mécaniques du sol traité à court terme. Il a ainsi été constaté, quel que soit le dosage en chaux considéré, que les performances maximales étaient atteintes pour un compactage à l'optimum Proctor. Le compactage du côté humide s'est s'avéré plus pénalisant que le compactage du côté sec (pour les deux dosages en chaux utilisés dans ce travail et un temps de cure de 25 jours, performances mécaniques plus faibles de 50 % et 30 % pour le compactage respectivement du côté humide et du côté sec par rapport aux performances mécaniques atteintes pour un compactage à l'optimum). L'origine de l'influence des conditions de compactage sur les performances mécaniques des sols traités à la chaux reste difficile à expliquer. Il semblerait que la densité sèche joue un rôle important. En effet, plus elle est forte, plus les performances sont fortes. Toutefois, son effet semble contrebalancé par celui de la teneur en eau de compactage. Ainsi, plus la teneur en eau de compactage est élevée, plus les baisses de succion dans les sols sont importantes, plus les tensions superficielles entre particules sont faibles, et donc plus les performances mécaniques sont faibles.

Évolution du comportement mécanique face à un contact prolongé à l'eau

Cette étude a permis de confirmer que les résistances à la compression simple des sols limoneux traités à la chaux après saturation sont nettement plus faibles que celles présentées par les sols traités avant sollicitation (entre 35 % et 45 % de moins selon le dosage en chaux). Néanmoins, il a été constaté que le traitement à la chaux conduisait vraisemblablement en une modification profonde du sol, les performances mécaniques (résistances à la compression simple et résistances au cisaillement via des essais triaxiaux) du limon de Jossigny traité étant largement supérieures à celles présentées par le sol non traité après exposition à un contact prolongé à l'eau (par ex. après saturation résistance à la compression maintenue à 300 kPa dans le cas des sols traités, alors que nulle dans le cas du sol non traité).

Cette étude a aussi permis de déterminer l'influence du dosage en chaux sur les performances mécaniques des sols traités à la chaux après exposition à un contact prolongé à l'eau. Il a été montré que son influence est discutable selon le critère de performance retenu. En effet, il a été observé que le dosage en chaux ajouté n'avait pas d'effet significatif sur la résistance à la compression simple après immersion : les résistances obtenues après saturation étant du même ordre de grandeur pour les deux dosages en chaux considérés dans ce travail. En revanche, les résultats ont indiqué qu'un traitement à 3 % de chaux conduisait à de meilleures performances au cisaillement qu'un traitement à 1 % de chaux. L'origine de ces comportements contradictoires en fonction du critère de performance retenu reste indéterminée. Néanmoins, il a été avancé que les différents temps de cure auxquels les essais de résistance au cisaillement ont été conduits (50 jours et 90 jours au lieu de 25 jours) pourraient être à l'origine de ces différences de comportement. Des essais complémentaires doivent donc être conduits pour vérifier ces hypothèses.

Évolution du comportement mécanique face à une circulation d'eau

Les résultats obtenus ont permis de confirmer, comme dans le cas des sols argileux, que les pertes de performance observées suite à une circulation d'eau pour des sols limoneux peuvent être associées à leur perméabilité, et donc, à la quantité d'eau circulant dans le sol. Cette étude a par ailleurs permis de donner une explication au rôle joué par la perméabilité dans le comportement mécanique des sols exposés à une circulation d'eau. En effet, il a été observé, pour les conditions de circulation utilisées dans cette étude, que l'ampleur des processus de dissolution/décalcification et de précipitation était affectée par la perméabilité du sol traité. Ainsi, il a été constaté que plus la perméabilité du sol traité est forte, plus les processus de dissolution sont importants, et donc, plus les pertes de performances sont fortes.

Au contraire, plus la perméabilité du sol traité est faible, plus les processus de dissolution sont négligeables, et plus les pertes de performances sont limitées.

Cette étude a également permis de préciser le rôle des conditions de compactage et du dosage en chaux sur les performances mécaniques des sols exposés à une circulation d'eau : celui-ci découle directement de l'influence de ces paramètres sur la perméabilité des sols traités. Ainsi, il a été constaté qu'une forte teneur en chaux semble favorable au maintien des performances mécaniques, la perméabilité des sols étant dans ce cas moins sujette à variation. De même, il a été observé que les pertes de performances pouvaient être limitées, voire annulées lorsque le sol est compacté à une forte teneur en eau, la perméabilité étant alors du même ordre de grandeur que celle du sol non traité. Au contraire, un sous-compactage du sol apparaît comme très pénalisant, compte tenu de la forte perméabilité qu'il entraîne (2 à 3 ordres de grandeur de plus que la perméabilité du sol non traité).

Finalement, il peut être retenue à l'issue de ce chapitre que la perméabilité des sols limoneux traités à la chaux et exposés à une circulation d'eau apparaît, une fois de plus, comme un paramètre primordial : en effet, le maintien des performances mécaniques de ces sols est fortement lié à ce paramètre. Par ailleurs, il peut être avancé à partir des conclusions données ci-dessus qu'une circulation d'eau n'est pas nécessairement plus pénalisante qu'un simple contact prolongé à l'eau, si la perméabilité du sol traité est suffisamment faible.

Avant de généraliser l'ensemble de ces conclusions à l'ensemble des sols limoneux traités à la chaux, différents points restent à éclaircir. En effet, il apparaît nécessaire de réaliser des essais complémentaires sur des sols différents de même nature que le limon de Jossigny. Par ailleurs, il apparaît aussi nécessaire de rappeler que les conclusions obtenues au cours de ce travail ne sont à priori vraies que pour les conditions de circulation employées ($i = 80$ et eau déminéralisée). Des essais complémentaires doivent donc être menés avec différents gradients hydrauliques et liquides perméants. Finalement, il ne faut pas non plus oublier que les conclusions présentées ci-dessus concernent des essais réalisés en laboratoire sur de petites éprouvettes. Des essais sur des ouvrages grandeur nature doivent donc être réalisés afin de valider ces conclusions à la pratique.

Chapitre VI – Synthèse : optimisation du traitement à la chaux des sols limoneux à court et long terme

Les matériaux utilisés pour la construction de remblais en zone inondable ou d'ouvrages hydrauliques doivent présenter différentes caractéristiques afin de permettre à ces ouvrages de remplir à court terme mais surtout à long terme les fonctions pour lesquels ils ont été construits. Ils doivent ainsi présenter des performances mécaniques suffisamment fortes pour résister aux charges auxquels ils peuvent être soumis avant et après leur mise en service, mais aussi une perméabilité suffisamment faible, dans le cas des ouvrages hydrauliques, pour leur permettre de jouer le rôle de barrière hydraulique.

Ce travail a pour but, dans une optique d'optimisation de la réutilisation des sols limoneux traités à la chaux, de mettre en perspective l'influence des paramètres pouvant être contrôlés en chantier à partir des paramètres contrôlés en laboratoire dans cette étude sur :

- l'efficacité du traitement à la chaux à court terme,
- la durabilité de ces ouvrages.

On cherchera ainsi, dans un premier temps, à spécifier les dosages en chaux et conditions de compactage, et en particulier, les énergies et les teneurs en eau de compactage, favorisant l'efficacité du traitement à court terme. On s'intéressera dans cette partie à l'influence de ces différents paramètres, d'une part, sur les performances mécaniques, et, d'autre part, sur la perméabilité atteinte par ces sols après traitement/compactage et avant mise en service des ouvrages. On s'attachera ensuite à déterminer l'influence de ces paramètres sur la durabilité des structures après leur mise en service, période au cours de laquelle ces ouvrages peuvent être soumis à deux types de sollicitations hydriques différentes : une simple immersion ou une circulation d'eau.

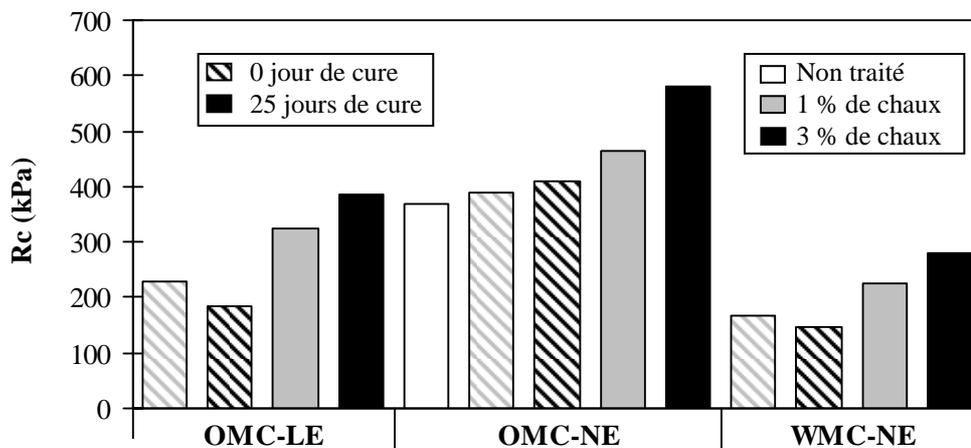
L'objet de ce chapitre est donc de rassembler les différents résultats relatifs à ces sujets présentés de façon disparate dans les chapitres précédents pour conclure quant aux conditions initiales à favoriser pour optimiser les effets du traitement à la chaux à court et long terme dans le cas de sols limoneux traités à la chaux et utilisés pour la construction de remblais en zone inondable ou d'ouvrages hydrauliques.

VI.1. EFFETS DU DOSAGE EN CHAUX ET DES CONDITIONS DE COMPACTAGE SUR L'EFFICACITÉ DU TRAITEMENT À COURT TERME

VI.1.1. Effets du dosage en chaux

VI.1.1.1. Performances mécaniques

L'approche géotechnique conduite au cours de ce travail (cf. chapitre V) a permis de montrer, pour une condition de compactage donnée (teneur en eau et énergie de compactage données), que le dosage en chaux utilisé avait un effet significatif à court terme (c'est-à-dire au cours de la période de cure, dans ce travail jusqu'à 25 jours) sur la résistance à la compression simple du limon de Jossigny. En effet, il a été observé que l'ajout de chaux conduisait en une amélioration de sa résistance mécanique (fig. 38).



* OMC = teneur en eau optimale, WMC = côté humide, LE = sous compactage, NE = compactage à énergie normale

Figure 38. Évolution de la résistance à la compression simple du limon de Jossigny en fonction du dosage en chaux et du temps de cure.

Il a été constaté que l'ampleur de cette amélioration était fonction de la quantité de chaux ajoutée. Ainsi, malgré la baisse significative de densité sèche observée avec l'ajout de chaux pour une même condition de compactage (tab. 18), il a été noté que plus la quantité de chaux ajoutée était importante, plus l'amélioration de la performance était forte (fig. 38). À titre

d'exemple, des augmentations de l'ordre de 120 % et 150 % ont été observées après 25 jours de cure et un compactage à l'optimum pour des traitements à 1 % et 3 % de chaux.

Tableau 18. Évolution de la densité sèche en fonction du dosage en chaux pour trois conditions de compactage données (OMC-LE : sous compactage à teneur en eau optimale, OMC-NE : compactage à l'optimum Proctor et WMC-NE : compactage du côté humide à énergie de compactage normale).

	Densité sèche (Mg.m ⁻³)		
	0 % de chaux	1 % de chaux	3 % de chaux
OMC-LE	-	1,569 ± 0,014	1,524 ± 0,004
OMC-NE	1,760 ± 0,002	1,642 ± 0,012	1,590 ± 0,007
WMC-NE	-	1,612 ± 0,005	1,540 ± 0,009

Les essais physico-chimiques réalisés, et en particulier l'évolution de la distribution du calcium dans le sol (cf. chapitre III), ont permis de déterminer l'origine du rôle du dosage en chaux sur l'amélioration de ces performances mécaniques à court terme. Il a ainsi été montré, pour un temps de cure donné et dans le cas d'un compactage à l'optimum, qu'un traitement à un dosage en chaux supérieur au PFC entraînait, par opposition à un traitement au PFC du sol, la formation d'une quantité plus importante de produits cimentaires (tab. 19). En effet, les résultats ont indiqué que le pourcentage massique de calcium correspondant aux produits cimentaires était, dans le cas d'un traitement à 3 % de chaux, 30 % plus fort que celui obtenu avec un dosage en chaux équivalent au PFC du sol (1 % de chaux). Néanmoins, il a été constaté que la quantité de produits cimentaires formés au bout de 25 jours de cure restait pour ces deux dosages en chaux relativement faible comparée à la masse de sol traité.

Tableau 19. Évaluation des quantités de produits cimentaires formés après 25 jours de cure en fonction de dosage en chaux pour des éprouvettes compactées à leur optimum Proctor respectifs.

Conditions initiales des éprouvettes	Temps de cure (jours)	Quantités de produits cimentaires formés (% massique de Ca)
0 % -OMC-NE	25	0,00
1 % -OMC-NE	25	0,20
3 % -OMC-NE	25	0,28

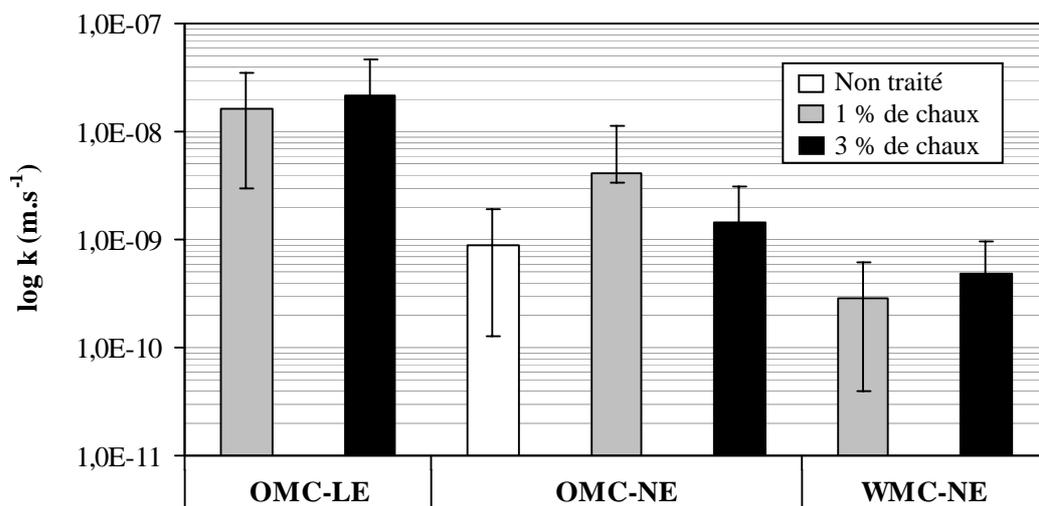
L'évolution de la résistance à la compression simple du limon de Jossigny avec le dosage en chaux suggère que l'augmentation de résistance à la compression simple observée suite au traitement à la chaux peut être corrélée à la quantité de produits cimentaires formés à l'issue des réactions pouzzolaniques. La quantité de produits cimentaires formés semble, elle-même, associée à la quantité de chaux ajoutée : dans le cas d'un compactage à l'optimum,

plus le dosage en chaux est fort, plus la quantité de produits cimentaires formés est importante. Ainsi, une forte teneur en chaux semble préférable à une faible teneur en chaux lorsqu'une forte performance mécanique est recherchée à court terme.

Néanmoins d'autres essais doivent être menés pour compléter et confirmer ces conclusions à l'ensemble des conditions de compactage (côté sec, côté humide, faible ou forte énergies de compactage). De plus, des essais complémentaires doivent aussi être réalisés avec d'autres dosages en chaux, et notamment des dosages en chaux supérieurs à ceux utilisés dans cette étude, de façon à déterminer s'il n'existerait pas un dosage seuil à partir duquel les performances mécaniques n'évoluent plus.

VI.1.1.2. Perméabilité

L'approche géotechnique conduite (cf. chapitre IV) a aussi permis d'évaluer l'effet du dosage en chaux sur la perméabilité du sol à court terme (perméabilité initiale après 25 jours de cure et saturation du sol). Il a été constaté, contrairement à ce qui est généralement admis dans la pratique, que les baisses de densité sèche observées avec l'augmentation du dosage en chaux pour une condition de compactage donnée (teneur en eau et énergie de compactage données) n'avaient que peu d'effet sur la perméabilité initiale du limon de Jossigny (fig. 39).



* OMC = teneur en eau optimale, WMC = côté humide, LE = sous compactage, NE = compactage à énergie normale

Figure 39. Perméabilité du limon de Jossigny après 25 jours de cure en fonction du dosage en chaux pour différentes conditions de compactage.

En effet, les résultats obtenus ont montré, que la perméabilité du sol était, pour une condition de compactage donnée, peu influencée par le dosage en chaux (différences de perméabilité en fonction du dosage en chaux et pour une condition de compactage donnée inférieures à un demi ordre de grandeur).

L'approche microstructurale menée sur le limon de Jossigny traité et non traité a permis de proposer une explication à l'origine de ces similitudes (cf. chapitre IV). En effet, il a été montré que l'ajout de chaux n'a une incidence significative que sur la microstructure du limon de Jossigny compacté (pores $< 1 \mu\text{m}$). Il a par ailleurs été noté, que l'ampleur des modifications apportées à la microstructure du sol était comparable pour les dosages en chaux considérés dans cette étude (dosage équivalent et supérieur au PFC du sol). Ainsi, la diminution de densité observée avec l'ajout de chaux semble se traduire, dans le cas du limon de Jossigny, non pas par une augmentation de sa macroporosité, mais par la formation d'une nouvelle classe de pores de rayons d'entrée compris entre 0,01 et 0,2 μm (cf. chapitre IV, article 2, fig. 2). Cette modification a été attribuée à la réorganisation des particules argileuses induite par le phénomène de floculation/agrégation. Les faibles variations de perméabilité en fonction du dosage en chaux résultent ainsi de l'absence d'effet significatif de la chaux sur la macrostructure du limon de Jossigny, la macrostructure étant vraisemblablement à l'origine du contrôle de la perméabilité des sols.

Toutefois, il a tout de même été noté qu'un traitement à 1 % de chaux (PFC du limon de Jossigny) pouvait conduire, dans le cas d'un compactage à l'optimum Proctor, à une forte variabilité de la perméabilité initiale du sol : des différences de plus d'un ordre de grandeur ont ainsi pu être observées, pour cette condition de compactage, entre différentes éprouvettes de sol (fig. 39). Les hypothèses avancées pour expliquer ces variations reposent sur la faible quantité de chaux que représente ce dosage par rapport la masse totale de sol traité. Il a ainsi été supposé compte tenu de cette faible quantité de chaux, que la chaux n'était peut être pas toujours distribuée de façon homogène dans le sol, ou que les conditions favorables à la formation des produits cimentaires n'étaient pas forcément homogène dans le sol. Ces deux cas résultant en des microstructures plus ou moins homogènes pourraient expliquer la variabilité de la perméabilité.

Il apparaît délicat de répondre de manière tranchée quant aux dosages en chaux à favoriser lors du traitement d'un sol limoneux pour obtenir une faible perméabilité à court terme. En effet, il a été montré que le dosage en chaux semble avoir peu d'influence sur la perméabilité à court terme de ces sols compactés puisque les modifications apportées par la chaux concernent en majorité leur microporosité. Toutefois, la variabilité des perméabilités

obtenue dans le cas d'un traitement au PFC du limon de Jossigny suggère qu'un dosage en chaux supérieur au PFC devrait être privilégié, celui-ci conduisant à une perméabilité plus stable.

VI.1.2. Effets des conditions de compactage

VI.1.2.1. Performances mécaniques

L'influence de trois conditions de compactage a été évaluée sur les performances mécaniques à court terme du limon de Jossigny traité à la chaux. La première condition de compactage considérée correspond à l'optimum Proctor, condition de compactage représentative des conditions généralement recherchées dans la pratique sur chantier. Les deux autres conditions de compactage considérées au cours de cette étude sont le sous-compactage et le compactage à une teneur en eau supérieure à celle de l'optimum. Ces conditions sont représentatives de cas typiques pouvant être rencontrés sur chantier.

Les essais géotechniques réalisés (cf. chapitre V), et en particulier l'évolution de la résistance à la compression simple du limon de Jossigny traité, ont permis de montrer que, pour un dosage en chaux donné, les performances mécaniques à court terme les plus fortes étaient atteintes dans le cas d'un compactage à l'optimum Proctor. En effet, il a été observé, quel que soit le dosage en chaux considéré, qu'un sous-compactage ou qu'un compactage du côté humide conduisaient à des performances mécaniques entre 30 % et 50 % plus faibles que celles observées dans le cas du compactage à l'optimum, le compactage du côté humide étant le plus pénalisant (fig. 38).

L'origine de ces faibles performances mécaniques a été attribuée, dans le cas du sous-compactage, aux plus faibles densités sèches obtenues (tab. 18) suite à la faible énergie de compactage appliquée (moitié moins de celle correspondant à l'énergie Proctor normale). Toutefois, cette hypothèse n'a pas permis d'expliquer complètement les faibles performances mécaniques obtenues dans le cas d'un compactage du côté humide. En effet, si tel avait été le cas, les plus fortes densités sèches observées pour cette condition de compactage par comparaison à celles obtenues lors du sous-compactage du sol, auraient dû, contrairement à ce qui a été observé, conduire à de plus fortes performances mécaniques. Il a ainsi été conclu à partir de ces observations que la teneur en eau de compactage devait jouer un rôle

prépondérant sur les performances mécaniques à court terme du limon de Jossigny traité. L'hypothèse avancée pour expliquer ces faibles performances mécaniques repose sur la baisse de succion induite par les fortes teneurs en eau du matériau lors d'un compactage du côté humide. En effet, il a été supposé que ces baisses de succion devaient résulter en une réduction des tensions superficielles entre particules, contribuant ainsi à l'affaiblissement des agrégats argileux, et donc à de faibles performances mécaniques.

Finalement, il peut être supposé à partir des résultats obtenus pour le limon de Jossigny que, quel que soit le dosage en chaux utilisé, le compactage d'un sol limoneux humide traité à la chaux est plus pénalisant en terme de performances mécaniques qu'un défaut de compactage ou qu'un compactage à une faible énergie. Les performances mécaniques maximales semblent être obtenues pour un compactage à l'optimum Proctor. Il peut ainsi être conclu à partir de ces résultats qu'un compactage à l'optimum Proctor doit être favorisé lorsqu'une forte performance mécanique est recherchée à court terme.

Il est à noter qu'il serait intéressant de déterminer l'effet des conditions de compactage sur la quantité de produits cimentaires formés, notamment pour des compactages du côté sec et humide, les conditions physico-chimiques dans les sols n'étant alors plus les mêmes pour ces conditions du fait de la variation de la quantité d'eau dans le sol (variations des concentrations des éléments en solution et du pH).

VI.1.2.2. Perméabilité

L'approche géotechnique conduite au cours de ce travail (cf. chapitre IV) a aussi permis de rendre compte du rôle des conditions de compactage sur la perméabilité du limon de Jossigny à court terme. Il a ainsi été constaté, quel que soit le dosage en chaux considéré, que la perméabilité du limon de Jossigny traité à la chaux diminuait avec l'énergie de compactage et la teneur en eau de compactage (fig. 39).

Il a été montré que l'évolution de la perméabilité du matériau pouvait être associée aux modifications apportées par ces deux paramètres sur sa microstructure. En effet, il a été constaté que l'augmentation de la teneur en eau et de l'énergie de compactage menaient toutes deux, et de façon comparable à ce qui est observé dans les sols non traités, à une microstructure de plus en plus homogène et une macroporosité de plus en plus fermée, expliquant ainsi les baisses de perméabilité (cf. chapitre IV, article 2, fig. 5, fig. 6, fig. 7 et fig. 8).

Finalement, il peut être conclu qu'un compactage du côté humide ou qu'une augmentation de l'énergie de compactage, et donc un fort degré de saturation, favorisent l'obtention d'une faible perméabilité.

VI.1.3. Conclusion

L'influence des paramètres pouvant être contrôlés sur un chantier sur l'efficacité du traitement à court terme a été mise en évidence dans cette première partie. Celle-ci est récapitulée dans le tableau 20.

Il ressort de ce tableau qu'un sous-compactage conduit non seulement à une forte perméabilité, mais aussi à de faibles performances mécaniques. En revanche, un compactage du côté humide pourrait s'avérer, malgré de faibles performances mécaniques, plus intéressant compte tenu de la faible perméabilité qu'il entraîne. Néanmoins, un compactage à l'optimum semble être un bon compromis pour l'obtention à la fois d'une faible perméabilité et d'une performance mécanique forte. Enfin, l'utilisation d'un dosage en chaux supérieur au PFC permet d'augmenter les performances mécaniques et apparaît plus sûr puisqu'il permet de s'affranchir de la variabilité significative de perméabilité pouvant être observée dans le cas d'un traitement au PFC.

Tableau 20. Récapitulatif de l'influence du dosage en chaux et des conditions de compactage sur l'efficacité du traitement à court terme.

Conditions de compactage	Dosage en chaux équivalent au PFC du sol	Dosage en chaux supérieur au PFC du sol
OMC-LE	PM - k_i ++	PM - k_i ++
OMC-NE	PM + k_i -	PM ++ k_i -
WMC-NE	PM -- k_i --	PM -- k_i --

* OMC = teneur en eau optimale, WMC = côté humide, LE = sous compactage, NE = compactage à énergie normale, PM = performance mécanique, k_i = perméabilité initiale

VI.2. EFFETS DU DOSAGE EN CHAUX ET DES CONDITIONS DE COMPACTAGE SUR LA DURABILITÉ DU TRAITEMENT À LA CHAUX

Après leur mise en service, les ouvrages hydrauliques ou les remblais en zone inondable peuvent être soumis à deux types de sollicitations hydriques distinctes : un simple contact à l'eau ou une circulation d'eau, cette dernière concernant vraisemblablement davantage les ouvrages hydrauliques (digues, barrages, etc.), compte tenu de leur contact permanent à l'eau. On distinguera ainsi dans cette partie l'influence des paramètres pouvant être contrôlés sur un chantier sur la durabilité de ces structures selon qu'elles sont soumises à l'une ou l'autre de ces sollicitations.

VI.2.1. Immersion

Le travail réalisé a seulement permis d'apporter quelques éléments de réponse dans le cas d'une simple immersion quant à l'influence des paramètres pouvant être contrôlés sur chantier sur la durabilité du traitement. En effet, seule l'influence du dosage en chaux sur les performances mécaniques du sol compacté à l'optimum Proctor a été évaluée.

Il a été montré que le traitement à la chaux conduisait à une modification profonde du sol, puisque les performances mécaniques (résistance à la compression simple et résistance au cisaillement) du limon de Jossigny traité étaient, après immersion, largement supérieures à celles présentées par le sol non traité (fig. 40).

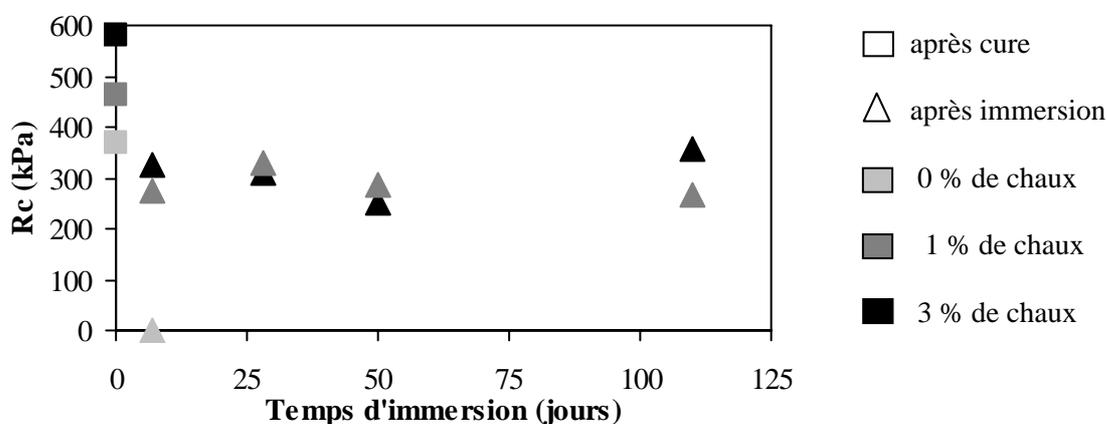


Figure 40. Évolution de la résistance à la compression simple du limon de Jossigny compacté à l'optimum Proctor en fonction du dosage en chaux et du temps d'immersion.

Toutefois, il a été constaté que le rôle du dosage en chaux sur les performances mécaniques après immersion était discutable selon le critère de performance retenu. En effet, il a été montré, dans le cas de la résistance à la compression simple, que le dosage en chaux ajouté n'avait pas d'effet significatif sur la performance mécanique atteinte. Ainsi, quel que soit le dosage en chaux ajouté (1 % ou 3 % de chaux), la résistance à la compression simple du limon de Jossigny traité était, après immersion, de l'ordre de 300 kPa (fig. 40). En revanche, les résultats de résistance au triaxial ont indiqué qu'un traitement à 3 % de chaux permettait l'obtention de meilleurs paramètres de résistance au cisaillement qu'un traitement à 1 % de chaux (chapitre V, article 3, tab. 4). L'origine de ces différences n'a pas pu être expliquée compte tenu du faible nombre d'essais réalisés, notamment en ce qui concerne la résistance au triaxial (une seule série d'essais pour chaque dosage en chaux).

Finalement, il apparaît délicat de conclure catégoriquement sur le dosage en chaux à utiliser pour favoriser la durabilité d'une structure exposée à un contact prolongé à l'eau. Néanmoins, il peut être retenu qu'une augmentation du dosage ne pourra être que bénéfique à la durabilité de l'ouvrage soumis à ce type de sollicitation.

VI.2.2. Circulation d'eau

VI.2.2.1. Lien entre durabilité et processus physico-chimiques

Les résultats obtenus dans les chapitres précédents ont permis de déterminer les différents processus physico-chimiques intervenant au cours d'une circulation d'eau. Il a ainsi été montré qu'une circulation d'eau menait à une compétition entre :

- des processus de dissolution/décalcification, c'est-à-dire de dissolution de la chaux inutilisée et de la portlandite formée, mais aussi, de décalcification des produits cimentaires, ceux-ci se produisant vraisemblablement dans les macropores ($> 1 \mu\text{m}$) où le flux d'eau se concentre ;
- et des processus de précipitation, c'est-à-dire de formation des produits cimentaires, ceux-ci se produisant au contraire dans les micropores, où la circulation d'eau est moindre et où les conditions physico-chimiques sont plus favorables à la formation de ces composés.

La figure 41 permet de schématiser grossièrement l'ensemble de ces phénomènes.

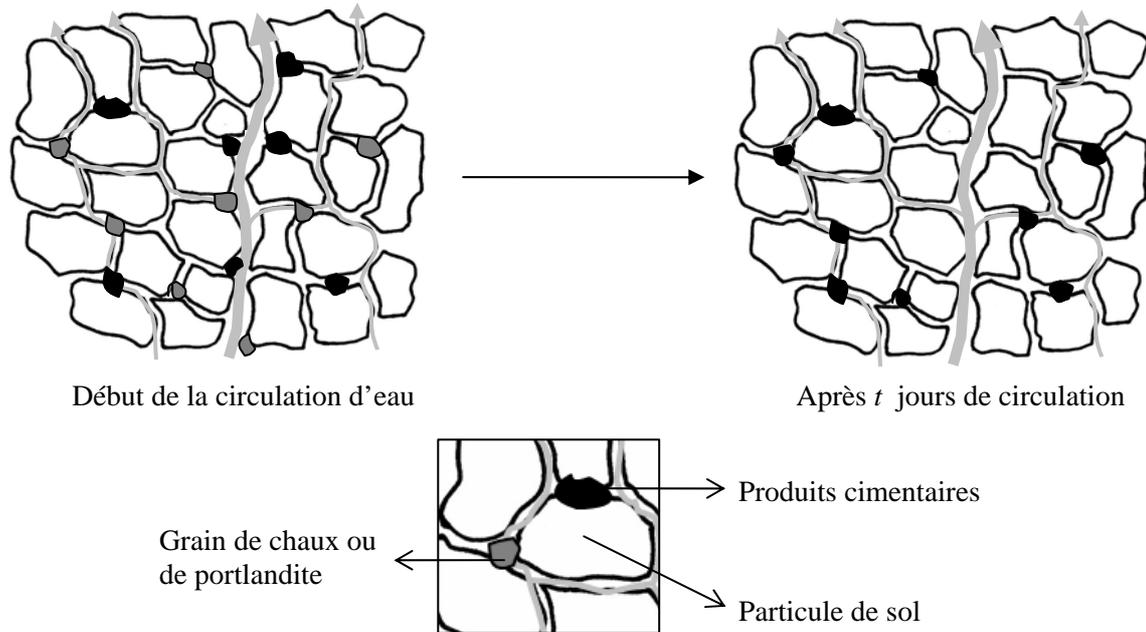


Figure 41. Schéma de principe des différents processus physico-chimiques mis en jeu lors de l'exposition d'un sol traité à la chaux à une circulation d'eau.

Il a été constaté que l'évolution de la perméabilité du limon de Jossigny au cours de la circulation d'eau résultait de la compétition entre ces processus. Toutefois, il a été observé, quels que soient le dosage en chaux et les conditions de compactage considérés dans cette étude, que la prépondérance de l'un ou l'autre de ces processus au cours de la circulation d'eau n'avait pas d'effet significatif sur l'évolution de la perméabilité du sol. Ceci a été attribué aux trop faibles quantités de produits cimentaires formés ou lessivés, mais aussi, au fait que les produits cimentaires précipitent préférentiellement dans les micropores, dont la modification affecte peu la perméabilité du sol.

Il a aussi été noté que le maintien des performances mécaniques pouvait être relié à l'ampleur de ces différents processus physico-chimiques. Néanmoins, contrairement à la perméabilité, il a été constaté que la prépondérance de l'un ou l'autre de ces processus avait un effet significatif sur la performance mécanique. Ainsi, plus les processus de dissolution sont forts, plus les pertes de performances sont fortes. Au contraire, plus ils sont faibles, moins les pertes de performances sont importantes.

Finalement, il a été constaté que l'ampleur de chacun de ces processus était fonction du dosage en chaux ajouté, mais surtout, de la perméabilité du sol, et donc comme il a été montré dans le paragraphe précédent, des conditions de compactage et du dosage en chaux. En effet, il a été observé qu'une augmentation de la perméabilité du sol conduisait, par

opposition à une faible perméabilité, à une amplification des phénomènes de dissolution. Ces phénomènes ont été mis en évidence par l'augmentation de la cinétique des quantités de calcium lessivé pour un temps de circulation donné (cf. chapitre V, article 3, tab.2 et tab. 3).

Dans ce contexte, on s'attachera dans la suite de cette partie à préciser l'influence des paramètres pouvant être contrôlés sur un chantier sur l'ampleur de ces processus. Ceci permettra de conclure quant aux conditions à favoriser pour assurer le maintien des performances mécaniques à long terme dans le cas d'un sol traité à la chaux exposé à une circulation d'eau. Le rôle de ces paramètres sur l'évolution de la perméabilité ne sera néanmoins pas abordé dans cette partie, celle-ci ne dépendant vraisemblablement pas, du moins dans le cas du limon de Jossigny et donc probablement des sols limoneux en général, de l'ampleur de ces processus.

VI.2.2.1. Effets du dosage en chaux

Il a été déterminé que la résistance à la compression simple du limon de Jossigny traité après exposition à une circulation d'eau était essentiellement fonction de la quantité d'eau ayant traversé le sol et donc de la perméabilité initiale du sol.

Il a ainsi été constaté, exception faite de quelques éprouvettes traitées à 1 % de chaux et compactées à leur optimum Proctor pour lesquelles de fortes pertes de résistances ont été observées, que le dosage en chaux avait peu d'influence sur la résistance à la compression simple obtenue après exposition du sol à une circulation d'eau. Ceci a été attribué, comme il l'a été souligné dans la partie précédente, à la faible influence que présente le dosage en chaux sur la perméabilité initiale du sol. En effet, il a été noté, dans les cas où la perméabilité des sols traités à 1 % et 3 % de chaux était du même ordre de grandeur, que leurs résistances à la compression simple étaient similaires pour un temps de circulation donné (fig. 42). Les fortes pertes de résistances à la compression simple observées pour certaines des éprouvettes traitées à 1 % de chaux et compactées à leur optimum (de l'ordre de 80 % dès 90 jours de circulation) ont été attribuées aux fortes perméabilités que ces éprouvettes présentent par comparaison aux autres éprouvettes du même type (fig. 42) : ces fortes perméabilités étant vraisemblablement dues, comme expliquées précédemment, à la faible quantité de chaux que représente ce dosage.

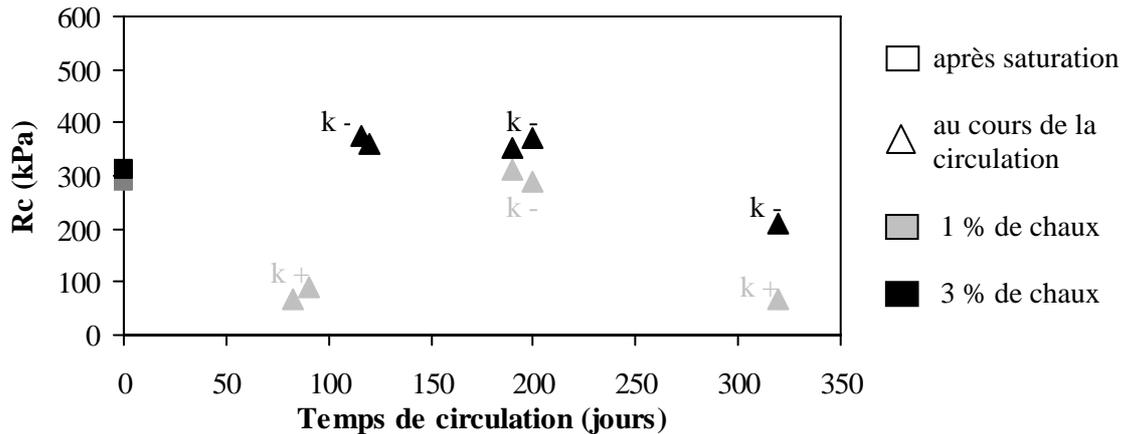


Figure 42. Évolution de la résistance à la compression simple du limon de Jossigny compacté à l'optimum Proctor en fonction du dosage en chaux, de la perméabilité du sol (k+ : forte perméabilité et k- : faible perméabilité) et du temps de temps de circulation.

Par ailleurs, il a aussi été observé que la résistance à la compression simple du limon de Jossigny traité à 3 % de chaux était, pour un temps de circulation donné et une condition de compactage donnée, légèrement supérieure à celle du limon de Jossigny traité à 1 % de chaux. L'hypothèse avancée pour expliquer l'origine de ce phénomène repose sur le fait qu'une addition de chaux à un dosage supérieur à celui du PFC (ici 3 % de chaux) favorise les processus de précipitation à plus long terme, en maintenant des conditions favorables à la formation d'une quantité significative de produits cimentaires (c'est-à-dire un fort pH). Par opposition, l'ajout de 1 % de chaux (ici PFC du sol) ne permet pas le maintien de ces conditions à aussi long terme (fig. 43).

Il a aussi été constaté que l'influence du dosage en chaux sur les performances mécaniques pouvait être discutée selon le critère mécanique retenu, c'est-à-dire résistance à la compression simple ou résistance au triaxial. En effet, il a été noté, par opposition à la résistance à la compression simple, que le dosage en chaux semblait avoir un effet non négligeable sur les paramètres de résistance au cisaillement du sol après percolation (cf. chapitre V, article 3, tab. 3). Ainsi, il a été observé que les paramètres de résistance au cisaillement étaient maintenus après 200 jours de percolation, dans le cas d'un traitement à 3 % de chaux, à ceux obtenus avant sollicitation. Au contraire, dans le cas d'un traitement à 1 % de chaux et un temps de circulation plus faible de 150 jours, les paramètres de résistance au cisaillement du sol traité étaient plus faibles que ceux observés avant sollicitation, et comparables à ceux du limon non traité. L'origine de ces différences de comportement entre résistance à la compression et résistance au triaxial reste inexplicée. Néanmoins, il a été

avancé que les différents temps de cure auxquels les essais de résistances au cisaillement ont été conduits (50 jours et 90 jours au lieu de 25 jours) pourraient être à l'origine de ces différences de comportement. Par ailleurs, il peut être noté, au contraire des essais de résistance à la compression, que les essais de résistance au triaxial n'ont été conduits que sur une seule série d'éprouvette. Des essais complémentaires doivent donc être réalisés pour vérifier, d'une part les résultats obtenus, et d'autre part, confirmer l'hypothèse avancée.

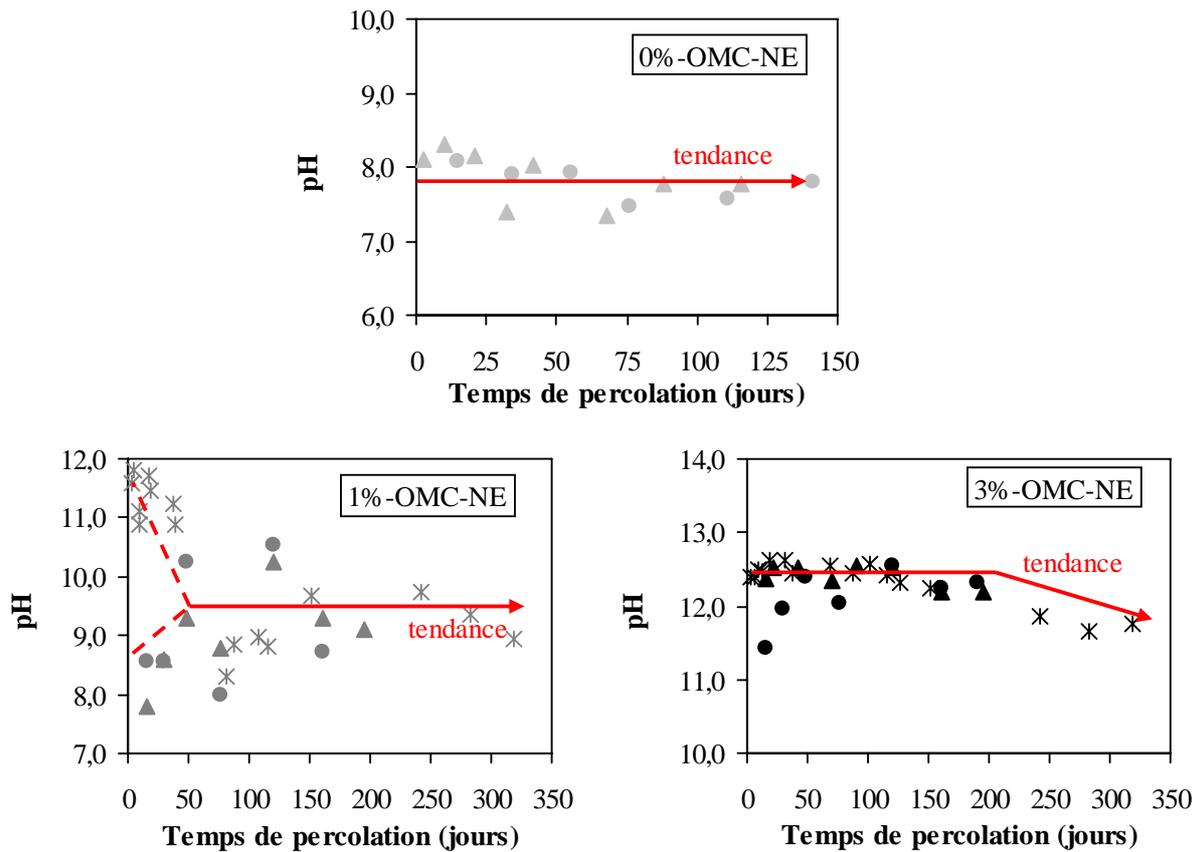


Figure 43. Évolution du pH des lixiviats du limon de Jossigny compacté à l'optimum Proctor en fonction du dosage en chaux et du temps de circulation.

Finalement, il apparaît difficile, compte tenu des contradictions notées entre résistance à la compression simple et résistance au triaxial, mais aussi de la variabilité de perméabilité induite par l'ajout de chaux dans le cas du dosage équivalent au PFC du sol, de conclure de manière tranchée sur l'influence du dosage en chaux sur le maintien des performances mécaniques. Toutefois, il apparaît que l'utilisation d'un dosage en chaux supérieur au PFC du sol permet de lever toute ambiguïté quant au maintien à long terme de la performance mécanique obtenue après exposition du sol à une circulation d'eau.

VI.2.2.1. Effets des conditions de compactage

Il a été constaté que l'ampleur des processus dépendait de la perméabilité initiale du sol, les fortes perméabilités favorisant les processus de dissolution, et donc, les pertes de résistances. À partir de la discussion menée dans la première partie de ce chapitre sur l'effet des conditions de compactage sur la perméabilité initiale du sol, il peut être conclu qu'un compactage du côté humide ou qu'une augmentation de l'énergie de compactage sont favorables à l'obtention d'une faible perméabilité initiale, et donc, au maintien de la performance mécanique à long terme.

VI.2.3. Conclusion

L'influence des paramètres pouvant être contrôlés sur chantier sur les processus de dissolution et de précipitation intervenant suite à une circulation d'eau dans un sol limoneux exposé à une circulation d'eau a été mise en évidence dans cette seconde partie et est récapitulée dans le tableau 21.

Tableau 21. Récapitulatif de l'influence du dosage en chaux et des conditions de compactage sur les processus physico-chimique intervenant au cours d'une circulation d'eau.

Conditions de compactage	Dosage en chaux équivalent au PFC du sol	Dosage en chaux supérieur au PFC du sol
OMC-LE	Dissolution ++ Précipitation --	Dissolution ++ Précipitation --
OMC-NE	Dissolution +/++ Précipitation -/+	Dissolution + Précipitation +
WMC-NE	Dissolution - Précipitation +	Dissolution -- Précipitation ++

* OMC = teneur en eau optimale, WMC = côté humide, LE = sous compactage, NE = compactage à énergie normale.

Il peut être conclu à partir de ce tableau qu'un sous-compactage favorise les processus de dissolution. Il apparaît, par ailleurs, que le dosage en chaux n'a pas d'influence significative sur l'ampleur de l'un ou l'autre des processus pour cette condition de compactage. Un compactage à l'optimum semble être un bon compromis entre processus de dissolution et de précipitation, excepté dans certain cas pour un traitement au PFC du sol. Un compactage du côté humide permet, quant à lui, de limiter les processus de dissolution, et à

l'inverse, de favoriser les processus de précipitation, notamment dans le cas d'un traitement à une teneur en chaux supérieure au PFC du sol. Finalement, il peut être conclu, qu'en terme de durabilité, l'utilisation d'un fort dosage en chaux et d'un compactage du côté humide apparaissent comme les meilleures conditions.

VI.3. CONCLUSION

Ce chapitre a été l'occasion de replacer les résultats de cette recherche dans un cadre plus proche de celui de la pratique dans le but d'optimiser la réutilisation de sols limoneux traités à la chaux pour la construction d'ouvrages hydrauliques ou de remblais en zone inondable. L'influence d'un certain nombre de paramètres pouvant être contrôlés lors de la phase de construction, c'est-à-dire du dosage en chaux et conditions de compactage (teneur en eau et énergie de compactage), sur l'efficacité du traitement à court terme et sa durabilité à long terme a été mis en évidence.

Ce chapitre a permis de mettre en avant l'intérêt de traiter un sol à une teneur en chaux supérieure au PFC du sol de façon à assurer d'une meilleure homogénéité du traitement ainsi qu'une meilleure résistance des ouvrages à long terme vis-à-vis des différentes conditions hydriques auxquelles ils peuvent être soumis. Il semble par ailleurs ressortir de ce chapitre que le choix des conditions de compactage pour le concepteur et le constructeur doit résulter d'un compromis entre la recherche d'une performance à court terme, qui est privilégiée par un compactage à l'optimum, et une performance maintenue assurément à long terme, privilégiée par un compactage du côté humide. En effet, bien qu'un compactage du côté humide apparaisse très intéressant en terme de durabilité, l'efficacité du traitement à court terme pour cette condition reste peu importante. Finalement, ce chapitre a permis de montrer qu'un sous-compactage du sol, et donc un défaut de compactage, s'avère très pénalisant à la fois à court et long terme.

Finalement, il peut être constaté à l'issue de ce travail que l'influence d'un certain nombre de paramètres pouvant être contrôlés sur chantier resterait à évaluer pour compléter tout à fait cette étude. Ainsi, parmi les différentes conditions de compactage possible, il reste à déterminer l'influence d'un sur-compactage ou d'un compactage du côté sec sur l'efficacité du traitement et la durabilité des ouvrages. De même, il serait intéressant de poursuivre cette étude en prenant en compte l'influence du mode de compactage, c'est-à-dire dynamique, statique ou pétrissage. Cette étude s'est, par ailleurs, limitée à l'influence d'un traitement au

PFC du sol et à un traitement légèrement supérieur à ce dosage. Il pourrait être intéressant de compléter ce travail pour des dosages en chaux bien supérieurs au PFC du sol.

Il apparaît aussi nécessaire de rappeler que les résultats obtenus pour les différentes sollicitations considérées dans ce travail (circulation d'eau et immersion) ne sont à priori valables que pour les conditions de sollicitation utilisées : c'est-à-dire eau déminéralisée pour liquide perméant et fort gradient hydraulique de 80. Une des perspectives à ce travail serait donc de conduire des essais complémentaires avec d'autres types d'eau et gradients hydrauliques de façon à conclure quant à leurs influences exactes sur les résultats obtenus. Il serait en particulier intéressant de conduire une étude avec des gradients hydrauliques moins importants et des eaux de pluies ou de canaux afin de s'approcher au plus près des conditions réelles auxquelles les ouvrages hydrauliques ou remblais en zone inondable peuvent être soumis.

De plus, ces recherches ont été menées en laboratoire sur un seul sol. Il apparaît ainsi nécessaire avant de généraliser ces résultats à l'ensemble des sols limoneux pouvant être traités à la chaux de conduire une étude similaire sur d'autres sols fins. Enfin, une confrontation entre comportement en laboratoire et comportement sur des ouvrages grandeur nature apparaît comme une étape nécessaire pour un transfert des résultats obtenus vers la pratique.

Conclusion générale

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre des recherches visant à optimiser l'emploi des sols fins traités à la chaux dans le domaine des terrassements. L'objet de ce travail était de déterminer la possibilité et les conditions de l'utilisation des sols limoneux traités à la chaux pour la construction d'ouvrages hydrauliques ou de remblais en zone inondable. Plus concrètement, on a évalué au cours de ce travail :

1. la durabilité du traitement à la chaux, et donc l'évolution des performances mécaniques et de la perméabilité des sols limoneux traité à la chaux, face aux sollicitations hydriques auxquelles les ouvrages hydrauliques ou remblais en zone inondable peuvent être soumis au cours de leur vie : contact prolongé à l'eau et/ou circulation d'eau ;
2. l'effet de la chaux et des conditions de compactage sur la perméabilité des sols, la fonction première des ouvrages hydrauliques étant de maintenir l'eau.

Pour ce faire, cette étude s'est focalisée sur un sol limoneux (le limon de Jossigny) traité à différents dosages en chaux et compacté à différents teneurs en eau et énergies de compactage. Deux dispositifs expérimentaux ont été mis au point pour simuler les deux sollicitations hydriques auxquelles les ouvrages hydrauliques ou remblais en zones inondables peuvent être soumis : un dispositif d'immersion et un dispositif de percolation. Ces dispositifs ont permis de suivre, d'une part, le comportement géotechnique du sol étudié (perméabilité, résistance mécanique), et d'autre part, son comportement physico-chimique (suivi du pH et des concentrations en calcium, silicium et aluminium des lixiviats) et microstructural (observations microscopiques et essais de porosimétrie au mercure), ces deux derniers aspects étant apparus, au travers de la synthèse bibliographique réalisée, comme des étapes préalables à la détermination de l'origine de l'évolution du comportement mécanique et hydraulique des sols traités à la chaux.

Les résultats physico-chimiques obtenus ont montré que le comportement physico-chimique des sols traités à la chaux exposés à une circulation d'eau résulte d'une compétition entre les processus de dissolution/décalcification et les processus de précipitation : les

processus de dissolution/décalcification se produisent vraisemblablement dans les gros pores, où le flux de circulation est important, en revanche, les processus de précipitation ont lieu plutôt dans les petits pores, où la circulation est moins importante et où les conditions sont plus favorables à la formation de produits secondaires. Ce travail n'a toutefois pas permis de quantifier ces processus. Néanmoins, il a été établi que l'ampleur de ces processus était une fonction de la perméabilité du sol et du dosage en chaux ajouté. Ainsi, un faible dosage en chaux et une forte perméabilité favorisent les processus de dissolution/décalcification. Au contraire, un fort dosage en chaux et une faible perméabilité limitent les processus de dissolution/décalcification et favorisent les processus de précipitation.

Ces résultats ont permis de préciser l'origine de l'évolution du comportement hydraulique et mécanique des sols traités au cours d'une circulation d'eau. Il a ainsi été déterminé que la perméabilité et les performances mécaniques des sols traités exposés à une circulation d'eau résultent de la prépondérance de l'un ou l'autre de des processus physico-chimiques : les processus de dissolution/décalcification mènent, à l'inverse des processus de précipitation, à une baisse des performances mécaniques, mais aussi à une ouverture de la porosité, et donc, à une augmentation de la perméabilité. Il a néanmoins été montré, dans le cas particulier des sols limoneux, que l'effet de ces processus sur la perméabilité des sols semble fortement modulée par la faible ampleur de ces derniers, c'est-à-dire par les faibles quantités de produits cimentaires formés et/ou lessivés. De plus, la précipitation des produits cimentaires n'étant pas, a priori, homogène dans le sol (concerne plutôt les micropores), son influence sur la perméabilité est assez limitée.

Ce travail a aussi permis, en se basant sur l'évolution de la microstructure du sol traité pour différentes conditions de compactage et différents dosages en chaux, d'établir un premier cadre théorique pour évaluer et prévoir la perméabilité des sols limoneux traités à la chaux. Il a ainsi été montré qu'un traitement à un fort dosage en chaux permet d'assurer une faible perméabilité. Il a également été montré que, quel que soit le dosage en chaux considéré, la microstructure et la perméabilité des sols limoneux traités à la chaux évoluent de la même manière que celles des sols non traités, lorsque ceux-ci sont compactés à différentes teneurs en eau et énergies de compactage. Ainsi, plus la teneur en eau de compactage est forte, et plus l'énergie de compactage est importante, plus la texture du sol est fermée, et plus sa perméabilité est faible.

L'ensemble des résultats obtenus a été replacé dans un cadre un peu plus proche de celui de la pratique. L'objectif de cette étude était de conclure quant aux conditions initiales pouvant être contrôlés sur un chantier à favoriser, de manière à optimiser les effets du traitement à la chaux sur les sols limoneux à court terme et long terme. Il a été mis en évidence l'intérêt de traiter un sol à une teneur en chaux supérieure au PFC du sol de façon à assurer une meilleure homogénéité du traitement et une meilleure résistance des ouvrages à long terme vis-à-vis des différentes conditions hydriques auxquelles ils peuvent être soumis. De plus, il a aussi été montré que le choix des conditions de compactage pour le concepteur et le constructeur doit résulter d'un compromis entre la recherche d'une performance à court terme, qui est privilégiée par un compactage à l'optimum, et une performance maintenue assurément à long terme, qui est privilégiée par un compactage du côté humide. Il a enfin été montré qu'un sous-compactage du sol, et donc un défaut de compactage, s'avère très pénalisant tant qu'à court et long terme.

Finalement, les résultats ont mis en avant le rôle primordial de l'ampleur des processus physico-chimiques sur le comportement des sols traités soumis à une circulation d'eau. Toutefois, les résultats obtenus dans ce travail ne s'appliquent, à priori, qu'aux conditions de circulation étudiées : eau déminéralisée et fort gradient hydraulique de 80. Il serait donc intéressant de compléter cette étude en réalisant des essais sous différents gradients hydrauliques et avec différentes solutions perméantes de façon à évaluer leur influence sur les différents processus physico-chimiques mis en jeu ainsi que leur ampleur.

De même, l'influence d'un certain nombre de paramètres pouvant être contrôlés sur un chantier sur l'efficacité du traitement à court terme et sa durabilité à long terme reste à approfondir. En effet, parmi les différentes conditions de compactage possible, il reste à déterminer l'influence d'un sur-compactage ou d'un compactage du côté sec sur l'efficacité du traitement et sa durabilité. De plus, il serait aussi intéressant de poursuivre cette étude en prenant en compte l'influence du mode de compactage, c'est-à-dire dynamique, statique ou pétrissage. Cette étude s'est par ailleurs limitée à l'influence de deux dosages en chaux : point de fixation du sol et dosage légèrement supérieur à ce seuil. Il pourrait être intéressant de compléter ce travail avec d'autres dosages en chaux bien supérieurs au PFC du sol.

Enfin, ce travail a été mené en laboratoire sur un seul sol. Il apparaît ainsi nécessaire, avant de généraliser les résultats obtenus à l'ensemble des sols limoneux pouvant être traités à la chaux, de conduire une étude similaire sur d'autres sols fins. De plus, une confrontation entre comportement en laboratoire et comportement sur des ouvrages grandeur nature semble

être une étape nécessaire pour un transfert des résultats obtenus vers la pratique. Cette étape permettrait en particulier de pallier aux conditions de circulation particulières imposées au sol dans cette étude. En effet, la circulation a été imposée dans la direction ascendante, ce qui n'est pas nécessairement représentatif des conditions réelles auxquelles les ouvrages hydrauliques ou remblais en zone inondable peuvent être soumis.

Pour conclure sur les perspectives possibles, on doit souligner que les sollicitations hydriques étudiées dans ce travail ne représentent qu'une petite partie des sollicitations auxquelles ces ouvrages peuvent être soumis dans la réalité. En effet, ces ouvrages sont en plus exposés aux cycles saisonniers (cycles climatiques) qui résultent en une alternation de périodes humides et sèches et/ou de périodes chaudes et froides. Il apparaît aussi nécessaire de considérer l'effet de l'érosion causée par les phénomènes de surverses ou de vagues sur la durabilité de ces ouvrages, et notamment dans le cas des ouvrages hydrauliques qui sont vraisemblablement plus sujets à ces phénomènes.

BIBLIOGRAPHIE

- Adenot F. (1992). *Durabilité du béton : caractérisation et modélisation des processus physiques et chimiques de dégradation du ciment*. Thèse de l'Université d'Orléans.
- Anday M.C. (1961). Accelerated curing for lime-stabilized soil. *Highway Research Board*, n°204, Washington D.C., pp. 1-13.
- Andra (2001). *Référentiel matériaux, tome 3: les matériaux cimentaires*. Andra, C.RP.AMAT.01.160, 371 p.
- Arabi M., Wild S. (1989). Microtextural development in cured soil-lime composites. *Journal of Material Sciences*, vol. 21, pp. 497-503.
- Bagonza S., Peete J.M., Freer-Hewish R., Newill D. (1987). Carbonation of stabilized soil-cement and soil-lime mixture. *Actes du Colloques PTRC, Transport and Planning Summer Annual Meeting*, Université de Bath, pp. 29-48.
- Balasubramaniam A.S., Buensuceso B.R. (1989). On the overconsolidated behaviour of lime-treated soft clay. *Actes de la 11^{ème} Conférence Internationale sur la Mécanique des Sols et les Fondations*, Rio de Janeiro, Brésil. pp. 35-30.
- Balasubramaniam A.S., Buensuceso B.R., Oh E.Y., Bolton M., Bergado D.T., Lorenzo G.A. (2005). Strength degradation and critical state seeking behaviour of lime treated soft clay. *Conférence Internationale Deep Mixing'05, Best Practice and Recent Advances 1*, Stockholm, Suède, pp. 35-40.
- Bell F.G (1996). Lime stabilization of clay minerals and soil. *Engineering Geology*, vol. 42, pp. 223-237.
- Bentz D., Garbocz E. (1992). Modelling the leaching of calcium hydroxide from cement paste: effects on pore space percolation and diffusivity. *Material and Structures*, vol. 25, pp. 523-533.
- Bin S., Zhibin L., Yi C., Xiaoping Z. (2007). Micropore structure of aggregates in treated soils. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, vol. 19, pp. 99-105.

- Boardman D.I., Glendinning S., Rogers C.D.F. (2001). Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes. *Géotechnique*, vol. 50, n°6, pp. 533-543.
- Bourbon X. (2001). *Réactivité chimique et données élémentaires sur les principaux hydrates des matériaux cimentaires*. Andra, C.RP.AMAT.01.033/A.
- Brandl H. (1981). Alteration of soil parameters by stabilization with lime. *Actes de la 10^{ème} Conférence Internationale sur la Mécanique des Sols et les Fondations*, Stockholm, Suède, pp. 587-594.
- Carde C., François R., Torrenti J.M. (1996). Leaching both calcium hydroxyde and C-S-H from cement paste : modelling the mechanical behaviour. *Cement and Concrete Research*, vol. 26, pp. 1257-1268.
- Carde C., François R. (1997). Effect of ITZ leaching on durability of cement based materials. *Cement and Concrete Research*, vol. 27, pp. 971-978.
- Caillière S., Hénin S., Rautureau M. (1982). *Minéralogie des argiles: 1. Classification et propriétés physico-chimiques*. INRA, Actualités scientifiques et agronomiques, 8, Ed. Masson, Paris, 2^{ème} édition, 189 p.
- Caillière S., Hénin S., Rautureau M. (1982). *Minéralogie des argiles: 2. Classification et nomenclature*. INRA, Actualités scientifiques et agronomiques, 9, Ed. Masson, Paris, 2^{ème} édition, 189 p.
- Choquette M., Berube, M.A., Locat J. (1987). Mineralogical and microtextural changes associated with lime stabilization of marine clays from eastern Canada. *Applied Clay Science*, vol. 2, pp. 215-232.
- Cui Y.J. (1993). *Etude du comportement d'un limon compacté non saturé et de sa modélisation dans un cadre élastoplastique*. Thèse de l'ENPC, 190 p.
- Cui Y. J., Delage P. (1996). Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. *Géotechnique*, vol. 46, No. 2, pp. 291-311.
- Cui Y.J., Delage P., Alzoghbi P. (2003). Retention and transport of a hydrocarbon in a silt. *Géotechnique*, vol. LIII, No 1, pp. 83-91.

- Cuisinier O., Masrouri F., Pelletier M., Villiéras F., Mosser-Ruck R. (2008). Microstructure of a compacted soil submitted to an alkaline plume. *Applied Clay Science*, vol. 40, pp. 159-170.
- Danyluk L.S. (1986). *Stabilization of fine-grained soil for road and airfield construction*. Report n°AK-RD-86-30, Department of Transportation and Public Facilities, State of Alaska, USA, 27 pp.
- Delage P., Audiguier M., Cui Y.J., Howat M. (1996). Microstructure of a compacted silt. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 33, pp. 150-158.
- Delagrave A., Pigeon M., Marchand J., Revertegat E. (1996). Influence of chloride ions and pH level on the durability of high performances pastes. *Cement and Concrete Research*, vol. 26, pp. 749-760.
- De Bel R., Bollens Q., Duvigneaud P.H., Verbruge J.C. (2005). Influence of curing time, percolation and temperature on the compressive strength of a loam treated with lime. *Colloque International TREMTI*, papier n°C022, 10 p.
- Diamond S., Kinter E.B. (1965). Mechanisms of soil-lime stabilization. *Highway Research Record*, n°92, pp. 83-102.
- Eades J.L., Grim R.E. (1960). Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. *Highway Research Board Bulletin*, n° 262, pp. 51-63.
- Eades J.L., Grim R.E. (1966). A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. *Highway Research Board Bulletin*, n°139, pp. 61-72.
- El-Rawi N.M., Awad A.A.A. (1981). Permeability of lime treated soils. *Transportation Engineering Journal*, ASCE, vol. 107, pp. 25-35.
- Estéoule J., Perret P. (1979). Étude expérimentale des phénomènes de stabilisation des sols fins par la chaux. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n°99, pp. 99-109.
- Ferber V. (2005). *Déformations induites par l'humidification des sols fins compactés : apport d'un modèle de microstructure*. Thèse de l'ECN.

- Ferber V., Auriol J.C., Cui Y.J., Magnan J.P. (2008). Wetting-induced volume changes in compacted silty clays and high-plasticity clays. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 45, pp. 252-265.
- Fossberg P.E. (1965). Some fundamentals engineering properties of a lime-stabilized clay. *Acte de la 6^{ème} Conférence Internationale sur la Mécanique des Sols et les Fondations*, Montréal, Canada, pp. 221-225.
- Garcia-Bengochea I., Lovell C.W., Altchaefl A.G. (1979). Pore distribution and permeability of silty clays. *Journal on the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol. 105, pp. 839-856.
- Glasser F.P., Marchandand J., Samson E. (2008). Durability of concrete - Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. *Cement and Concrete Research*, vol. 38, n°2, pp. 226-246.
- Glenn G.R., Handy L. (1963). Lime-clay mineral reaction products. *Highway Research Record*, n°29, pp. 70-82.
- Goldberg I., Klein A. (1952). Some effects of treating expensive clays with calcium hydroxide. *ASTM Special Technical Publication*, vol. 142, pp. 53-67.
- Guney, Y., Sari, D., Cetin, M. and Tuncan, M. 2007. Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilised soil. *Building and environment*, vol 42, pp. 681-688.
- Hadji-Djafari S., Wright J.C. (1983). Determining the long term effects on interactions between waste permeants and porous media. *Hazardous and Industrial Solid Waste Testing*, ASTM STP 805, Philadelphie, Pennsylvanie, pp. 246-264.
- Haworth A., Sharland S.M., Tweed C.J. (1989). Modelling the degradation of cement in a nuclear waste repository. *MSR. Symposium Proceedings*, n°127, pp. 447-454.
- Heukamp F.H., Ulm F.J., Germaine J.T. (2001). Mechanical properties of calcium leached cement pastes – Triaxial stress states and the influence of the pore pressures. *Cement Concrete and Research*, vol. 31, pp. 761-774.
- Hilt G.H., Davidson D.T. (1960). Lime fixation on clayey soils. *Highway Research Board Bulletin*, n°262, pp. 20-32.

- Holtz W.G (1999). *Introduction à la géotectonique*. Presses Internationales Polytechniques, Québec, Canada.
- Horn M.E. (1968). *Clays in Arkansas soils*. Arkansas State Highway Department Report, USA.
- Ingles O.G. (1970). Mechanisms of stabilization with inorganic acid and alkalies. *Australian Journal Research*, vol. 8, pp. 81-95.
- Khatab S., Al Mukhtar M., Fleureau J.M., Alcover J.F., Bergaya F. (2001). Microstructure d'une argile gonflante traitée à la chaux. *Actes de la 15^{ème} Conférence Internationale sur la Mécanique des Sols et la Géotechnique*, Istanbul, Turquie, pp. 1771-1774.
- Khatab S.A., Al-Mukhtar M., Fleureau J.M (2007). Long term stability characteristics of a lime treated plastic soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, vol. 19, n°4, pp. 358-366.
- Little D.N. (1995). *Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime*. National Lime Association, Arlington, 219 p.
- Le Borgne T. (2006). Relation entre l'état initial et la perméabilité des sols fins traités à la chaux. Rapport de stage Master 2 de l'Université de Clermont-Ferrand, 102 p.
- Le Gressus C. (1995). Microscopie électronique à balayage. *Techniques de l'ingénieur, Analyse et caractérisation*, P 865, 22 p.
- Le Roux A. (1971). Le microscope à balayage électronique : application à l'étude des marnes. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n°54, pp. 6-13.
- Locat J., Bérubé M.A., Choquette M. (1990). Laboratory investigations on the lime stabilisation of sensitive clays: shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 27, pp. 294-304.
- Locat J., Trembaly H., Leroueil S. (1996). Mechanical and hydraulic behaviour of a soft inorganic clay treated with lime. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 33, pp. 654-669.
- Loughnan F.C. (1969). *Chemical Weathering of silicate minerals*. Ed. New York: Elsevier, 154 p.

- Machan G., Squier L.R., Diamond S., Leo E. (1977). Laboratory study of the effectiveness of cement and lime stabilisation for erosion control. *Transportation Research Record*, n°641, pp. 24-28.
- Malhotra B.R., Bhaskar S.K. (1983). Leaching phenomenon in lime soil mix layers. *Highway Research Bulletin*, New Delhi, n°22, pp. 15-25.
- Mathew P.K., Rao S.N. (1997). Effect of lime on cation exchange capacity of marine clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 123, n°2, pp. 183-185.
- McCallister L.D. (1990). *The effects of leaching on lime-treated expansive clays*. Thèse de l'Université du Texas, Arlington, 417 p.
- McCallister L.D, Petry T.M. (1992). Leach tests on lime-treated clays. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 15, n°2, pp. 106-114.
- Mitchell J.K., (1993). *Fundamentals of soil behaviour*. 2ème Ed. John Wiley & Sons, 437 p.
- Nalbantoglu Z., Tuncer E.R. (2001). Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 38, pp. 154-160.
- Nguyen V.H., Colina H., Torrenti J.M., Boulay B., Nedjar B. (2007). Chemo-mechanical coupling behaviour of leached concrete – Part I: Experimental results. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 237, pp. 2083-2089.
- Nonat A., Lecoq X. (1997). The structure, stoichiometry and properties of C-S-H prepared by C3S hydration under controlled solution. Dans P. Colombet, A.-R. Grimmer, H. Zanni, P. Sozzani (Ed.), *Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy of Cement Based Materials*, Springer, Berlin, pp. 197– 207.
- Ormsby W.C. (1973). Strength Development and reaction products in lime treated montmorillonite water system. *Public Road Research*, vol. 37, n°4, pp. 136-148.
- Osula D. O. A. (1996). A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. *Engineering Geology*, vol 42, n°1, pp. 71-81.
- Perret P. (1979). Application pratique des nouvelles données expérimentales relatives à la stabilisation des sols fins par la chaux. *Bulletin de liaison des Laboratoires Ponts et Chaussées*, n°99, pp. 110-118.

- Petry T.M., Berger E.A. (2006). Impact of moisture content on strength gain in lime-treated soils. *Transportation Research Board, 85th annual meeting*, article n°06-2764, 16 p.
- Rajasekaran G., Rao S. (1999). Microstructure of lime stabilized marine clay. *Ocean Engineering*, vol. 24, pp. 867-878.
- Rajasekaran G., Rao S. (2002). Permability characteristics of lime treated marine clay. *Ocean Engineering*, vol. 29, pp. 113-127.
- Rallings R.A. (1971). The effect of pre-treatment moisture on the properties of cement and lime stabilized soils. *Australian Road Research*, vol. 4, pp. 10-31.
- Ranganatham B.V. (1961). Soil structure and consolidation characteristics of black cotton clay. *Géotechnique*, vol. 11, pp. 331-338.
- Rao S.M., Shivananda P. (2001). Swelling behaviour of lime-stabilized specimens after wetting and drying cycles. *Workshop in clay behaviour: chemico-mechanical coupling from nanostructures to engineering applications*, vol.2, Italy.
- Rao S.M., Shivananda P. (2005). Role of curing temperature in progress of lime-soil reactions. *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 23, pp. 79-85.
- Revertegat E., Richet C., Gegout G. (1992). Effect of pH on the durability of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, vol. 22, pp. 259-272.
- Rogers C.D.F., Glendinning S. (1996). *Modification of clays soils using lime*. Lime Stabilization, Thomas Telford Ed., Londres, pp. 99-112.
- Rogers C.D.F., Glendinning S. (2000). Lime requirements for stabilization. *Transportation Research Record*, n°1721, pp. 9-18.
- Saito H., Deguchi A. (2000). Leaching tests on different mortars using accelerated electrochemical method. *Cement Concrete and Research*, vol. 30, pp. 1815-1825.
- Stocker P.T. (1974). Diffusion and diffuse cementation in lime and cement stabilized clayey soils – Studies of plasticity and aggregation. *Australian Road Research*, vol. 5, n°6, pp. 51-75.

- Thompson M.R. (1966). Lime reactivity of Illinois soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol. 92, n° SM5, Septembre, pp. 67-92.
- Tognazzi C. (1998). *Couplages fissuration/dégradation chimique dans les matériaux cimentaires: caractérisation et modélisations*. Thèse de l'INSA de Toulouse.
- Tuncer E. R., Basma A. (1991). Strength and stress-strain characteristics of a lime-treated cohesive soil. *Transportation Research Record*, n°1295, pp. 70-79.
- Verhasselt A.F. (1990). The Nature of the Immediate Reaction of Lime in Treating Soils for Road Construction. *Physico-Chemical Aspects of Soil and Related Materials*, ASTM STP 1095, pp-7-17.
- Wild S., Arabi M., Rowlands G.O. (1986). Relation between pore size distribution, permeability, and cementitious gel formation in cured clay-lime systems. *Material Science and Technology*, vol. 3, n°12, pp. 1005-1011.
- Wissa A.E.Z. (1965). *Effective stress strength parameters of cemented soils*. Thèse du Massachusetts Institute of Technology, 320 p.
- Wissa A.E.Z., Ladd C.C., Lambe T.W. (1965). Effective stress strength parameters of stabilized soils. *Acte de la 6^{ème} Conférence Internationale sur la Mécanique des Sols et les Fondations*, Montréal, Canada, pp. 412-416.