



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

Direction Post-Graduation & Recherche Scientifique

Soutenance de Magister

Option : Matériaux et Structures

BENMISRA Fatima Zohra

Ingénieur d'État en Génie civil
Diplômé de l'université de Djelfa

Intitulé du Mémoire

ANALYSE DE LA REACTION SOL-CHAUX DANS LES SOLS STABILISES

Le 21/02/2013 à 09h00 à la salle de conférence

Devant le Jury composé de :

Président	:	BALI Abderrahim	Professeur	ENPA
Rapporteurs	:	DERRICHE Zohra	Professeur	ENSTP
		GUERIDI Fatima	Magister	ITTPB
Examineurs:		TAKI Mohamed	Maitre de conférences	ENSTP
		GUETTACHE Brahim	Maitre de conférences	ENSTP

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma chère mère

A mon père

A mes chères frères et sœurs

A mon mari Hassan

A toute ma famille.

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier le Tout Puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour arriver à ce stade et réaliser ce modeste travail.

J'exprime mes vifs remerciements et ma profonde gratitude tout particulièrement à ma directrice de mémoire Pr Zohra DERRICHE, qui m'a témoignée sa confiance dans l'élaboration de ce mémoire. Qu'elle accepte mes remerciements pour son minutieux suivi, l'intérêt qu'elle a accordé à mon travail et pour son encadrement soutenu et ses précieux conseils et encouragements pour mener à bien ce travail.

Je tiens aussi à adresser mes sincères remerciements à madame F. Gueridi pour son aide et sa compréhension et son support infini durant mon travail.

Je remercie également le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je remercie l'équipe du Laboratoire de l'Habitat et de la Construction Sud unité Djelfa, personnels, ingénieurs et techniciens qui m'ont grand ouvert leurs portes.

Je tiens autant à remercier monsieur A. Bensalem pour son aide et support infini durant mon travail expérimental.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble du personnel du CTTP Alger pour leurs aides.

Mes sincères remerciements et mon grand respect s'adressent aussi à mes collègues N. Bentamoune et K. Mabrouki pour leur soutien moral durant mes études à Alger.

J'exprime aussi mes grands remerciements à Dr M. Labloubia et madame Kalli pour sa présence avec les étudiants au laboratoire de recherche. Mes remerciements chaleureux vont aussi à Rachida, Hamida pour leurs soutiens infinis et leur compréhension. Je n'oublie pas de remercier madame Saksoui, et Othmane, des laboratoires de l'ENSTP ainsi que Bahloul, Mansouri et Briki du LNHC Sud.

J'exprime au terme de ce travail, ma profonde reconnaissance, ma gratitude et mon respect à mon grand frère Tayeb pour son aide continue, son soutien indéfectible et le grand intérêt qu'il a apporté à mes études.

Un grand merci pour mon mari et toute ma famille pour leur soutien.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance et ma gratitude à toutes celles et tous ceux qui m'ont aidé dans la préparation de ce mémoire.

Résumé :

Les améliorations apportées aux matériaux par la stabilisation à la chaux sont le résultat de réactions qui se produisent entre les éléments réactifs de la chaux et ceux du sol en présence d'eau. Ces réactions dépendent aussi de plusieurs autres paramètres tels que la température, le temps et les conditions de mise en œuvre. Par ailleurs, les contreperformances enregistrées sur les structures de chaussées à sols stabilisés à la chaux, souvent attribués au dosage inadéquat en chaux, aux mauvaises conditions de compactage ou aux défaillances de mise en œuvre restent largement inexpliquées. Ce qui atteste du fait que la réaction sol-chaux n'est pas encore complètement maîtrisée.

Dans le contexte du développement durable, on cherche à développer et à optimiser la technique du traitement des sols à la chaux à l'effet de pousser ses limites. On est conscient que cette recherche se doit de commencer par étudier les réactions sol-chaux et analyser les mécanismes qui les construisent. Le travail présenté dans ce mémoire tente une contribution dans cette direction. On essaie de faire ressortir la nature des réactions qui se produisent dans le processus de la stabilisation des sols à la chaux en analysant les effets géotechniques qui sont évalués comme résultats de ces réactions, sur le sol stabilisé.

On suggère sur la base des résultats obtenus l'existence d'une liaison chimique qui est responsable de l'irréversibilité des effets qui s'opèrent à long terme. Des études plus approfondies devraient élucider la nature exacte de cette liaison.

Mots clés : sol-chaux, réaction pouzzolanique, réaction immédiate, stabilisation, résistance, plasticité, pH, carbonatation, argile, gonflement, perméabilité, granulométrie, compactage, teneur en eau, densité sèche.

Abstract

Improvements brought about in lime stabilized soils are the result of reactions that occur between the reactive elements present in lime and soil in presence of water. These reactions are affected by several other parameters such as temperature, time and construction conditions. Moreover, under-performances recorded on pavement structures in lime stabilized soils, often attributed to inadequate lime percentage, poor compaction or poor quality construction remain largely unexplained and this demonstrates that the nature of sol-lime reaction is yet not fully understood.

In the context of sustainable development, we seek to develop and optimize the lime soil stabilization technique to extend its fields of application being aware that this research must begin by studying the soil-lime reactions and analyze the mechanisms that construct these reactions. The work presented in this dissertation attempts a contribution in this direction. We try to bring out the nature of the reactions that occur during the different phases of soil stabilization process by analyzing geotechnical effects that result of these reactions on the stabilized soil.

On the basis of the results obtained the existence of a chemical bond which is responsible for the irreversible effects that occur is suggested. Further studies should elucidate the exact nature of this reaction.

Keywords: Soil-lime pozzolanic reaction, immediate reaction, stabilization, strength, plasticity, pH, carbonation, clay, swelling, permeability, grain size, compaction, water content, dry density.

ملخص

إن التحسينات التي تحدث في التربة جراء معالجتها بالجير هي نتيجة لتفاعلات مختلفة تحدث بين عناصر متفاعلة في التربة وفي الجير بوجود الماء. هذه التفاعلات تتأثر أيضا بعوامل عدة مثل الوقت، درجة الحرارة وظروف التنفيذ. ومن جهة أخرى، فإن الأضرار المسجلة على هياكل الطرقات المنجزة على التربة المعالجة بالجير، والتي غالبا ما تنسب إلى اعتماد كمية غير كافية من الجير، ضعف عملية الرص أو سوء التنفيذ لا تزال غير مبررة إلى حد كبير. وهذا التفاعل الكيميائي بين التربة والجير لم يفهم بكيفية دقيقة..

في إطار التنمية المستدامة، تسعى الجهود لتطوير وتحسين أسلوب معالجة التربة بالجير لتوسيع حدود استعمالها. الكل يدرك أن البحث يجب أن يبدأ بدراسة أدق لتفاعل التربة والجير وتحليل الآليات التي يركز عليها.

يحاول العمل المقدم في هذا البحث تقديم مساهمة في هذا الاتجاه. ونحاول إبراز طبيعة التفاعلات التي تحدث في عملية تثبيت التربة بالجير. وذلك بتحليل الآثار الجيوتقنية المعتمد قياسها كنتائج لهذه التفاعلات على التربة المعالجة.

و على أساس النتائج المتحصل عليها يقترح وجود رابطة كيميائية مسئولة عن الآثار الدائمة التي تحدث على المدى الطويل. وينبغي إجراء المزيد من الدراسات لإلقاء الضوء على الطبيعة الفعلية لهذا التفاعل المقترح.

كلمات البحث: التربة والجير، رد فعل البوزولانية، رد فعل فوري، وتثبيت، والقوة، الليونة، ودرجة الحموضة، الكربنة الطين، انتفاخ، الرص، نسبة الماء، الكثافة الجافة.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Règle pour la sélection des additifs pour la stabilisation des sols.

Tableau 1.2 La classification du développement de la résistance des sols a stabilisés par l'addition de différents agents stabilisateurs (Ahnberg et al, 1995).

Tableau 1.3 Le choix d'additif approprié pour le traitement selon Anon (1999) : 1) très approprié, 2) satisfaisant, 3) non approprié.

Tableau 3.1 Analyse chimique de sol naturel

Tableau 3.2 Composition chimique de la chaux.

Tableau 3.3 Caractéristiques physiques de la chaux.

Tableau 3.4 Composition chimique de la bentonite.

Tableau 3.5 Synthèse des essais réalisés.

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Différents états de consistance du sol.

Figure 1.2 Triangle de gradation granulométrique pour l'aide à sélectionner le type d'additif.

Figure 1.3 La détermination du type de stabilisateur approprié d'après NLA (2004)

Figure 1.4 L'applicabilité des agents de stabilisation d'après Ingles et Metcalf (1972).

Figure 1.5 Limites d'évaluation recommandée pour différents types de sols (Assarson, 1968).

Figure 2.1 Cycle de la chaux.

Figure 2.2 Photos en MEB des échantillons compactés d'un sol argileux non traité et traité avec 10% de chaux après 120 jours de cure à 20°C (D'après Khattab (2002) cité par (Lasledj, 2009).

Figure 2.3 Effet de la chaux immédiate sur la maniabilité de sol (Puiatti, 2006).

Figure 2.4 La réaction pouzzolanique entre l'argile et la chaux (Puiatti, 2006).

Figure 2.5 Effet de la chaux à long terme sur le sol (Puiatti, 2006).

Figure 2.6 Effet de traitement sur la texture des particules argileuses.

Figure 2.7 Abaque pour la détermination de la teneur en chaux initiale (Geiman, 2005).

Figure 2.8 Effet de la chaux sur la plasticité de sol (Bell, 1996).

Figure 2.9 Variation de la consistance avec l'ajout de chaux (Gueridi, 2009).

Figure 2.10 Effet de l'addition de la chaux sur la plasticité d'après Sakr et al (2008).

Figure 2.11 Effet de temps de cure sur la plasticité d'après Sakr et al (2008)

Figure 2.12 Effet de la chaux sur le compactage (Mouissat, 2010).

Figure 2.13 Relation entre le potentiel de gonflement et l'indice de plasticité (Little, 1995).

Figure 2.14 Variation du potentiel de gonflement avec le taux de chaux à 28 jrs (Gueridi, 2009).

Figure 2.15 Variation du potentiel de gonflement avec le taux de chaux à 28 jrs (Gueridi, 2009).

Figure 2.16 Effet de la chaux sur la résistance mécanique (Kassim, 2004).

Figure 2.17 Variation de la RCS avec l'addition de la chaux pour : 1) La montmorillonite, 2) La Kaolinite et 3) Le quartz (Bell, 1996).

Figure 2.18 Evolution de la résistance à la compression simple avec l'ajout de chaux (Sakr et al, 2008).

Figure 2.19 Evolution de RCS pour 10% de chaux à différents temps de cure (Lasledj, 2009).

Figure 2.20 Variation de la résistance au cisaillement en fonction de dosage en chaux (Aissiou, 2009).

Figure 2.21 Variation des paramètres de cisaillement en fonction du pourcentage de chaux additionné pour les différentes durées de cure (Mellal, 2008).

Figure 2.22 Effet de la chaux sur la contrainte maximale de cisaillement (Mouissat, 2010).

Figure 2.23 Evolution des valeurs de pH du sol avec le temps de cure pour différents taux en chaux (Clare, 1988).

Figure 2.24 Variation du pH des mélanges sol-chaux avec le temps de cure et avec différents taux de chaux (Lasledj, 2009).

Figure 2.25 Evolution de la compressibilité de sol traité à 6% de chaux (Lasledj, 2009).

Figure 2.26 Evolution de l'indice de compressibilité de sol traité à la chaux (Lasledj, 2009).

Figure 2.27 Evolution de l'indice de recompressibilité de sol traité à la chaux (Lasledj, 2009).

Figure 2.28 La compressibilité de sol stabilisé à 4% de chaux (Rao, 2005).

Figure 2.29 La compressibilité de sol stabilisé à 7% de chaux (Rao, 2005).

Figure 2.30 Evolution de module oedométrique avec le temps et le pourcentage de chaux (Lasledj, 2009).

Figure 2.31 Effet de temps de cure et taux en chaux sur le module d'élasticité (Mouissat, 2010).

Figure 2.32 Evolution de la perméabilité avec le temps de sure et le pourcentage de chaux (Lasledj, 2009).

Figure 2.33 Procédé de traitement des sols (Dupraz, 2006).

Figure 2.34 Exemple de traitement de sol à la chaux.

Figure 3.1 Courbe granulométrique des matériaux utilisés.

Figure 3.2 Courbe de compactage des sols utilisés

Figure 3.3 Humidificateur.

Figure 3.4 Confection des échantillons pour la granulométrie à long terme.

Figure 3.5 Etapes de confection des éprouvettes pour l'essai de perméabilité et oedométrique.

Figure 3.6 Moule de confection des échantillons.

Figure 3.7 Eprouvette confectionnées pour l'essai de compression simple.

Figure 3.8 Mesure de pH à l'aide d'un pH-mètre.

Figure 3.9 Appareil de compression simple «Multi-Speed Tester» (Laboratoire de Mécanique des Sols, LNHC-Sud)

Figure 3.10 Appareil oedométrique (Laboratoire de Mécanique des Sols, Laghouat)

Figure 3.11 La courbe de consolidation selon la méthode de Casagrande.

Figure 3.12 Cellule oedométrique.

Figure 3.13 Courbe de compressibilité.

Figure 3.14 Appareil X Pert Pro aux rayons X (Laboratoire de physique, Laghouat).

Figure 4.1 Influence de la chaux sur les limites de consistance.

Figure 4.2 Evolution du pH en fonction de la chaux selon la méthode d'Eads et Grim (1966).

Figure 4.3 Influence de l'ajout de la chaux sur les paramètres de compactage du sol.

Figure 4.4 Influence de la chaux sur la masse volumique sèche maximale.

Figure 4.5 Influence de la chaux sur la teneur en eau optimale.

Figure 4.6 Evolution de la perméabilité immédiate du sol reconstitué avec différents pourcentage de chaux

Figure 4.7 Influence de l'ajout de chaux sur la courbe contrainte-déformation pour 02 jrs.

Figure 4.8 Effet de la chaux sur la résistance mécanique et la déformation axiale à 02jrs.

Figure 4.9 La plasticité du sol stabilisé à 7et 28 jrs de cure.

Figure 4.10 Effet du temps sur la distribution granulométrique du sol stabilisé.

Figure 4.11 Effet de condition de conservation sur la distribution granulométrique.

Figure 4.12 Mise en évidence de la carbonatation par phénolphtaléine (LERM, 2006)

Figure 4.13. Perméabilité du sol traité à 5% de chaux à différents temps de cure.

Figure 4.14. Perméabilité du sol traité à 9% de chaux à différents temps de cure.

Figure 4.15 L'évolution de la perméabilité avec différents pourcentages de chaux pour 07 jrs.

Figure 4.16 L'évolution de la perméabilité avec différents pourcentages de chaux pour 28 jrs.

Figure 4.17 L'évolution de la perméabilité avec différents pourcentages de chaux pour 60 jrs.

Figure 4.18 L'évolution de la perméabilité du sol traité à 5% et à 9% de chaux pour différents paliers de chargement.

Figure 4.19 Evolution de la perméabilité en fonction de temps de chargement.

Figure 4.20 Effet de la chaux sur la courbe oedométrique à 5% de chaux pour différents temps de cure.

Figure 4.21 Effet de la chaux sur la courbe oedométrique à 9% de chaux pour différents temps de cure.

Figure 4.22 Effet de la chaux sur le C_c pour différents temps de cure.

Figure 4.23 Effet de la chaux sur le C_g pour différents temps de cure

Figure 4.24 Effet de la chaux sur la pression de consolidation pour différents temps de cure.

Figure 4.25 Influence de l'ajout de chaux sur la courbe contrainte-déformation pour 28 jours.

Figure 4.26 Effet de la chaux sur la résistance mécanique et la déformation axiale pour 28jrs de cure.

Figure 4.27 Influence de l'ajout de chaux sur la courbe contrainte-déformation pour 07 jours.

Figure 4.28 Influence de l'ajout de chaux sur la courbe contrainte-déformation pour 14 jours.

Figure 4.29 Effet de la chaux sur la résistance mécanique pour différents temps de cure.

Figure 4.30 Evolution du pH en fonction du pourcentage de chaux pour 28 jrs de cure.

Figure 4.31 Courbes de diffraction aux rayons X du sol testé à 3, 5 et 7 % de chaux vive après 28 jours de cure.

Figure 4.32 Courbe contrainte-déformation à 28 jrs de 5, 11,13 et 15% exposé et non exposé à l'air.

Figure 4.33 Evolution de la résistance mécanique avec la température Bell (1996).

Figure 4.35 Effet de condition de conservation sur la résistance mécanique à 28 jrs.

Figure 4.36 Influence de l'ajout de chaux sur la courbe contrainte-déformation pour 60 jours.

Figure 4.37 Influence de l'ajout de chaux sur la courbe contrainte-déformation pour 90 jours.

Figure 4.38 Influence de l'ajout de chaux sur la courbe contrainte-déformation pour 180 jours.

Figure 4.39 Effet de la chaux sur la résistance à la compression pour différents temps de cure.

Figure 4.40 Influence du temps de cure sur la résistance mécanique sol traité à 3% de chaux.

Figure 4.41 Influence du temps de cure sur la résistance mécanique sol traité à 5% de chaux.

Figure 4.42 Evolution de la résistance mécanique pour différents temps de cure.

Figure 4.43 Evolution des classes granulaires d'un sol stabilisé à la chaux en fonction du temps de cure

TABLE DES MATIERS

Introduction générale	01
PARTIE 01 : Analyse bibliographique	
Chapitre 1 Présentation des méthodes de stabilisation des sols	
1.1 Introduction.	04
1.2 Méthodes de stabilisation des sols.	04
1.2.1 Stabilisation thermique.	05
1.2.2 Stabilisation mécanique.	06
1.2.3 Stabilisation chimique des sols argileux.	06
1.3 Sélection des additifs pour la stabilisation.	09
Chapitre 2 Traitement des sols par la chaux	
2.1 Historique de la technique de traitement à la chaux.	16
2.2 La chaux.	16
2.2.1 Origine de la chaux.	16
2.2.2 Types de la chaux.	17
2.3 Technique de traitement des sols à la chaux.	19
2.4 Mécanisme de la réaction sol- chaux.	21
2.5 Effet de la matière organique.	23
2.6 Effet de sulfates.	23
2.7 Détermination des teneurs en chaux.	24
2.8 Effets de traitement sur les caractéristiques physiques et mécaniques.	26
2.9 Technique de réalisation des travaux de traitement.	40
PARTIE 02 : Etude expérimental	
Chapitre 3 Matériaux de l'étude et méthodes expérimentales	
3.1. Introduction	41
3.2 Identification des matériaux de l'étude.	41
3.2.1 Sol naturel.	41
3.2.2 Chaux.	43
3.2.3 Bentonite.	44
3.2.4 Sol reconstitué.	44
3.3 Méthodes expérimentales du traitement (Sol-Chaux).	45
3.3.1 Préparation des mélanges (Sol – Chaux).	45

3.3.2 Conservation des échantillons de sol.	45
3.3.3 Confection des échantillons mélanges (Sol – Chaux).	46
3.4. Réalisation de programme expérimental.	49
Chapitre 04 Présentation des résultats et interprétations	
4.1. Introduction	56
4.2 Détermination des taux singuliers en chaux.	56
4.2.1 Détermination du taux de fixation en chaux.	56
4.2.2 Détermination du taux de demande en chaux.	57
4.3 Effet du traitement à la chaux sur les caractéristiques physiques et mécaniques.	58
4.3.1 Les effets géotechniques à court terme.	58
4.3.1.1 Influence de la chaux sur les paramètres de compactage.	58
4.3.1.2 Influence de la chaux sur perméabilité.	60
4.3.1.3 Influence de la chaux sur la résistance à la compression simple.	60
4.3.2 Les effets géotechniques à long terme.	62
4.3.2.1 Sur la plasticité.	62
4.3.2.2 Sur la granulométrie.	62
4.3.2.3 Sur la perméabilité.	65
4.3.2.4 Sur la courbe oedométrique.	70
4.3.2.5 Sur la compressibilité.	71
4.4 Etude du développement de la résistance mécanique.	73
4.4.1 La résistance mécanique à 28 jours.	73
4.4.2 Développement de la résistance dans le temps.	73
4.4.3 Influence de condition de conservation sur la résistance mécanique à 28 jours.	79
4.4.4 Analyse de l'effet de longues périodes de temps sur la résistance mécanique de sol stabilisé à la chaux.	80
4.4.5 Discussion des résultats.	84
Conclusions générales	88
Références bibliographiques	93

Introduction Générale

Chaque année la construction routière utilise des quantités énormes de matériaux pour la réalisation des infrastructures de base des pays (remblai, plate formes et fondation). Souvent, les matériaux rencontrés dans les travaux de terrassement ne sont pas conformes aux exigences d'utilisation et posent des problèmes d'instabilité vis-à-vis de l'eau. Dans ce cas on est contraint de transporter ces matériaux sur de longues distances ce qui augmente le coût des travaux. Parmi les solutions qui s'offrent pour résoudre ce problème, l'utilisation des matériaux locaux présents sur place constitue la meilleure alternative à condition de traiter ces matériaux pour améliorer leurs caractéristiques mécaniques de manière à répondre aux exigences des normes imposées.

Le traitement des sols est une technique de valorisation des matériaux pour la réalisation des structures conformes aux principes du développement durable. Le développement durable préconise un développement humain respectueux de la nature. Dans le domaine routier, on cherche à réduire au maximum les nuisances causées à l'environnement lors de la réalisation des structures en protégeant notre planète.

Le traitement des sols offre les bénéfices suivants :

- La valorisation des sols de remblai présents sur place pour résoudre le problème de gaspillage des matériaux qui sont des ressources non renouvelables et donc épuisables.
- Il apporte une solution au problème du manque de matériaux pour la réalisation des projets routiers et autres ouvrages gros consommateurs de matériaux.
- Limiter le problème du transport de ces matériaux à partir de régions souvent lointaines.
- Résolution du problème environnemental dû aux dépôts de matériaux argileux non utilisés dans les décharges.

Il existe une multitude de techniques de stabilisation des sols qui présentent des avantages en fonction de la nature du sol, des moyens utilisés et de l'importance du projet. Il demeure néanmoins que la plus répandue parmi ces techniques est la stabilisation à la chaux.

Les améliorations apportées par l'ajout de chaux aux sols médiocres sont remarquables. La chaux sert à sécher, modifier, et stabiliser le sol. Les performances de la résistance sont

généralement très importantes et s'opèrent dans le temps. Immédiatement le traitement à la chaux fournit des avantages d'exécution. A long terme le traitement permet de réduire les coûts d'entretien des ouvrages.

Malgré sa vaste utilisation et les succès réalisés, la chaux a connu, à une certaine période, une baisse d'intérêt, après que quelques graves problèmes de durabilité aient été observés sur des projets utilisant la technique, dans plusieurs pays.

Les premières expertises ont désigné alors comme responsables des défaillances enregistrées, les conditions de mise en œuvre et le dosage en chaux. Des évaluations plus récentes des dommages enregistrés sur des projets de construction de routes dans certains pays du monde, désignent la carbonatation de la chaux comme responsable de la chute des performances ainsi que des composés chimiques présents dans les sols et dans l'eau. Les travaux sur ces phénomènes restent néanmoins peu documentés. Ce qui confirme bien que la réaction de stabilisation des sols à la chaux n'est pas encore bien maîtrisée.

Actuellement, la stabilisation à la chaux connaît un important regain d'intérêt en raison du renforcement des législations environnementales et de la pression croissante sur les matières premières, en d'autres termes avec l'application des principes du développement durable. De son emploi dans la réutilisation des remblais des sols humides, on tente d'étendre la technique à l'utilisation des sols stabilisés à la chaux dans les couches de chaussées exigeant ainsi de plus grandes performances. Il est évident qu'il est très difficile d'abandonner une méthode de stabilisation des sols qui avait enregistré beaucoup de succès.

Dans le but de comprendre et d'optimiser la stabilisation à la chaux, la recherche s'intéresse à analyser de manière plus approfondie la réaction sol-chaux pour faire ressortir les mécanismes qui la construisent et les différents paramètres qui la contrôlent.

Il est bien entendu que la réaction de stabilisation fait intervenir plusieurs paramètres. En plus des éléments principaux ; sol-chaux –eau, on note l'influence d'autres facteurs tels que les conditions de mise en œuvre, les conditions climatiques (température, gel-dégel), le temps, Et afin de garantir la réussite de l'opération de stabilisation, il faut respecter toutes les bonnes conditions et éviter les éléments qui pourraient la perturber.

L'objectif du présent travail est d'étudier, sur la base d'un large programme expérimental, les différentes réactions qui construisent l'opération de la stabilisation des sols à la chaux. On

s'intéressera au développement des réactions qui se produisent ainsi que leurs principaux effets sur les caractéristiques du sol et ses performances.

On analyse sur la base des résultats expérimentaux de cette étude, le rôle des paramètres principaux qui contrôlent la réaction avec leur influence dans le développement de la réaction et dans les performances géotechniques réalisées. On analyse également l'influence des paramètres qui peuvent agir sur la réaction tels que la température, le temps, les conditions climatiques, de mise en œuvre et de conservation.

Le travail réalisé est rapporté dans un mémoire organisé en cinq chapitres :

On commence par une introduction générale qui situe le contexte de l'étude et affiche l'objectif du travail.

La première partie est une revue bibliographique qui compte deux chapitres. Le premier chapitre tente de présenter un état de connaissances non exhaustif concernant les méthodes de stabilisation des sols, le choix de la technique de stabilisation et la sélection des additifs appropriés.

Le deuxième chapitre s'intéresse au traitement des sols à la chaux. On donne un aperçu sur la chaux et les différents types de chaux. On expose les mécanismes de la réaction sol-chaux tels que rapportés dans la littérature.

La deuxième partie compte deux chapitres dans lesquels on expose le programme expérimental réalisé.

Le troisième chapitre présente les matériaux de l'étude et les méthodes expérimentales utilisées pour réaliser les différents essais.

Dans le quatrième chapitre, on expose les résultats obtenus qu'on interprète en les corroborant avec les résultats de la littérature.

On termine avec une conclusion générale. On rappelle les principaux résultats obtenus et on propose quelques perspectives pour la poursuite de cette recherche.

Chapitre 01**Présentation des méthodes de stabilisation des sols****1.1 Introduction :**

On présente dans ce chapitre les connaissances concernant les méthodes utilisées dans le traitement des sols. Après avoir discuté les différents objectifs du traitement des sols on expose les méthodes de traitement du sol et les additifs auxquels elles font appel (ciment, chaux, bitume ...). On présente ensuite les domaines d'utilisation de ces différentes techniques ainsi que la connaissance qui permet d'arrêter une méthode de traitement particulière.

On donne plus loin dans le deuxième chapitre un état des connaissances non exhaustif sur le traitement des sols à la chaux.

1.2 Méthodes de stabilisation des sols :

L'objectif essentiel de la stabilisation, dans le domaine des travaux publics, est généralement l'augmentation de la résistance mécanique du sol et la réduction de sa sensibilité à l'humidité. Il existe plusieurs techniques de stabilisation des sols qui sont actuellement utilisées dans le monde pour permettre de réutiliser les sols argileux dans la construction routière. D'après Venkatramaiah (2006) la classification des techniques de stabilisation des sols est difficile car la classification peut être en termes le type de traitement, en termes d'additifs utilisés, ou sur le processus de stabilisation mis en œuvre. Parmi ces techniques on reconnaît : La stabilisation mécanique, thermique, électrique, et chimique. Selon la procédure de stabilisation utilisée on a deux techniques qui peuvent être combinées : La stabilisation sans additifs et la stabilisation avec additifs.

La stabilisation sans additifs peut être mécanique (réarrangement des particules durant les opérations de compactage). Elle peut être réalisée par préchargement, pompage, électro-osmose, ou par l'application d'un gradient thermique par chauffage ou refroidissement. D'autre part, la stabilisation avec des additifs peut être avec l'ajout de ciment, bitume, chaux, cendres volantes, l'ajout de chlorures de calcium ou de sodium.

Le choix de la technique du traitement dépend de plusieurs facteurs essentiels qui doivent être considérés dont les principaux sont présentés ci-après.

a- La nature du sol à stabiliser. On doit connaître la granulométrie ; l'argilosité ; les teneurs en constituants chimiques : la teneur en matière organique, en phosphates et nitrates, en chlorures, en sulfates et les sulfures.

b- L'état du sol à stabiliser au moment du traitement.

L'état hydrique du sol intervient dans le choix de l'agent de traitement et dans la détermination du pourcentage d'ajout en liant. Il s'exprime par les indices suivants :

- ✓ L'indice de consistance I_C qui caractérise l'état hydrique du sol parmi l'ensemble des états (liquide, plastique, semi-solide, et solide).
- ✓ l'indice portant immédiat IPI qui caractérise les états hydriques humides et très humides du sol ; le rapport de la teneur en eau naturelle et de la teneur en eau optimale qui caractérise les états hydriques (sec, moyen, et très sec).

L'état de compacité du sol pour connaître les conditions du malaxage de liant avec le sol en place.

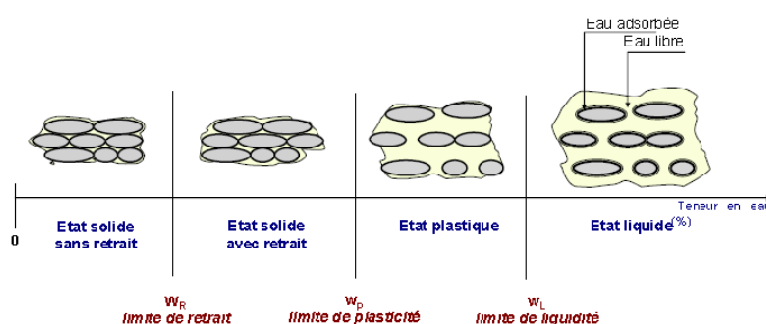


Figure 1.1 Différents états de consistance du sol.

c- Le comportement du sol à stabiliser, c'est-à-dire la fragmentabilité des gros éléments supérieur à 50mm et l'abrasivité de la fraction inférieure à 0.08 mm.

d- La destination de la couche stabilisée.

e- La résistance nécessaire et la durabilité de la couche stabilisée.

f- Le coût de l'opération du traitement.

g- Les conditions environnementales.

h- L'amélioration projetée des sols et la disponibilité de matériau de traitement.

i- Les caractéristiques visées par l'ingénieur (la maniabilité qui facilite la mise en œuvre, la compactabilité, la compacité, la traficabilité, la portance immédiate et sa durabilité dans le temps sous l'effet de l'eau et de gel et des autres conditions environnementales....).

D'après Cabane (2004), toutes les techniques de stabilisation peuvent être utilisées dans les sols fins pour rendre les sols aptes au terrassement.

1.2.1 La stabilisation thermique :

Le traitement thermique, aux températures élevées (à environ de 500 C°) améliore les propriétés des sols et cause une réduction de la limite de liquidité et l'indice de plasticité. Cette technique semble être une solution peu économique, rend rarement coût-concurrentiel avec d'autres techniques (Venkatramaiah, 2006).

Le chauffage ou le refroidissement d'un sol peut causer les changements cruciaux de ses propriétés. Même une légère augmentation de la température peut réduire la répulsion électrique entre les particules d'argile et peuvent causer la légère augmentation de la résistance. La température, au-dessus de 100°C, chasse l'humidité adsorbée sur des particules d'argile, augmentant de ce fait sa résistance. Les températures de l'ordre de 400 à 600°C, causent les changements irréversibles des particules argileuses, les rendant moins sensible à l'eau.

La technique de stabilisation thermique a été connue pour changer une argile expansible en type essentiellement non-expansible. Les ingénieurs soviétiques ont employé la stabilisation thermique pour les dépôts profonds du sol partiellement saturé « limon argileux » jusqu'à environ 12 m (Lambe, 1962). La méthode a consisté en brûlant un mélange de combustible liquide et d'air injectés par un réseau des pipes. On a formé des cylindres du sol solidifié environ 2.7 m de diamètre qui a servi de bases de pile. Les ingénieurs roumains ont également employé cette technique pour les sols cohérents (Beles et Stanculescu, 1958). La chaleur a été fournie en brûlant le carburant de liquide ou de gaz dans une unité abaissée dans un sondage.

L'eau interstitielle de congélation dans un sol humide augmente sa résistance. Les sols argileux nécessitent des températures plus inférieures à 0°C, on cite des exemples : Glacer les piles, batardeaux de glace et de soutien des bâtiments.

1.2.2 La stabilisation mécanique :

La technique de stabilisation mécanique ou la densification est la technique la plus largement utilisée. Elle permet de modifier les caractéristiques du sol. Elle se base sur le compactage qui est l'ensemble des opérations mécaniques pour augmenter ou accroître la densité en place d'un sol. Il sert à réduire la porosité. Techniquement, plusieurs méthodes de compactage sont utilisées : par choc, vibrations et par surcharges. La précharge consiste à comprimer les sols pour augmenter leur résistance et réduire les tassements excessifs.

1.2.3 La stabilisation chimique :

La technique de stabilisation chimique se base sur l'utilisation des sels et des liants pour améliorer les sols rencontrés. Parmi ces liants : la chaux, le ciment, les cendres volantes, le bitume et autres substances chimiques ou des combinaisons de ces substances.

D'après Holtz (1981) la stabilisation chimique se fait souvent par malaxage ou par injection de produits chimiques dans le sol. Les additifs les plus communs sont le ciment Portland, la chaux, l'asphalte, le chlorure de calcium, le chlorure de sodium et les résidus de pâtes de papiers. L'ajout d'un agent de traitement permet de conférer au sol une portance immédiate et d'améliorer son aptitude au compactage afin d'assurer une mise en œuvre correcte (aptitude à

supporter le trafic de chantier et à obtenir les compacités visées). Le choix de l'agent de traitement est déterminé par le type de sol, son état hydrique au moment du traitement ainsi que par les caractéristiques visées.

Le bitume :

Dans le cas de sols limoneux et argileux, le traitement aux liants bitumineux peut être réalisé si la proportion de fines n'est pas trop importante (I_p compris entre 5 et 15 et le pourcentage de fines (inférieur à 80 μm) compris entre 10 et 30 %). L'adjonction de bitume rendra les sols traités insensibles à l'eau et en améliorera la cohésion. Cette méthode n'est par contre utilisable que pour un traitement des sols, et non pour des déblais.

Le ciment :

C'est un additif largement utilisé pour la stabilisation du sol. L'ajout de ciment au sol permet de réduire la plasticité et augmenter la résistance. Il apporte une amélioration notable des propriétés du sol. On aura une diminution de : La limite de liquidité, l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement, et une augmentation de : La limite de plasticité, la résistance mécanique, et la résistance au cisaillement (Rawas et al, 2005). D'après le guide technique (GTR) le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques, qui sont à-priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leurs faibles teneurs en argile. Le ciment leur apporte cohésion, résistance mécanique, stabilité à l'eau et au gel. Le ciment rigidifie rapidement le sol de manière irréversible mais s'il y a rupture de l'horizon traité (action mécanique) il n'y a pas de nouvelle prise. La prise du ciment est plus rapide que celle de la chaux (qui continue à évoluer encore au bout d'un an), mais elle est stoppée par le gel. Les constituants hydratés du ciment relient les grains de sable entre eux en formant des sortes de ponts nombreux et solides, d'où l'augmentation de la portance, des résistances mécaniques et de la résistance au gel.

On utilise des ciments de classe 45 qui sont de meilleur marché. Les doses varient de 3,5 à 5 % du poids de sol sec à traiter.

Le traitement au ciment est parfois associé au traitement à la chaux : la chaux traite les matériaux argileux et le ciment donne au sol la cohésion et les caractéristiques mécaniques recherchées. La chaux et le ciment ne sont pas concurrents mais complémentaires puisque chacun apporte ses propriétés spécifiques: La chaux permet un assèchement du sol trop humide, une floculation de l'argile et le ciment permet l'obtention rapide de résistances mécaniques appréciables les tout premiers jours.

D'après le guide technique de traitement des sols aux liants hydrauliques, il y a deux actions de ciment sur le sol qui peuvent se résumer comme indiqué ci-après.

Immédiatement : L'abaissement de la teneur en eau résulte uniquement de l'apport de la matière sèche. Il est donc très limité. Le traitement au ciment seul ne convient pas pour des sols très humides. Une solution est de les prétraiter à la chaux.

À moyen et long terme : La première phase est celle du démarrage de la prise. Elle correspond au délai de maniabilité du mélange. Celui-ci dépend de la nature des constituants principaux, du ciment et de leur finesse de mouture, ainsi que de la nature des constituants secondaires et des additifs (retardateurs ou accélérateurs). La deuxième phase concerne la prise hydraulique, dont la durée dépend principalement de la qualité et de la finesse du ciment. La troisième phase est celle du durcissement progressif qui s'étale de un à plusieurs mois.

On peut utiliser avec le ciment d'autres produits chimiques pour accélérer la réaction d'hydratation et d'augmenter rapidement le gain de la résistance mécanique dans le sol traité. Laguros (1962) cité par Daniels (2010) décrit une recherche partant sur plusieurs produits chimiques au mélange sol-ciment (L'hydroxyde de sodium, le sulfate de calcium, le sulfate de magnésium, le sulfate de sodium, le chlorure de calcium, l'oxyde de magnésium, et le carbonate de sodium). L'auteur a conclu que juste au sujet de chaque sol examiné pouvait atteindre la meilleure résistance avec l'addition de tout au plus 2% d'un produit chimique choisi. En outre, les résultats dépendaient fortement du type du sol et de la chimie du sol. Les échantillons ont été traités dans des conditions optimales. L'auteur a conclu que le chlorure de calcium a été employé avec succès pour neutraliser des produits organiques dans le sol pour faciliter la création du sol-ciment sans ajouter des quantités excessives de ciment.

La chaux :

Le traitement des sols à la chaux est une technique qui s'est développée très rapidement dans le monde et qui est encore amenée à connaître une importante croissance dans le futur. Selon Dupraz (2006) cette technique est aisée à mettre en œuvre, économique et efficace. Elle permet d'éviter de lourds travaux de terrassement destinés à rejeter les sols inadéquats et à faire appel à des matériaux d'emprunt de qualité issus de carrières qui sont utilisés parfois dans le même but, et aussi d'éviter de détériorer le réseau routier existant par le transport de ces matériaux d'emprunt.

La chaux est largement utilisée dans des applications de génie civil comme la construction des routes et des remblais. Quand la chaux est ajoutée aux sols argileux et en présence d'eau, un certain nombre de réactions se produisent menant à l'amélioration des propriétés du sol. Ces réactions incluent l'échange cationique, la floculation, la carbonatation et la réaction pouzzolanique. L'échange cationique a lieu entre les cations qui s'associent aux surfaces des particules d'argile et cation de calcium de la chaux. L'effet des particules d'argile provoque

des réactions d'échange cationique et d'attraction, formant la floculation des particules. La floculation est principalement responsable de la modification des propriétés géotechniques des argiles une fois traitées avec la chaux.

Rawas et al (2005) montrent que l'addition de la chaux de manière significative réduit le potentiel de gonflement, la limite de liquidité, l'indice de plasticité et la densité sèche maximum du sol. Elle augmente sa teneur en eau optimale, la limite de plasticité et la résistance mécanique. L'addition de la chaux réalise la modification du sol lorsque le pourcentage de la chaux est de 1% à 3% et d'autres additions de chaux n'apportent plus des variations de la limite de plasticité, mais augmentent toutefois la résistance. D'après Venkatramaiah (2001) un pourcentage de 2 à 8% de chaux peut être exigé pour les sols grenus, et 5 à 10% pour les sols cohérents.

La chaux peut être employée pour traiter des sols à des degrés variables, dépendant de l'objectif arrêté. Une quantité minimale de chaux est employée pour assécher et modifier temporairement les sols (NLA, 2004).

1.3 Sélection des additifs pour la stabilisation :

Il existe des règles générales pour sélectionner les additifs en se basant sur la granulométrie et la plasticité ou la classification du sol. Le ciment Portland par exemple est utilisé avec plusieurs types de sols en évitant les matériaux les plus plastiques. Généralement, le ciment est le meilleur stabilisateur pour les matériaux granulaires bien gradués avec une quantité suffisante des fines pour produire une matrice homogène d'agrégats. La chaux réagit surtout avec les sols de plasticité moyenne à élevée.

Les cendres volantes sont des matériaux pouzzolaniques qui réagissent avec la chaux. Elles sont utilisées en combinaison avec la chaux dans les sols non ou légèrement plastiques. Elles sont aussi souvent utilisées avec des petites quantités de ciment Portland et la chaux pour augmenter la résistance. Cette combinaison de chaux-ciment-cendres volantes a été utilisée avec succès dans la stabilisation des assises de chaussée.

L'asphalte et les matériaux bitumineux sont utilisés pour étancher et augmenter la résistance du sol stabilisé. Généralement, les sols stabilisables à l'asphalte sont les sables limoneux ou les matériaux granulaires puisque il est demandé de parvenir à enrober toutes les particules du sol.

La sélection du mode de traitement peut être arrêtée par les méthodes présentées ci-après.

1.3.1 La sélection des additifs :

La sélection des stabilisateurs est effectuée en utilisant les informations contenues dans la figure 1.2 et le tableau 1.1 (département de l'armée (USA MIL-STD-619B)). Ce dernier est

utilisé pour déterminer le choix de la stabilisation hydraulique qui s'indique le mieux pour le traitement des sols ou des matériaux. Le choix est basé sur les passants du tamis N° 200 (% des inférieurs à $75\mu\text{m}$), le pourcentage de sable en poids et l'indice de plasticité. Le triangle de gradation des sols dans la figure 1.2 est basé sur la composition granulométrique. Il est divisé en zones de sols de la taille de grains similaires. Le processus de sélection se poursuit avec le tableau 1.1 qui indique pour chaque zone montrée sur la figure 1.2, les stabilisateurs adéquats (appropriés) et des restrictions basées sur la granulométrie et/ou l'indice de plasticité (I_p). La deuxième colonne du tableau 1.1 contient une liste des symboles de classification des sols. Elle sert à vérifier en plus la bonne zone dans le triangle de la figure 1.2. Les données nécessaires pour l'utilisation du triangle de la figure 1.2 sont : le pourcentage des matériaux passants à travers le tamis N°200 ($<75\mu\text{m}$) et le pourcentage des matériaux passants à travers le tamis N°4 (4.75mm) et retenus par le tamis N°200 ($75\mu\text{m}$). L'intersection de ces deux valeurs donne la zone du sol dans le triangle (1A, 2A, 3...etc.). Le symbole de la zone déterminée se trouve dans la première colonne et le symbole de classification selon l'USCS est dans la deuxième colonne du tableau 1.1.

Tableau 1.1 Règle pour la sélection des additifs pour la stabilisation des sols (Département de l'armée (USA MIL-STD-619B))

Zone	Cas de sol	Type de stabilisateur recommandé	Limitation sur W_L et I_p de sol	Limitation sur les passants de tamis N°200	remarque
1A		(1) Bitume (2) ciment Portland (3) chaux – ciment - cendres volentes	$I_p < 25$		
	1B	(1) Bitume (2) ciment Portland (3) chaux (4) chaux – ciment -cendres volentes	$I_p < 10$ $I_p < 30$ $I_p < 12$ $I_p < 25$		
1C		(1) Bitume (2) ciment Portland (3) chaux (4) chaux – ciment -cendres volentes	$I_p < 10$ b $I_p > 12$ $I_p < 25$	Passants N°200 < 30% par poids.	
	2A	(1) Bitume (2) ciment Portland (3) chaux – ciment -cendres volentes	$I_p < 10$ $I_p < 30$ $I_p < 25$		Matériau bien gradué seulement. Le matériau doit contenir au minimum 45% de poids de passant de tamis N°4.
2B		(1) Bitume (2) ciment Portland (3) chaux (4) chaux – ciment -cendres volentes	$I_p < 10$ $I_p < 30$ $I_p < 12$ $I_p < 25$		Matériau bien gradué seulement. Le matériau doit contenir au minimum 45% de poids de passant de tamis N°4.
	2C	(1) Bitume (2) ciment Portland (3) chaux (4) chaux – ciment -cendres volentes	$I_p < 10$ b $I_p < 12$ $I_p < 25$	Passants N°200 < 30% par poids.	Matériau bien gradué seulement. Le matériau doit contenir au minimum 45% de poids de passant de tamis N°4.
3C		(1) ciment Portland (2) chaux	$W_L < 40$ et $I_p < 12$ $I_p > 12$		Sol organique et fortement acide qui n'est pas susceptibles au moyen de stabilisation ordinaire.

Les additifs de stabilisation possibles pour chaque zone sont indiqués dans la troisième colonne. Les limitations pour l'utilisation de chaque matériau sont dans les colonnes qui suivent. Ces limitations sont utilisées pour empêcher l'utilisation des agents de stabilisation non applicables pour les types de sols particuliers.

La figure 1.2 permet ainsi de déterminer la stabilisation hydraulique à retenir. Elle est basée sur les passants N°200 et l'indice de plasticité (NLA, 2004).

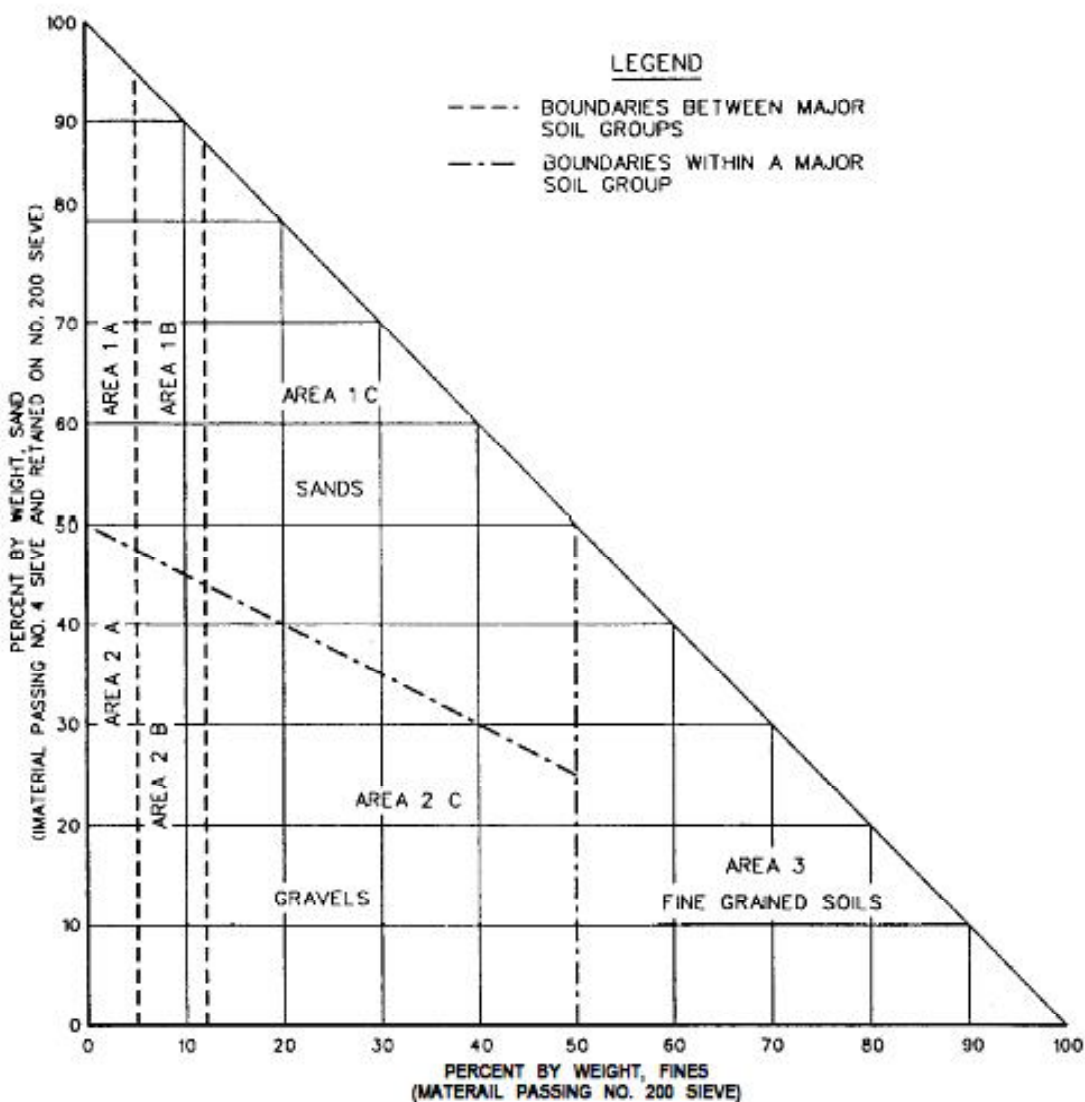


Figure 1.2 Triangle de gradation granulométrique pour l'aide à sélectionner le type d'additif

(Département de l'armée (USA MIL-STD-619B))

Ingles et Metcalf (1972) décrivent comment les différents agents stabilisants sont applicables pour différents sols. Sur la figure 1.4 l'applicabilité est évaluée selon la dimension particulaire du sol et montre que la chaux a l'effet maximum jusqu'à une dimension particulaire de 0.01 millimètre. Le ciment, d'autre part, a une limite inférieure pour l'efficacité maximum à une

dimension particulaire d'environ 0.06 millimètre, au-dessous duquel le résultat de la stabilisation peut être inconnu.

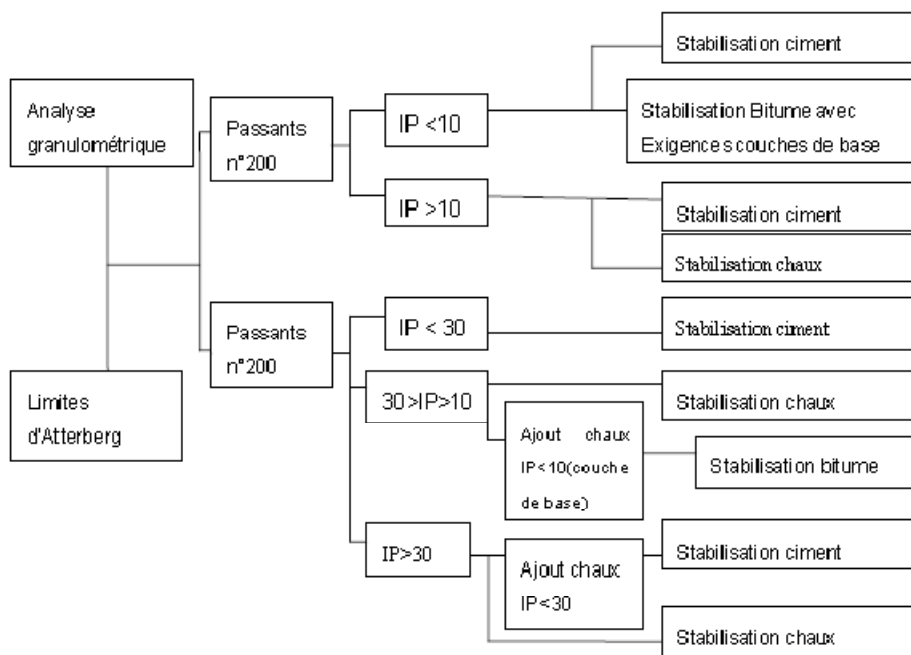


Figure 1.3 La détermination du type de stabilisateur approprié d'après NLA (2004)

Type of stabilisation applicable		Designation
Range of maximum efficiency	Effective, but quality control may be difficult	Soil
		Particle size (mm)
THERMAL	MECHANICAL	Soil
		Volume stability
POLYMERIC-ORGANIC	BITUMENS	V. poor
		Fair
CEMENT	LIME	Fair
		Good
V. good	V. good	V. good
		V. good
Fine clays	Coarse clays	Fine silts
		Coarse silts
Fine sands	Coarse sands	Fine sands
		Coarse sands

Figure 1.4 L'applicabilité des agents de stabilisation d'après Ingles et Metcalf (1972).

Tableau 1.2: La classification du développement de la résistance des sols a stabilisés par l'addition de différents agents stabilisateurs (Ahnberg et al, 1995).

Binder	Soil									
	Clayey silt	Silty clay	Clay	Clay (quick)	Clay (saline)	Clay (sulphide)	Organic clay	Clayey mud	Gyttja	Peat
Cement	++ ^a	++	+ ^b	++	+	+	+	+	+	+
Lime&cement	+	+	+	+	+	+	+	• ^c	•	•
Lime	•	+	•	+	+	• ^d	•	•	-	-

a. ++ very good effect
 b. + good effect
 c. • satisfactory effect
 d. - no, or poor effect

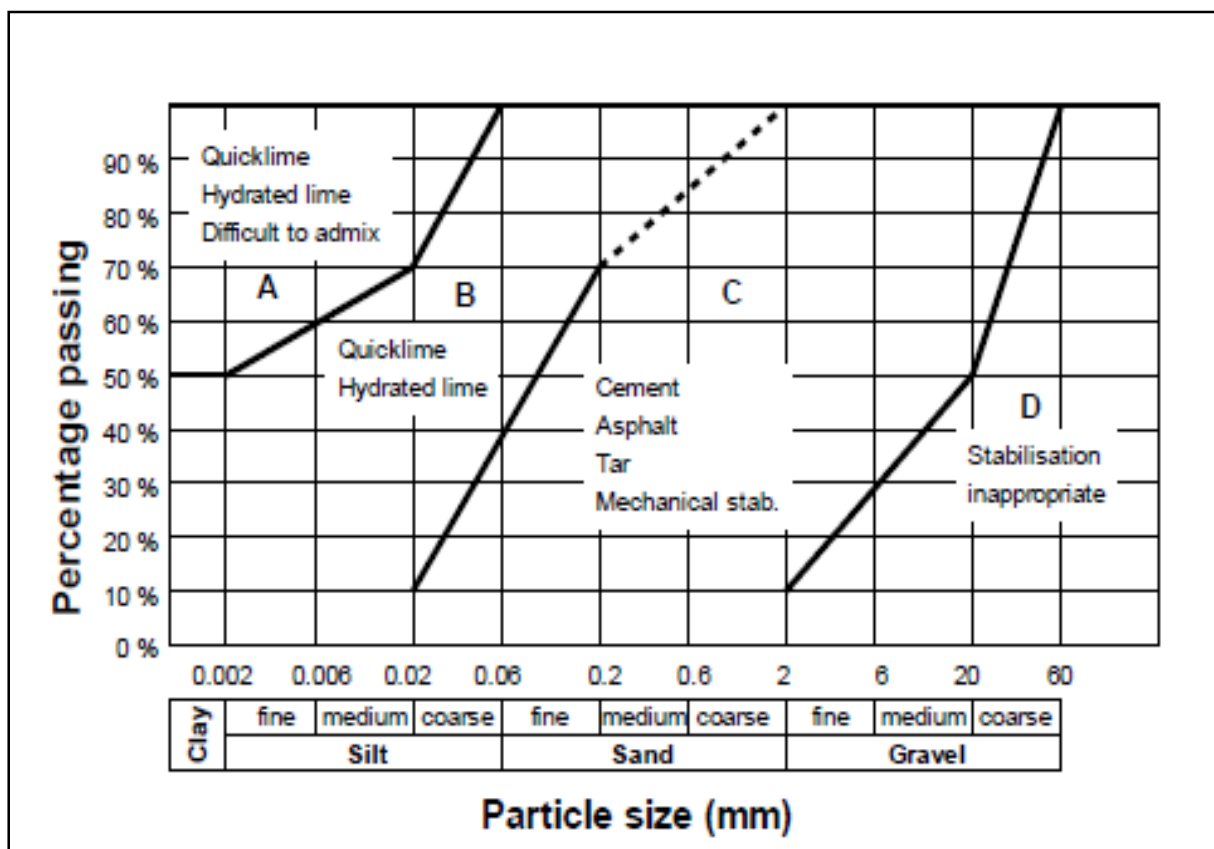


Figure 1.5 Limites d'évaluation recommandée pour différents types de sols (Assarson, 1968).

Tableau 1.3: Le choix d'additif approprié pour le traitement selon Anon (1999) : 1) très approprié, 2) satisfaisant, 3) non approprié.

Binder classification	Crushed rock	Well graded gravel	Silty/clayey gravel	Sand ^a	Sandy/silty clay	Heavy clays
GP Cement	1	1	1	2	2	3
GB Cement	1	1	1	1	1	2
Cementitious blend	1	1	1	1	1	2
Lime	2	2	1	3	2	1
Lime&cement	3	3	2	3	2	1
Lime & fly ash	3	1	1	3	2	2
Bitumen	1	1	2	2	3	3
Bitumen/Cement	1	1	2	2	3	3
Insoluble polymer	2	1	1	3	1	2

a. Depends upon grading; uniform sands require higher additive contents

Chapitre 02**Traitement des sols à la chaux****2.1 Historique de la technique de traitement à la chaux**

La stabilisation des sols à la chaux est une pratique qui a une grande histoire. Elle est employée la première fois quand les Romains ont établi « The Appian Way » depuis 2000 ans. Des constructions en chaux sont ensuite apparues, jusqu'à être utilisées dans toutes les constructions romaines. Cette technique a été utilisée aussi par les Indiens et les Grecs dans leur histoire. Sur certains sites archéologiques suisses des blocs de calcaire calcinés constituent le noyau interne des murailles de certaines places fortifiées.

En Egypte des mélanges de plâtre et de chaux sont utilisés depuis 2600 ans. Plusieurs formes de stabilisation à la chaux ont été utilisées pendant des centaines d'années mais son utilisation est pourtant restée quasiment incontournable dans la construction jusqu'à l'introduction du ciment Portland au milieu du 19ème siècle. Le ciment a rapidement remplacé la chaux dans toutes les constructions modernes en raison d'une rigidité plus importante et un coût moindre. La chaux a été largement utilisée pour la construction des ouvrages. Les pyramides de Shersi dans le Tibet ont été construites en utilisant des mélanges argile-chaux. La Grande Muraille de Chine a été construite en utilisant le mortier stabilisé à la chaux. McDowel (1959) a mentionné que la stabilisation des routes en terre a été utilisée en Mésopotamie et en Egypte. Elle a été employée aux Etats-Unis puis en Grande-Bretagne, en Allemagne et en Suède pour améliorer le sol support. Les premiers essais concernant la stabilisation des sols à la chaux ont été faits aux Etats-Unis en 1904. Premièrement, la chaux a été utilisée comme agent de stabilisation des sols dans les constructions modernes, en 1924 avec un usage limité dans le renforcement des autoroutes. En 1930, et suite à l'extension des routes à la propagation des véhicules, la stabilisation des sols commence son développement. Aujourd'hui, cette technique de stabilisation est largement utilisée dans le monde pour améliorer les infrastructures routières (les autoroutes, les chemins de fer, les pistes d'avions, plates-formes industrielles, les remblais, les talus instables...etc). En Algérie jusqu'à maintenant cette technique n'est pas largement utilisée dans la construction routière.

2.2 La chaux :**2.2.1 Origine de la chaux :**

La source de la chaux est le calcaire. C'est une roche comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium CaCO_3 et/ou de magnésium MgCO_3 . C'est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire.

La chaux est un oxyde de calcium CaO . Elle est utilisée depuis l'antiquité dans la construction. Les produits dérivés du calcaire (CaCO_3) possèdent la capacité unique d'être transformés et de reprendre leur forme originale. Faire cuire le calcaire permet de former la chaux vive (CaO). La chaux éteinte ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) peut alors être produite en ajoutant de l'eau à la chaux vive. Dans la figure 2.6 on peut remarquer que le dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère peut alors réagir avec la chaux éteinte pour la reconvertir en calcaire. Cette réaction représente la première réaction de durcissement. Ce cycle de continuité s'appelle le cycle de la chaux.

2.2.2 Types de chaux :

On distingue plusieurs types de chaux :

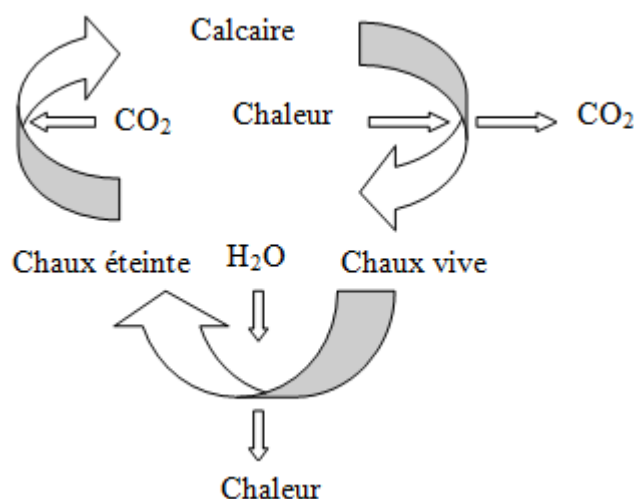


Figure 2.1 Cycle de la chaux.

La chaux vive : est le produit direct de la calcination du calcaire, qui doit être chauffé à une température très élevée dans un four rotatif ou vertical. Ces fours fonctionnent généralement à des températures dépassant les 1100C° , pour former la chaux vive qui est principalement constituée de 90% d'oxyde de calcium CaO . La réaction se fait selon l'équation :



La réaction étant réversible, la chaux vive produite peut re-carbonater sous l'action du CO_2 . La chaux vive est utilisée dans une grande variété d'applications environnementales et industrielles. Elle est principalement utilisée comme flux pour l'acier, pour la désulfuration des gaz de combustion et différentes autres applications environnementales. La chaux vive est également une composante clé dans la production de la fibre de verre, de l'aluminium, des pâtes de papiers, de l'uranium, de l'or, du cuivre et beaucoup d'autres types d'industries essentielles. Les applications pour ce matériau riche en minéraux comprennent les traitements

environnementaux, comme matière première dans la production de béton, la stabilisation des sols et comme agent neutralisant dans les applications agricoles.

La chaux vive nécessite moins d'espace de stockage et de transport que la chaux hydratée car elle est plus dense. La chaux vive produit une réduction importante de la teneur en eau due à l'hydratation et l'évaporation. Elle est particulièrement bénéfique aux sols humides. Elle génère de la chaleur par la réaction exothermique ce qui accélère le gain de résistance. C'est un avantage de plus pour les zones à climat tempéré où la période de construction peut être prolongée. Elle est économique, car elle est une forme plus concentrée de chaux que la chaux hydratée, contenant 20 à 24% de CaO en plus, Un pourcentage de 3% de chaux vive est normalement équivalent à 4% de chaux hydratée lorsque les conditions permettent une hydratation complète de la chaux vive en présence d'une quantité suffisante d'eau. Par contre, la chaux vive exige 32% de son poids d'eau pour l'hydratation et il peut y avoir d'importantes pertes d'évaporation supplémentaire due à la chaleur d'hydratation. Elle peut exiger plus de mélange que la chaux hydratée ou le lait de chaux, car les particules plus grandes doivent d'abord réagir avec l'eau pour former la chaux hydratée et ensuite être mélangées avec le sol.

La chaux aérienne : (chaux hydratée ou chaux éteinte) : Elle est dite « aérienne » car elle réagit avec le CO₂ de l'air. Elle est obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau. Elle est constituée surtout d'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂. La transformation de chaux vive en chaux éteinte s'effectue par ajout d'eau (H₂O). Cette opération d'extinction produit l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂, avec un fort dégagement de chaleur :



L'hydratation de l'oxyde de calcium se produit déjà sous pression atmosphérique. Cependant, l'hydratation de l'oxyde de magnésium nécessite une longue période de trempage ou des niveaux de pression élevés pour obtenir une hydratation complète. À cause de cette différence, il existe deux types de chaux éteinte. Le type N est généralement produit à la pression atmosphérique. Il en résulte un produit d'hydroxyde de calcium/oxyde de magnésium ayant une disponibilité chimique élevée.

La chaux éteinte de type S est produite à pression élevée afin d'hydrater complètement les composés de calcium et de magnésium. La poussière peut causer un problème dans les zones urbaines car les particules de chaux hydratée sont fines.

La chaux éteinte est utilisée dans de nombreuses applications telles que le traitement de l'eau et des déchets, la stabilisation des sols, les applications agricoles, la modification de l'asphalte et la désulfuration des gaz de combustion. Ces produits sont utilisés dans plusieurs des mêmes applications que la chaux vive mais les produits à base de chaux éteinte sont plus dilués

ENSTP 2012 - Analyse de la réaction sol-chaux dans les sols stabilisés.

chimiquement que la chaux vive. On les utilise dans des applications industrielles où une granulométrie spécifique est requise. Elle ne dégage généralement pas de chaleur lorsqu'elle est combinée à l'eau.

La chaux hydraulique : (chaux maigre) : Elle est appelée « hydraulique » parce qu'elle durcit en présence d'eau. Elle est obtenue à partir de calcaire contenant 10 à 20 % d'argile (calcaires argileux) qui lors de la calcination donne des silicates et aluminates de calcium. Le calcaire naturel est mélangé à des marnes ou des argiles riches en éléments chimiques principalement la silice et aussi le fer, l'aluminium. Aux températures de cuisson de 800°C et 1500°C , le calcium se combine avec ces éléments pour former des silicates, des aluminates et des ferro-aluminates de calcium.

Elle fait prise, en quelques heures au contact de l'eau. Les teneurs en fer sont inférieures à 0,1 ou 0,2 %. La prise de cette chaux hydraulique est essentiellement due à la réaction entre le CaO et les silicates.

La chaux dolomitique : ou chaux magnésienne à base de dolomite ou de calcaire magnésien. La chaux dolomitique (CaOMgO) est produite à partir de gisements de calcaire dolomitique de qualité supérieure, c'est-à-dire du calcaire contenant entre 35 et 46% de carbonate de magnésium (MgCO_3) et après hydratation elles contiennent MgO ou Mg(OH)_2 . Elle est un composé chimique couramment utilisé. Il s'agit d'un solide blanc, caustique, alcalin et cristallin. Sous sa forme commerciale, la chaux dolomitique renferme souvent de petites quantités de dioxyde de silicium, d'oxydes d'aluminium et de fer à l'état de traces. Dans certains cas, la chaux dolomitique est utilisée pour la stabilisation des sols. La chaux dolomitique peut être efficace pour la stabilisation des sols, bien que la fraction de magnésium réagisse plus lentement que la fraction de calcium.

2.3 La technique de traitement des sols à la chaux

Le traitement à la chaux est obtenu par l'oxyde de calcium CaO (chaux vive) ou de l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 (chaux éteinte). La chaux agricole est généralement du carbonate de calcium (CaCO_3). Elle est inefficace pour l'amélioration et la stabilisation des sols. L'effet stabilisateur dépend de la réaction entre la chaux et les minéraux argileux. Les principaux effets de cette réaction sont : Une augmentation de la résistance au cisaillement et de la capacité portante du sol, une réduction de la susceptibilité au gonflement et retrait, une amélioration de la résistance au trafic et aux intempéries, une réduction de la teneur en eau, une amélioration de la maniabilité et les caractéristiques de compactage.

L'ajout de chaux aux sols à grains fins produit plusieurs réactions:

L'assèchement par absorption et évaporation. La réduction de la teneur en eau du sol peut être considérable et se produit immédiatement juste après le mélange de la chaux et le sol.

Les réactions physico-chimiques rapides entre la chaux et les minéraux d'argile produisent des changements immédiats dans la plasticité du sol et sa maniabilité. Ceci est connu comme amélioration ou modification des sols.

À long terme les réactions pouzzolaniques entre la chaux et le sol résultent à la formation des agents de cimentation qui augmentent la résistance et la durabilité du sol. C'est la stabilisation à la chaux proprement dite.

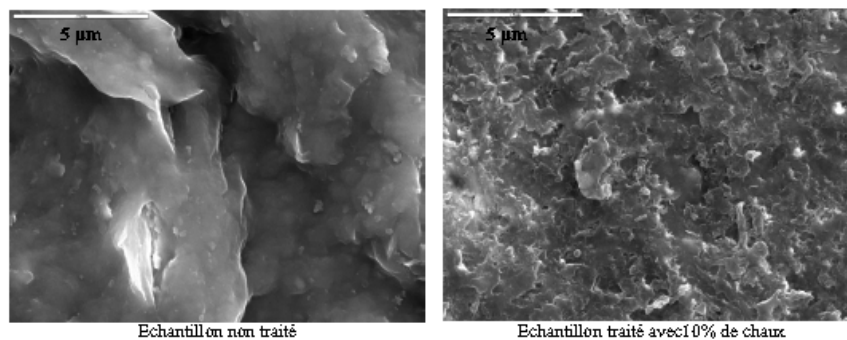
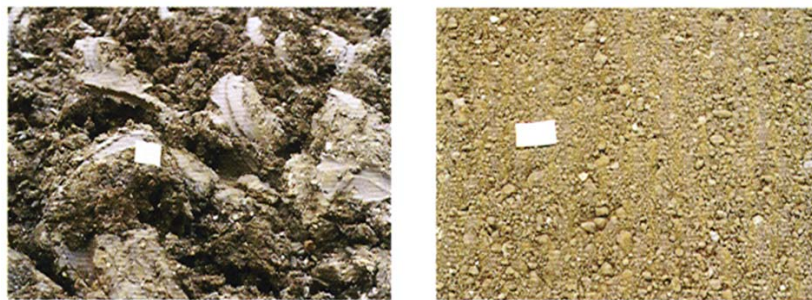


Figure 2.2 Photos au MEB des échantillons compactés d'un sol argileux non traité et traité avec 10% de chaux après 120 jours de cure à 20°C (D'après Khattab (2002) cité par (Lasledj, 2009).

a) Modification immédiate (à court terme):

Lorsque la chaux est mélangée avec un sol argileux en présence d'eau, un échange de cations s'effectue ce qui produit un nouveau matériau.



Sol argileux humide avant traitement Sol après traitement à la chaux

Figure 2.3 Effet de la chaux immédiate sur la maniabilité de sol (Puiatti, 2006).

b) Réaction à long terme :

Les minéraux argileux ont la capacité de réagir avec de la chaux ajoutée au sol pour produire des nouvelles liaisons de cimentation. La chaux ajoutée au sol provoque une augmentation du pH à une valeur de plus de 12 avec une augmentation résultante de la solubilité des

composants siliceux et alumineux qui réagissent avec le calcium pour former des silicates de calcium hydratés ($\text{CSH} = \text{Ca}^{++} + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) et des aluminates de calcium hydratés ($\text{CAH} = \text{Ca}^{++} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$). Le silicate/aluminate de calcium précipite d'abord sous forme de gel pour bien enrober les particules du sol, et former une liaison, qui se cristallise finalement en silicate/aluminate de calcium hydraté. Les produits de cimentation sont largement similaires à celles de la composition de pâte de ciment. Le processus est relativement lent, car la chaux est bloquée par la structure du sol et la cimentation initiale se produit aux sites de réaction.

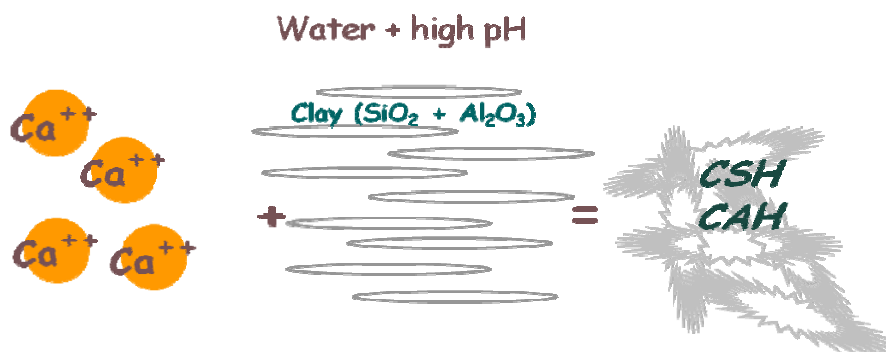


Figure 2.4 La réaction pouzzolanique entre l'argile et la chaux (Puiatti, 2006).

Cette réaction aboutit à un gain en résistance (Rogers, 1996). La plupart, mais pas toutes les argiles dans les régions tempérées sont suffisamment réactives pour développer une résistance importante et doivent être stabilisées à la chaux. Toutefois, à la température ambiante la réaction est lente et les sols stabilisés peuvent continuer à gagner de la résistance encore après un certain nombre d'années.

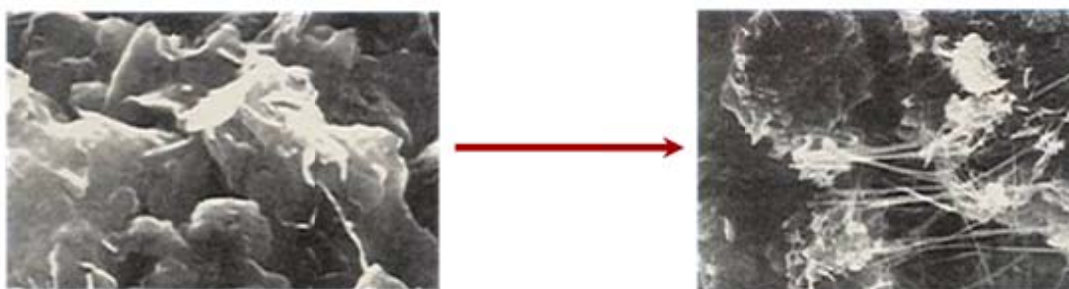


Figure 2.5 Effet de la chaux à long terme sur le sol (Puiatti, 2006).

2.4 Mécanismes de stabilisation :

Les essais au laboratoire indiquent que la chaux réagit avec les sols à grains fins pour produire une diminution de plasticité, accroissement de maniabilité et une augmentation de résistance (Little, 1995). Le gain en résistance est principalement dû aux réactions chimiques qui se produisent entre les particules du sol et de la chaux. Ces réactions chimiques se produisent en deux phases, avec des avantages immédiats et à long terme.

La première phase de la réaction chimique implique des changements immédiats dans la texture et les propriétés du sol, ces changements sont normalement causés par l'échange cationique qui provoque une agglomération des particules (figure 2.6). Le calcium libéré de la chaux s'échange avec les cations adsorbés des minéraux argileux, ce qui résulte en une réduction de l'épaisseur de la couche d'eau entourant les particules d'argile. D'après Geiman (2005) cette réduction de la couche d'eau diffuse permet les particules d'argile d'entrer en contact plus étroit entre elles, provoquant ainsi une floculation/ agglomération des particules d'argile, ce qui transforme l'argile en un matériau de comportement limoneux ou sableux. Dans l'ensemble, la phase floculation/agglomération de la stabilisation à la chaux résulte en un sol qui est plus facilement maniable et compactable. Selon Eades et Grim (1960), pratiquement tous les sols de grains fins traités à la chaux en présence d'eau subit cet échange cationique et les réactions de floculation / agglomération s'ils sont mélangés avec la chaux en présence d'eau.

La deuxième phase de la réaction chimique implique des réactions pouzzolaniques dans le mélange chaux-sol, entraînant un gain de résistance qui se réalise dans le temps. D'après Geiman (2005) lorsque la chaux est combinée avec un sol argileux en présence d'eau, le pH du milieu augmente. Lorsque le pH atteint 12,4, la silice et l'alumine de l'argile deviennent solubles et sont libérés des minéraux argileux. À son tour, la silice et l'alumine libérés réagissent avec le calcium de la chaux pour former du ciment, ce qui renforce dans un processus graduel qui se poursuit à plusieurs années (Eades et Grim, 1960). Tant qu'il ya suffisamment de calcium (chaux) à combiner avec la silice et l'alumine solubles, la réaction pouzzolanique continuera tant que le pH reste suffisamment élevé pour maintenir la solubilité de la silice et d'alumine (Little, 1995). Le gain en résistance dépend aussi en grande partie de la quantité de silice et d'alumine disponibles dans l'argile elle-même: ainsi, il a été constaté que la stabilisation à la chaux est plus efficace pour les sols montmorillonitiques que pour les sols kaolinlinitiques (Lees et al, 1982).

En plus des réactions pouzzolaniques, la carbonatation peut également mener aux augmentations à long terme de résistance pour des sols stabilisés avec la chaux. La carbonatation se produit quand la chaux réagit avec le gaz carbonique de l'atmosphère pour produire un carbonate de calcium relativement insoluble. Ceci peut être avantageux puisqu'après le mélange, le processus lent de la carbonatation et la formation des produits de cimentation peuvent mener à une légère augmentation à long terme de résistance (Arman et Munfakh, 1970) due à la présence du calcaire qui s'est formé. Cependant, avant de se mélanger, l'exposition de la chaux à l'air libre devrait être évitée par des méthodes de

ENSTP 2012 - Analyse de la réaction sol-chaux dans les sols stabilisés.

manipulation appropriées et des procédures expédiées de construction afin d'éviter la carbonatation prématurée de la chaux (Chou, 1987).

Quoique des recherches récentes laissant supposer l'existence d'un autre type de mécanisme pouvant expliquer les changements qui s'opèrent dans le sol stabilisé.

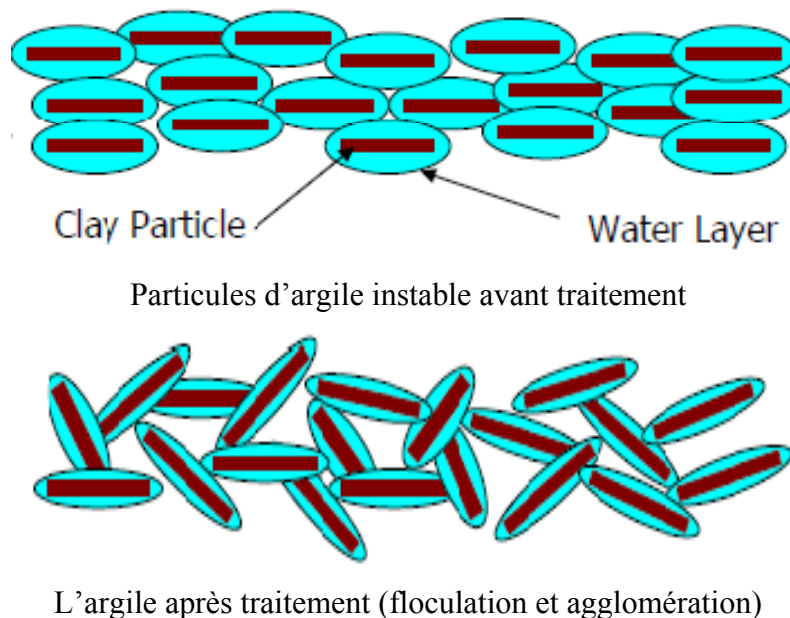


Figure 2.6 Effet de traitement sur la texture des particules argileuses.

2.5 Effets de la teneur en matière organique sur le sol traité à la chaux

D'après Little (2006) les sols qui ont une teneur en matière organique au-dessus de 2% par poids, comme déterminé par la méthode ASTM D 2974, peuvent être incapables d'atteindre la résistance à la compression simple désirée pour la stabilisation à la chaux. Rogers (1996) indique que le seuil de 2% de matière organique peut être dépassé si la résistance du sol stabilisé est jugée satisfaisante. Le type de la matière organique présente dans le sol influe considérablement sur le processus de stabilisation à la chaux plus que sa quantité (Sherwood, 1993). Plusieurs études ont montré que certains types de sols organiques ont été stabilisés à la chaux avec succès. Parmi ces études celles faites par Sakr et al (2008) et Kassim (2004) pour deux sols argileux contenant 14% et 5.8% de matière organique respectivement.

2.6 Effets des sulfates sur le sol traité à la chaux.

Il est connu depuis longtemps que la présence des sulfates dans un sol traité à la chaux peut causer des problèmes d'instabilité, les concentrations en sulfates plus élevées peuvent causer des réactions nuisibles entre : la chaux, les minéraux de sol, les ions sulfates et l'eau, cela peut conduire à une perte de stabilité (gonflement et provoquer des soulèvements). C'est une réaction complexe qui se base sur un certain nombre de facteurs. Les produits formés dans cette réaction (étringite) occupent un volume plus important que les parties constituantes, ENSTP 2012 - Analyse de la réaction sol-chaux dans les sols stabilisés.

entraînant une augmentation de volume et par conséquent une perte de résistance. Littleton (1995) a conclu que les facteurs qui contribuent à la réaction sont: Le type et la solubilité du sulfate, la quantité de sulfate, la quantité et la taille des particules d'argile présentes, la capacité du sol à absorber l'eau au-dessus du niveau auquel le mélange a été compactée. Les critères de sélection de mode de traitement (chaux) limitent les sulfates solubles à moins de 0,3% en poids ($< 0,3\%$ le risque est faible, $> 0,7-1\%$ le risque est important).

2.7 Détermination des teneurs en chaux

Généralement, tous les sols de grains fins traités à la chaux montrent une diminution de la plasticité, une amélioration de la maniabilité et une réduction de la déformation. Cependant, l'amélioration des caractéristiques de résistance ne se produit pas également pour tous les sols. Il faut bien remarquer que les propriétés des mélanges sol-chaux dépendent de plusieurs variables : Le type de sol, type de chaux, le pourcentage de chaux, et les conditions de conservation (temps, température, humidité).

La teneur en chaux à adopter pour le traitement d'un sol est en relation directe avec l'objectif visé par le traitement (modification, stabilisation, niveau de résistance recherché, type d'ouvrage ...). On définit ici 4 teneurs en chaux qui balisent la pratique du traitement des sols à la chaux : le point de fixation en chaux, la demande en chaux et la teneur initiale et la teneur optimale en chaux.

La quantité de chaux requise pour améliorer la qualité d'un sol est souvent déterminée selon la méthode de tâtonnement (Trial-and-Error Method). Par exemple, si on veut réduire l'indice de plasticité (I_p) du sol, quelques échantillons de mélange sol-chaux doivent être préparés à différents pourcentages de chaux. L'indice de plasticité pour chaque échantillon sera déterminé. La teneur en chaux minimale qui produit l'indice de plasticité désiré sera arrêtée. La même méthode sera utilisée pour l'amélioration de la granulométrie et la réduction du gonflement en effectuant les essais correspondants.

Des méthodes qui se basent un peu sur la compréhension des mécanismes qui construisent la réaction sol-chaux et beaucoup plus sur l'expérience représentent le point de départ pour l'ingénieur en charge du traitement du sol à la chaux.

Teneurs en chaux pour la modification

- Méthode du point de fixation de chaux

Le point de fixation de chaux d'un sol est considéré représenter la quantité de chaux requise pour opérer les réactions à court-terme (assèchement, échange cationique donc agglomération des particules ...) à la base des modifications immédiates qui s'opèrent dans le sol traité.

La méthode de détermination de ce taux de fixation est aussi traditionnelle. Cette teneur en chaux se détermine en utilisant la courbe qui montre la limite de plasticité en fonction de la teneur en chaux. Le point de fixation de chaux correspond à la valeur où l'addition de chaux ne provoque plus aucune variation dans la limite de plasticité du sol traité (Little, 1995).

Teneurs en chaux pour la stabilisation

Les méthodes suivantes sont recommandées pour la détermination de la teneur en chaux pour la stabilisation des sols à la chaux. Cette teneur est supposée être la demande en chaux du sol c'est-à-dire la teneur pour laquelle les réactions pouzzolaniques peuvent se produire et réaliser un gain notable en résistance.

- Méthode de détermination du pourcentage initial de chaux.

La méthode préférée pour la détermination de la teneur en chaux initiale est celle développée par Eades et Grim (1966) et adoptée par la norme ASTM D 6276a. Elle est utilisée pour déterminer le pourcentage initial de chaux qui correspond à un pH du mélange sol-chaux de 12.4 (le pH de la chaux). L'augmentation du pH du mélange sol-chaux-eau provoque la dissolution des silicates et aluminates ce qui permet la possibilité de développement de la réaction pouzzolanique et par conséquent la stabilisation du sol.

- Méthode alternative.

Une méthode alternative a été développée pour la détermination de la teneur en chaux initiale en utilisant la figure 2.7. Les valeurs spécifiques pour l'utilisation de cet abaque sont l'indice de plasticité (I_p) et le pourcentage des passants à travers le tamis N°40 (425 μ m). Un exemple pour l'utilisation de cet abaque est présent sur la même figure.

Teneur en chaux initiale – teneur en chaux optimale.

L'obtention de la teneur en chaux initiale permet de débiter la préparation des échantillons pour l'essai de compression simple ou de CBR et déduire les valeurs des résistances obtenues pour chaque pourcentage supérieur au pourcentage initial de chaux. Le pourcentage de chaux qui présente un gain de résistance à la compression simple de 345kPa (50psi) du sol traité par rapport au sol non traité, égal à la teneur en chaux optimale pour la stabilisation du sol (Département de transport de l'Illinois manuel géotechnique GMIDT, 1999).

On définit la teneur en chaux optimale comme étant le pourcentage de chaux pour lequel la caractéristique du sol à améliorer (généralement la résistance) atteint un maximum. Additionner plus de chaux au-delà de ce pourcentage mènerait à des performances plus faibles.

Il est important de signaler que cette teneur optimale n'a été mise en évidence que pour certains types de sols (Kassim, 2004).

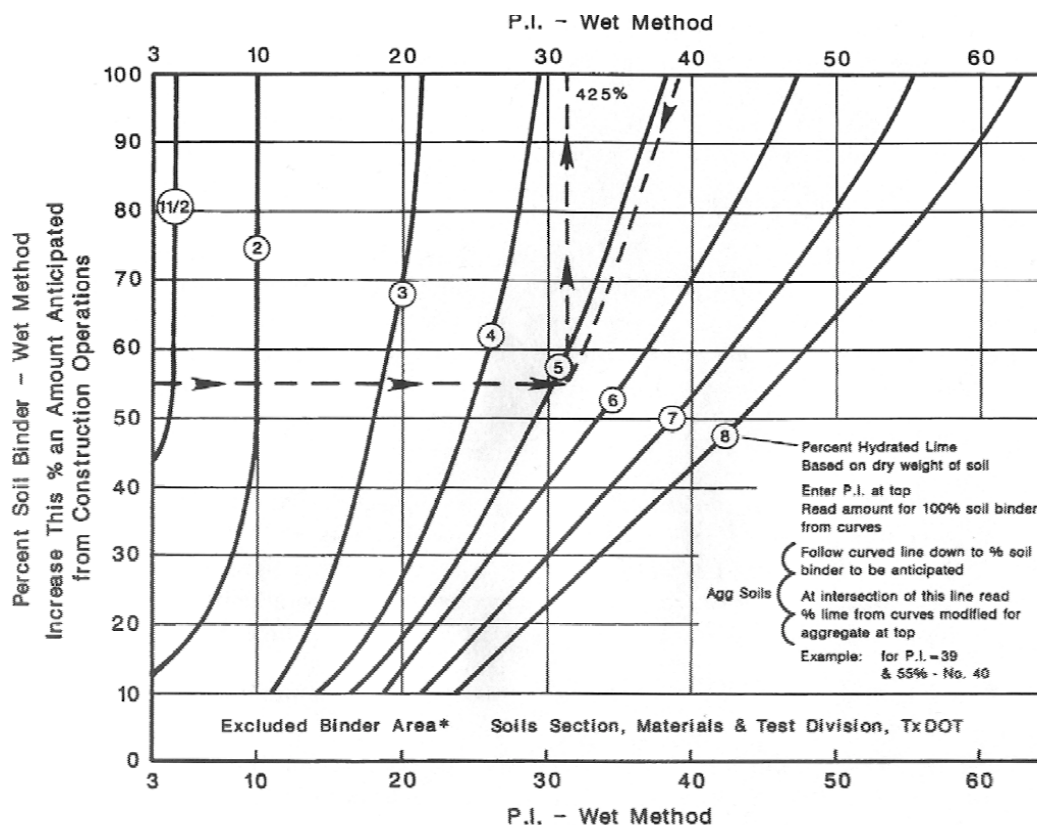


Figure 2.7 Abaque pour la détermination de la teneur en chaux initiale (Geiman, 2005).

2.8 Effets du traitement à la chaux sur les caractéristiques géotechniques du sol:

Dans cette partie on va présenter l'effet de l'ajout de chaux sur les caractéristiques physiques et mécaniques du sol stabilisé.

2.8.1 Sur la plasticité

L'addition de chaux aux sols argileux plastiques sert à réduire la plasticité. La limite de liquidité et la limite de plasticité changent, l'indice de plasticité diminue ce qui peut faire passer un sol humide, plastique, déformable et cohérent à un sol friable, apte au terrassement et plus facilement travaillable sur chantier (Little, 2006).

Perry et al (1995) ont constaté que les sols stabilisés à la chaux ont un comportement très différent et des caractéristiques de plasticité complètement différentes par rapport aux sols naturels non stabilisés.

Bell (1996) a étudié l'effet de l'ajout de chaux sur trois types de sol de minéralogies différentes. Il a montré que l'effet de la chaux sur la plasticité est plus ou moins instantané. La chaux cause une réduction de la plasticité et le sol devenant plus friable et plus facilement maniable. Il a néanmoins montré un comportement différent pour la kaolinite et le quartz (figure 2.8) qui affichent une augmentation de la limite de liquidité et l'indice de plasticité avec l'ajout de chaux.

Evans (1997) a montré que l'addition de chaux diminue la limite de liquidité progressivement, augmente la limite de plasticité jusqu'à une valeur qui n'est que le point de fixation de chaux, à partir duquel elle devient constante, et par conséquent diminue instantanément l'indice de plasticité.

Gueridi (2009) a montré que la limite de plasticité augmente avec l'ajout de chaux. Elle a expliqué ce résultat par le fait qu'à de faibles teneurs en eau, les particules se serrent et mettent en commun leur couche d'eau adsorbée et avec l'ajout de chaux ces agglomérations deviennent encore plus grandes rendant la quantité d'eau nécessaire pour envelopper un amas de particules, plus importante (figure 2.9).

D'autres auteurs (Mouissat, 2010 ; Beng, 2006 ; Sherwood, 1967) ont montré un comportement différent de la plasticité en fonction de la teneur en chaux pour la kaolinite. Ils ont montré que la limite de liquidité affiche une nette augmentation pour de faibles pourcentages puis une légère diminution pour des pourcentages de chaux importants.

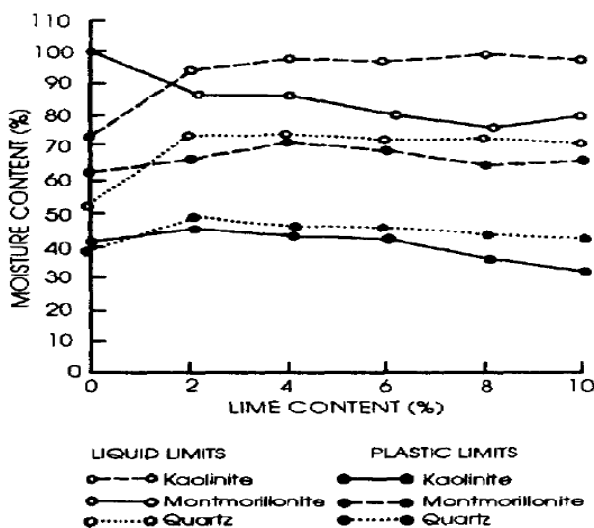


Figure 2.8 Effet de la chaux sur la plasticité de sol (Bell, 1996).

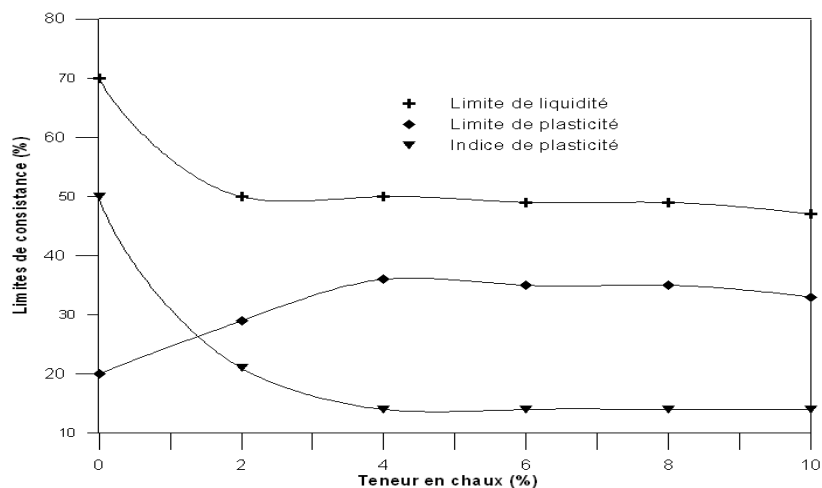


Figure 2.9 Variation de la consistance avec l'ajout de chaux (Gueridi, 2009).

Sakr et al (2008) ont montré aussi que la limite de liquidité du sol traité augmente avec l'accroissement du pourcentage de chaux (figure 2.10) mais diminue avec l'augmentation de temps de cure. La limite de plasticité augmente aussi avec l'ajout de chaux et diminue avec le temps. L'indice de plasticité diminue aussi avec l'ajout de la chaux et augmente avec le temps de cure (figure 2.11). Ces auteurs n'ont pas proposé d'explication à ces résultats.

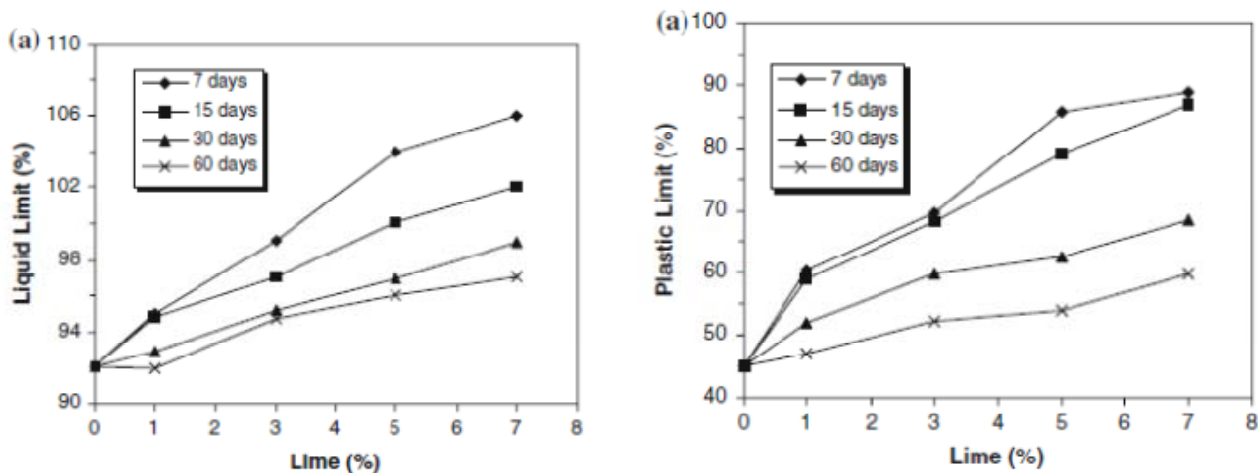


Figure 2.10 Effet de l'addition de la chaux sur la plasticité d'après Sakr et al (2008).

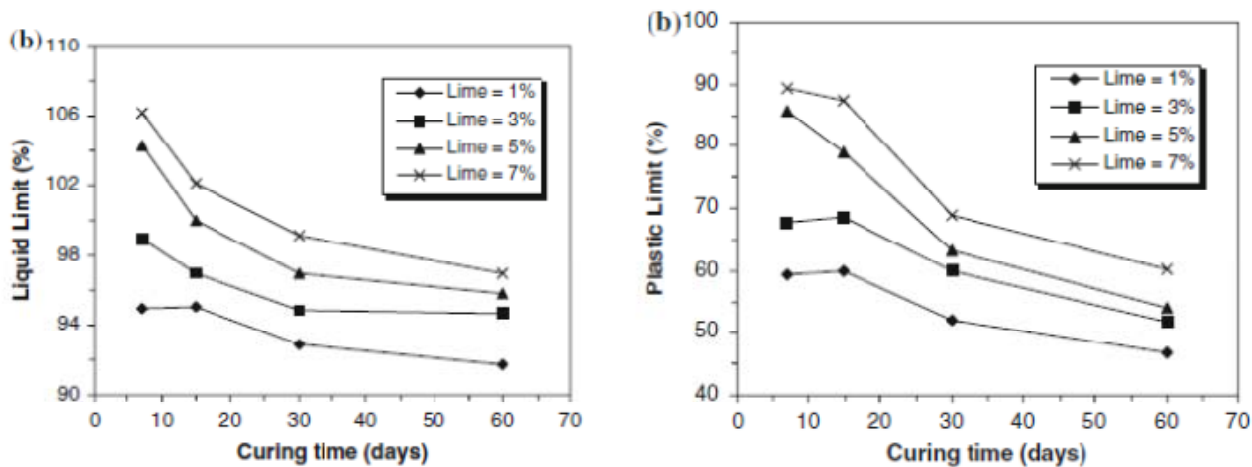


Figure 2.11 Effet de temps de cure sur la plasticité d'après Sakr et al (2008)

2.8.2 Sur les paramètres de compactage

L'ajout de la chaux au sol, provoque une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la masse volumique sèche maximale (figure 2.12). La courbe Proctor du sol stabilisé s'aplatit avec la teneur en chaux indiquant une plus faible sensibilité du sol à l'eau (Little, 1995 ; Bell, 1996 ; Lazzali, 1997 ; Afès, 1999).

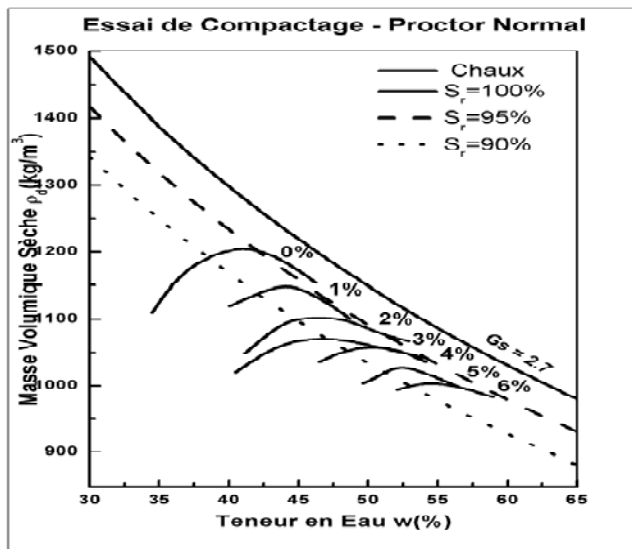


Figure 2.12 Effet de la chaux sur le compactage (Mouissat, 2010).

2.8.3 Sur le gonflement :

Little (1995) a donné la relation entre le potentiel de gonflement et l'indice de plasticité représenté dans la figure 2.13. L'ajout de la chaux permet une réduction de la capacité du sol au gonflement et au retrait.

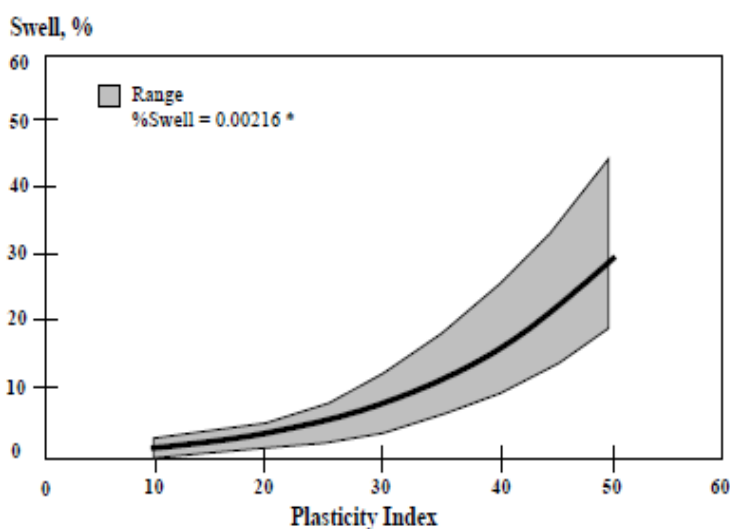


Figure 2.13 Relation entre le potentiel de gonflement et l'indice de plasticité (Little, 1995).

La cinétique du gonflement libre est représentée dans la figure 2.14. D'après Gueridi (2009) Les courbes montrent que le potentiel de gonflement a diminué de manière substantielle à partir de l'ajout de 2%. Ceci démontre que le gonflement est lié à la plasticité. La diminution de la plasticité est due à une altération de films d'eau autour des minéraux argileux dans le sol. Les cations Na^+ et K^+ sont échangés par Ca^{2+} qui sert à lier les particules du sol les unes aux autres (Bell, 1988).

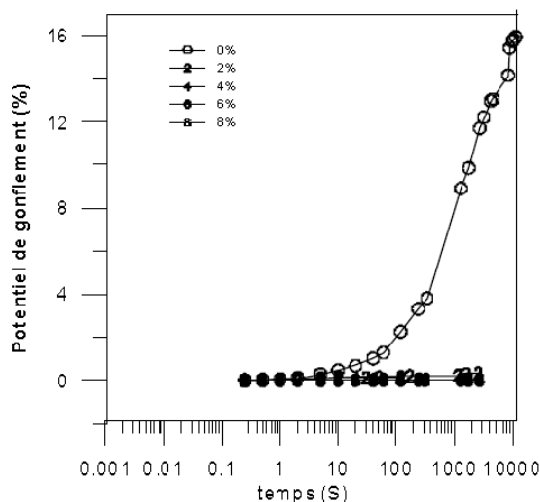


Figure 2.14 Variation du potentiel de gonflement avec le taux de chaux à 28 jrs (Gueridi, 2009).

2.8.4 Sur le CBR :

Le CBR des sols argileux est amélioré immédiatement et continue à augmenter dans le temps par l’ajout de chaux. L’augmentation de l’indice CBR peut être justifiée par l’augmentation du frottement entre les particules résultat de l’agglomération des particules argileuses, suite aux échanges cationiques entre le sol et la chaux. Des études ont montré que la valeur de l’indice CBR à long terme est beaucoup plus importante que celle mesurée immédiatement, ce qui montre le rôle des réactions pouzzolaniques dans le développement de la résistance.

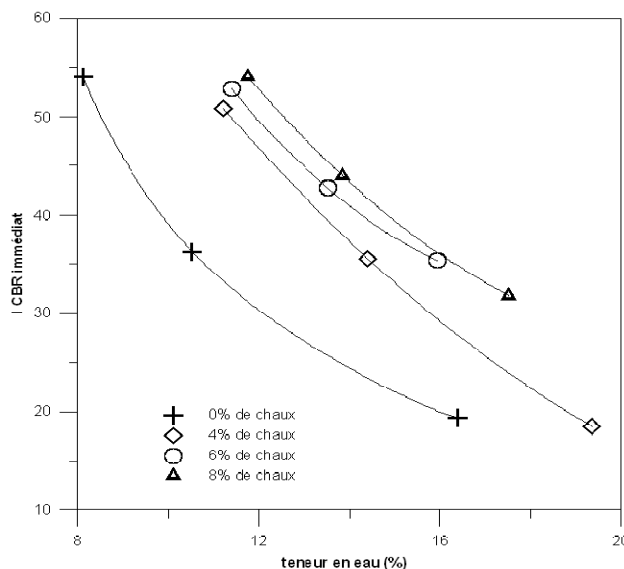


Figure 2.15 Variation du I_CBR avec le taux de chaux à 28 jrs (Gueridi, 2009).

2.8.5 Sur la résistance mécanique à la compression simple

La résistance mécanique augmente avec le pourcentage de chaux. Aissiou (2009) a fait une étude sur l’amélioration des caractéristiques mécaniques d’un sol argileux par incorporation de chaux. Cette étude a été faite sur deux types de sol de la même région, le premier a été obtenu de Chéraga et le deuxième d’Ouled Fayet. Il remarque que : la résistance à la

ENSTP 2012 - Analyse de la réaction sol-chaux dans les sols stabilisés.

compression simple augmente avec l'accroissement du pourcentage de chaux. Elle a été nettement améliorée avec l'ajout de chaux et 4% est une teneur suffisante pour améliorer les caractéristiques mécaniques des deux sols. L'ajout de la chaux à 4% a doublé la résistance à la compression.

En se basant sur une étude réalisée sur cinq types de sol argileux, Kassim (2004) a montré que la majorité des sols traités à la chaux affichent un pic dans la courbe de compression simple en fonction de la chaux. La différence remarquée est la valeur de la teneur en chaux optimale pour atteindre une résistance maximale (figure 2.16).

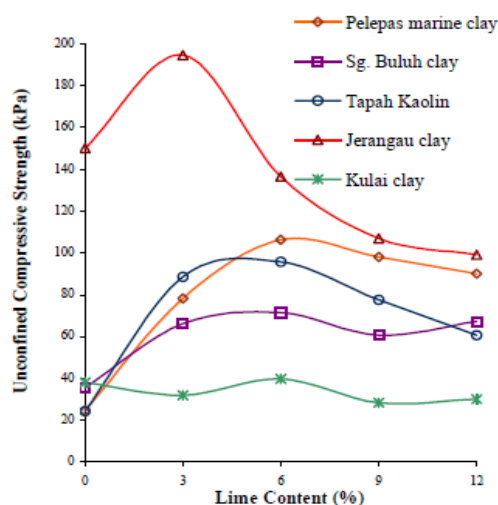


Figure 2.16 Effet de la chaux sur la résistance mécanique (Kassim, 2004).

Les résultats de Bell (1996) retrouvent les courbes à pic pour la résistance à la compression simple en fonction de la teneur en chaux uniquement pour la montmorillonite (figure 2.17).

Sakr et al (2008) ont utilisés un sol argileux dont la résistance à la compression simple (non traitée) a été estimée à 10kPa.

La courbe contrainte-déformation montre que la déformation du sol non traité continue jusqu'à une valeur constante. Les courbes contrainte-déformation du sol traité présentent des pics remarquables, cela dépend du pourcentage de chaux et du temps de cure qui est lié à la cimentation des particules due à la réaction pouzzolanique. Selon les résultats de ces auteurs le pourcentage de 3% est le pourcentage où le comportement du sol traité passe de l'état ductile à l'état fragile.

Le module d'élasticité E , et la cohésion non drainée augmentent aussi avec l'augmentation de la teneur en chaux et le temps de cure (figure 2.18).

L'augmentation la plus importante de la résistance à la compression simple se réalise dans le temps (accompagnée de la rigidité) comme l'indique la figure 2.19 (Lasledj, 2009 ; Mouissat, 2010).

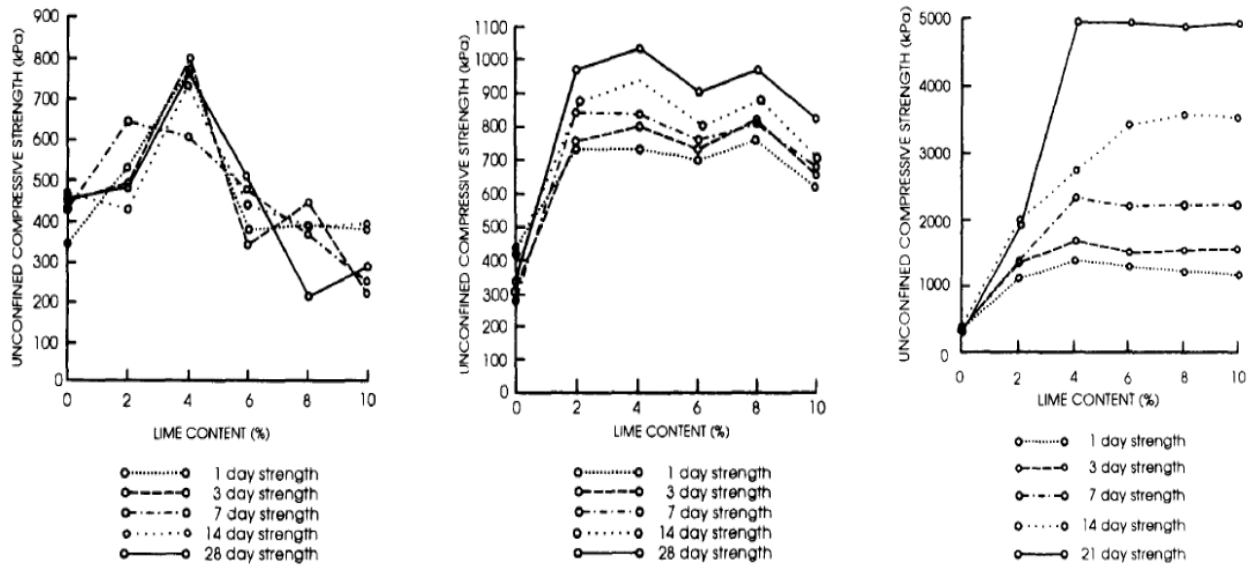


Figure 2.17 Variation de la RCS avec l’addition de la chaux pour : 1) La montmorillonite, 2) La Kaolinite et 3) Le quartz (Bell, 1996).

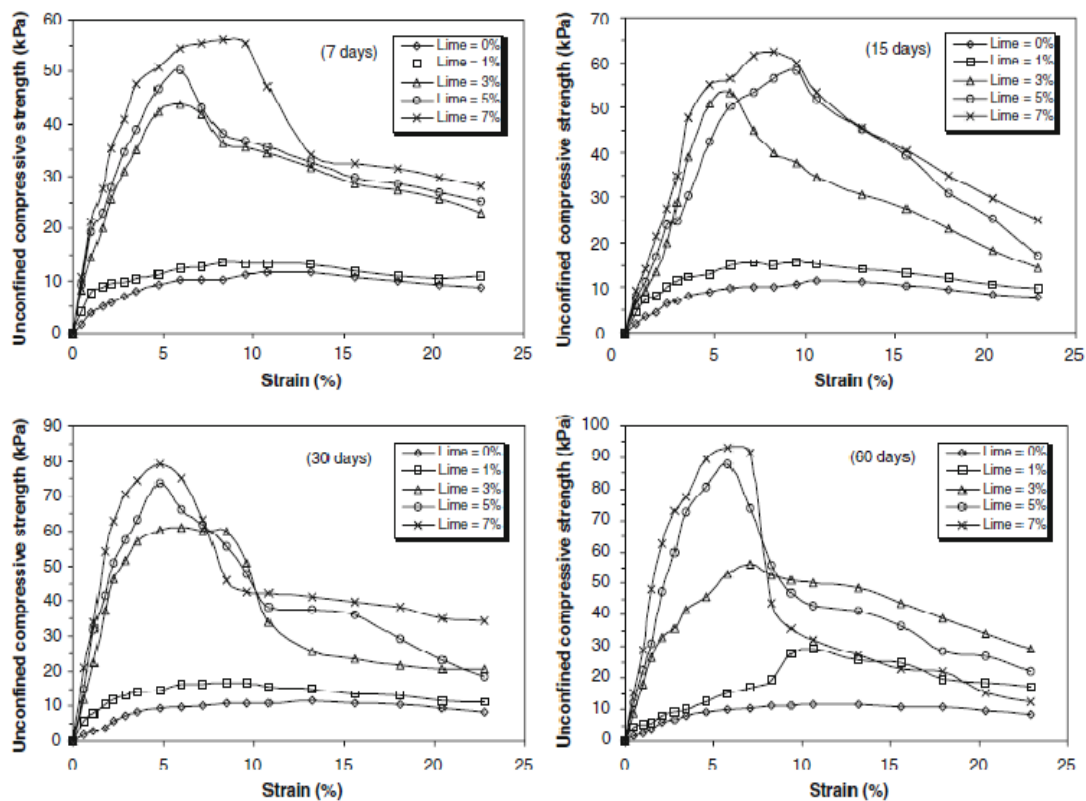


Fig. 6 Stress-strain curves of untreated and lime-treated soft clays

Figure 2.18 Evolution de la résistance à la compression simple avec l’ajout de chaux (Sakr et al, 2008).

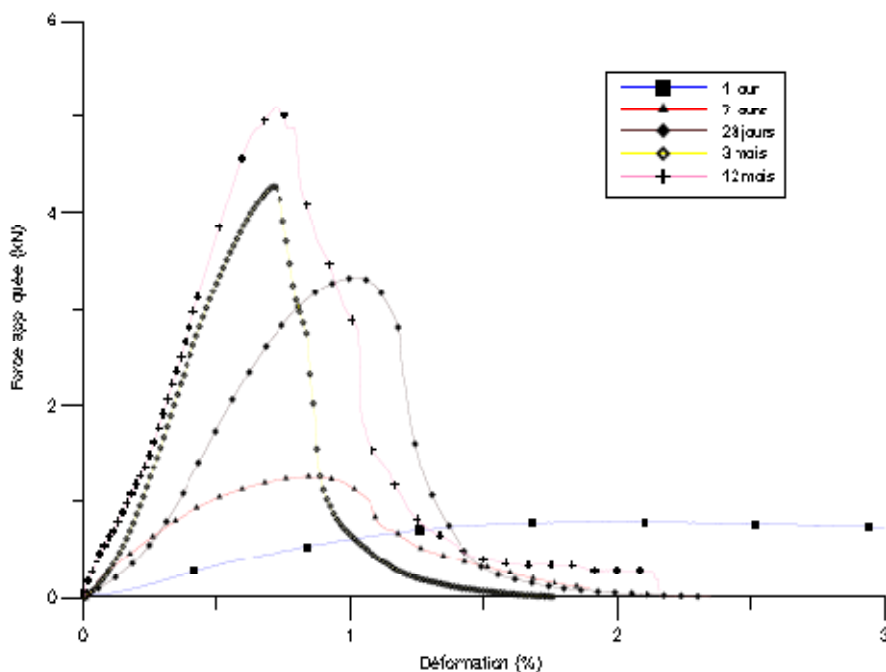


Figure 2.19 Evolution de RCS pour 10% de chaux à différents temps de cure (Lasledj, 2009).

2.8.6 Sur la résistance au cisaillement

Aissiou (2009) a fait une étude sur l'amélioration des caractéristiques mécaniques d'un sol argileux par incorporation de chaux. Les résultats de cette étude sont rassemblés dans la figure 2.20.

A court terme, la résistance au cisaillement des deux sols argileux augmente avec le dosage en chaux. L'angle de frottement pour chaque dosage en chaux a connu une certaine augmentation, la plus grande est à 4% de chaux, ensuite il note une stabilisation de cette résistance à partir de 6% chose pour laquelle il dit que la chaux améliore les qualités mécaniques des argiles, les résistances sont améliorées de façon remarquables.

L'angle de frottement a connu des augmentations avec différents dosages, la cohésion qui était petite initialement a connu une légère amélioration à 2% de dosage pour l'échantillon n°2 et une amélioration remarquable à 4%, l'amélioration de la cohésion pour le 1er échantillon a été constatée à 6%. Ceci est dû à la réaction pouzzolanique qui prend place. Des minéraux de quartz, de la taille de limon fin, en plus des minéraux de l'argile, prennent très probablement part à cette réaction. Des produits à réaction agglutinante se forment et augmentent la capacité de résistance du sol. Les produits agglutinants principaux sont les silicates et les aluminates de calcium.

A long terme, la cohésion augmente car les particules argileuses sont soudées et l'angle de frottement ne change plus.

Echantillons utilisés	Echantillon n°1					Echantillon n°2					
	C [bars]	ϕ [°]	τ_{pic} [bars]			C [bars]	ϕ [°]	τ_{pic} [bars]			
			$\sigma = 1bar$	$\sigma = 2bar$	$\sigma = 3bar$			$\sigma = 1bar$	$\sigma = 2bar$	$\sigma = 3bar$	
Dosage en chaux [%]											
0	0,07	18,75	0,31	0,95	0,99	0,26	11,23	0,47	0,50	0,86	
2	0,08	21,45	0,95	0,68	1,25	0,15	17,23	0,47	0,79	1,65	
4	0,07	27,65	0,60	1,35	1,62	0,80	32,74	1,22	1,54	1,91	
6	0,67	23,90	0,99	1,56	1,99	0,32	25,18	0,22	1,26	1,73	

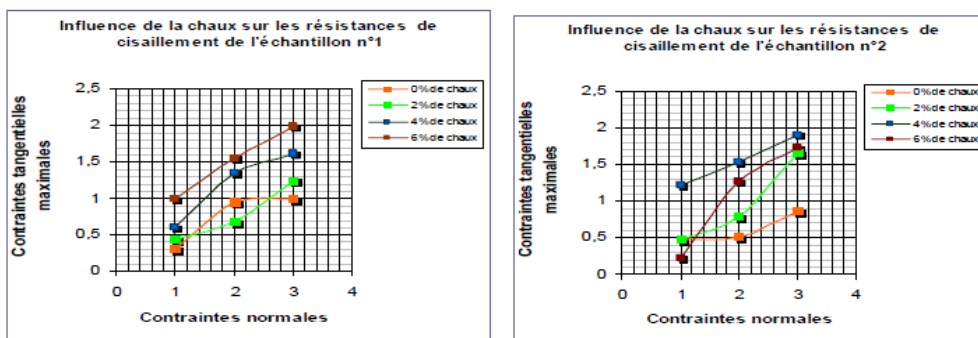


Figure 2.20 Variation de la résistance au cisaillement en fonction de dosage en chaux (Aissiou, 2009).

Mellal (2008) a étudié les variations de la cohésion et de l'angle de frottement avec le pourcentage en chaux évaluées immédiatement à 7, 14 et 28 jours. La figure 2.21 illustre ces variations. Les résultats obtenus montrent une forte amélioration de la cohésion et de l'angle de frottement interne des mélanges à durée de cure de 7 jours et une légère augmentation à 14 et 28 jours de cure.

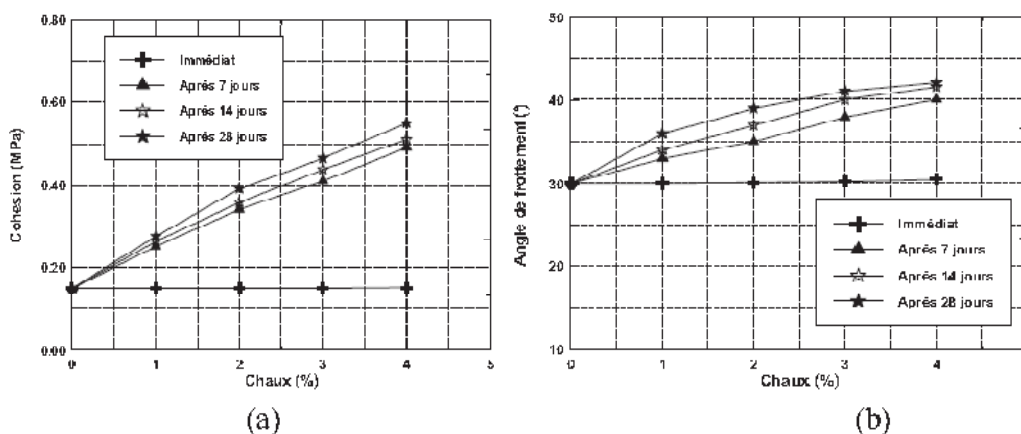


Figure 2.21 Variation des paramètres de cisaillement en fonction du pourcentage de chaux additionné pour les différentes durées de cure (Mellal, 2008).

La figure 2.22 montre l'évolution de la contrainte de cisaillement à la rupture pour les trois contraintes normales appliquées lors de l'essai de cisaillement direct en fonction du

pourcentage d'ajout de chaux selon Mouissat (2010). La figure montre que pour un même pourcentage de chaux la contrainte de cisaillement à la rupture augmente avec l'accroissement de la contrainte normale. L'augmentation du pourcentage de chaux engendre une augmentation appréciable de la contrainte de cisaillement à la rupture lorsque celle-ci passe de 0 à 2%. Au-delà de 2% de chaux la quantité de chaux ajoutée semble ne pas avoir une grande influence sur cette contrainte et par conséquent demeure constante.

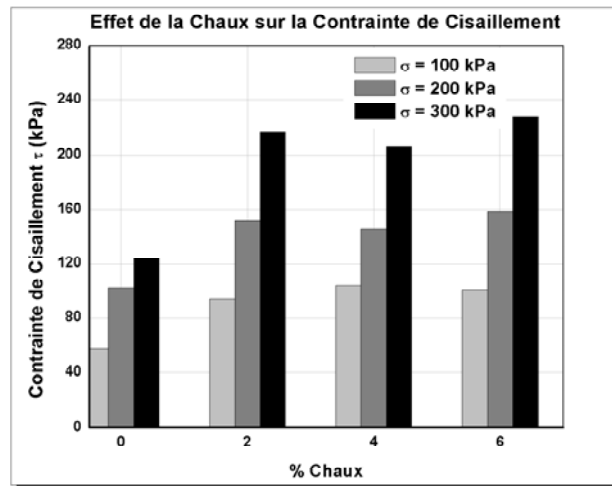


Figure 2.22 Effet de la chaux sur la contrainte maximale de cisaillement (Mouissat, 2010).

2.8.7 Sur le pH du sol stabilisé:

Clare (1988) montre que la valeur du pH augmente considérablement avec l'addition de chaux jusqu'à un pourcentage de 4% où elle reste constante. Le pourcentage de 4% est la teneur en chaux initiale de stabilisation.

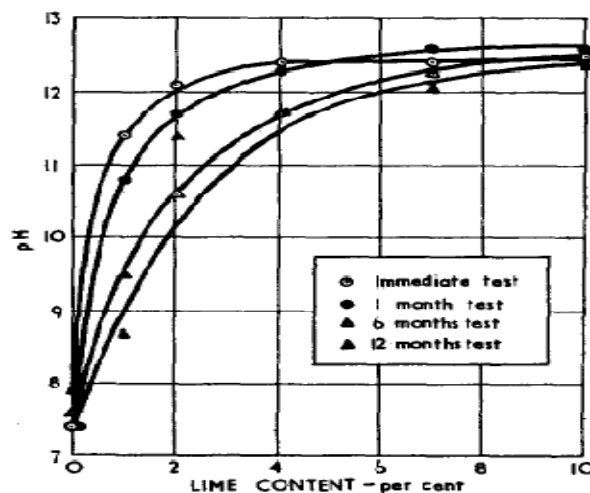


Figure 2.23 Evolution des valeurs de pH du sol avec le temps de cure pour différents taux en chaux (Clare, 1988).

La figure 2.24 présente les variations de pH des mélanges sol-chaux avec le temps de maturation à 20°C pour différents pourcentages de chaux ajoutée (2% – 20%) selon Lasledj (2009). Les résultats obtenus après les premières heures montrent que le pH du mélange augmente de 10,6 (pH de sol non traité) à 12,3 et 12,4 avec l'addition des 2 et 4% de chaux respectivement. Pour des pourcentages de chaux plus élevées, le pH du mélange est d'environ 12,4 à 12,5. Ces valeurs de pH correspondent à celle d'une solution saturée en chaux (pH= 12,4). Avec le temps, le pH diminue ce qui s'explique par la réduction de la quantité de la chaux qui a été consommée dans la réaction d'hydratation et pouzzolanique.

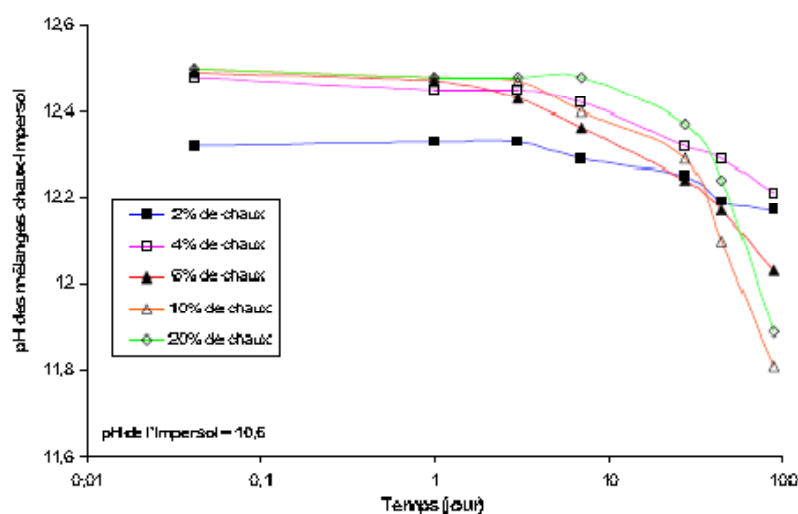


Figure 2.24 Variation du pH des mélanges sol-chaux avec le temps de cure et avec différents taux de chaux (Lasledj, 2009).

2.8.8 Sur la compressibilité de sol :

La compressibilité de sol est affectée par l'addition de chaux. L'indice de compressibilité et de gonflement diminuent ce qui implique que la compressibilité diminue.

La figure 2.25 donne les résultats des courbes oedométriques obtenus pour les échantillons de sol argileux traités à 6% de chaux (Lasledj, 2009). Elle montre que la compressibilité diminue lorsque le temps de maturation augmente à 28 jours puis reste approximativement identique au-delà de 28 jours. Cependant, pour tous les échantillons la différence dans l'indice des vides (Δe) est de 0,14 à 0,15. Ceci signifie que les comportements élasto-plastiques des différents échantillons testés sont similaires.

Rao et al, 2005 ont examinés le comportement de compressibilité sol stabilisé – chaux avec deux pourcentages de chaux 4 et 7%. Ils ont montré que les liaisons de cimentation formées pendant les réactions de stabilisation réduisent la compressibilité de l'argile et transmettent les efforts appliqués aux particules argileuses.

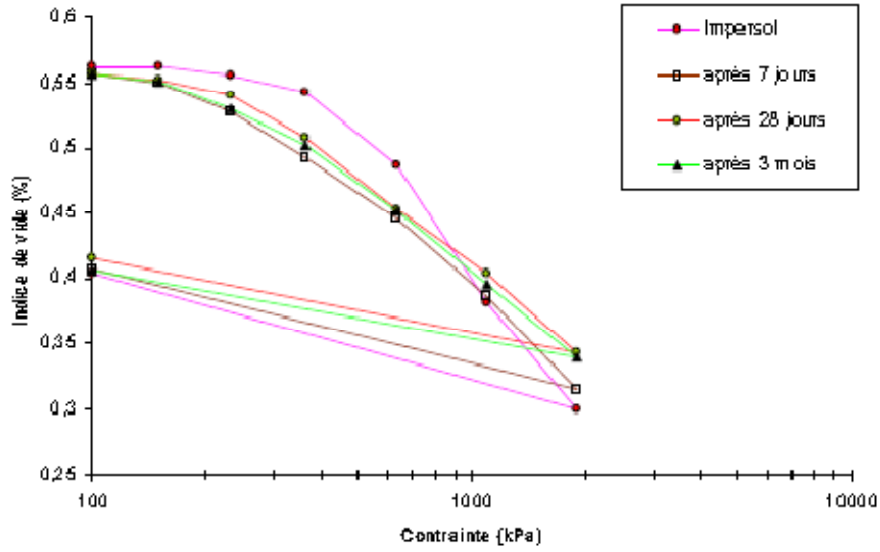


Figure 2.25 Evolution de la compressibilité de sol traité à 6% de chaux (Lasledj, 2009).

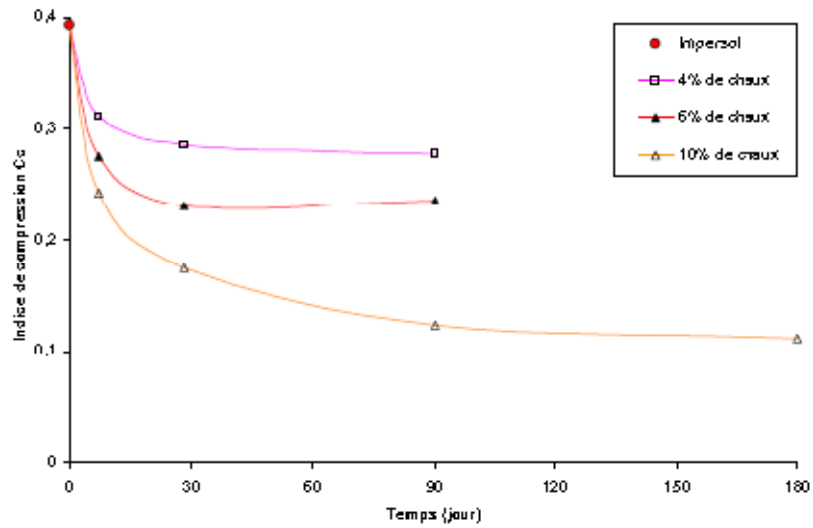


Figure 2.26 Evolution de l'indice de compressibilité de sol traité à la chaux (Lasledj, 2009).

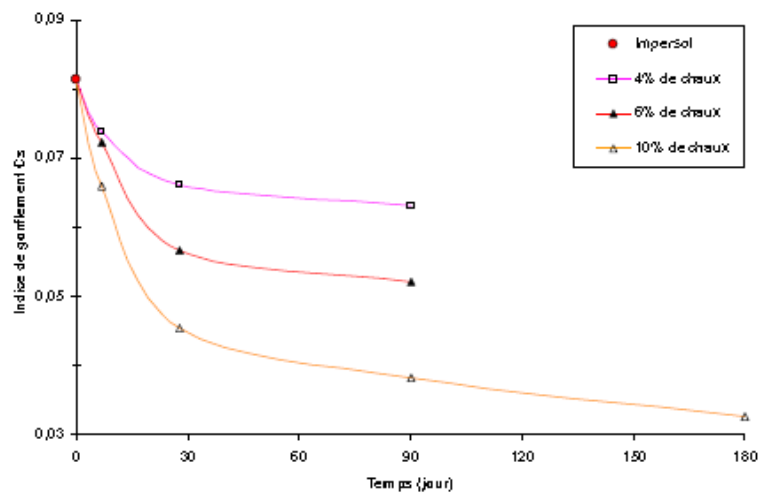


Figure 2.27 Evolution de l'indice de recompressibilité de sol traité à la chaux (Lasledj, 2009).

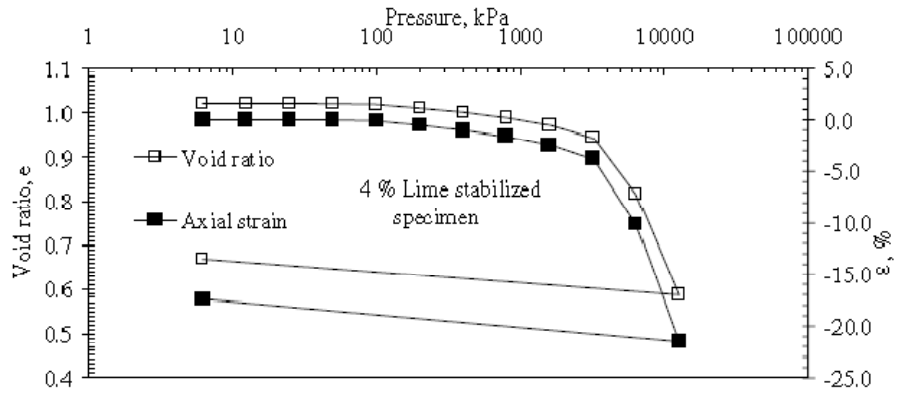


Figure 2.28 La compressibilité de sol stabilisé à 4% de chaux (Rao, 2005).

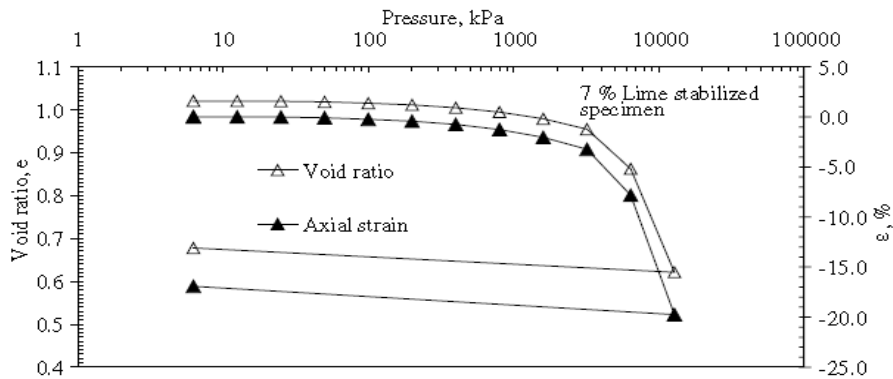


Figure 2.29 La compressibilité de sol stabilisé à 7% de chaux (Rao, 2005).

2.8.9 Sur le module oedométrique :

Le module oedométrique est influencé par le dosage en chaux d’après Lasledj (2009) l’augmentation de la teneur en chaux et la maturation accroît le module oedométrique de sol traité. De plus, dans l’échantillon traité avec 10% de chaux, l’augmentation du module est importante et continue jusqu’à 6 mois de maturation. Les modifications dans les modules des échantillons traités à 4 et 6% de chaux sont obtenues à court terme (1 mois).

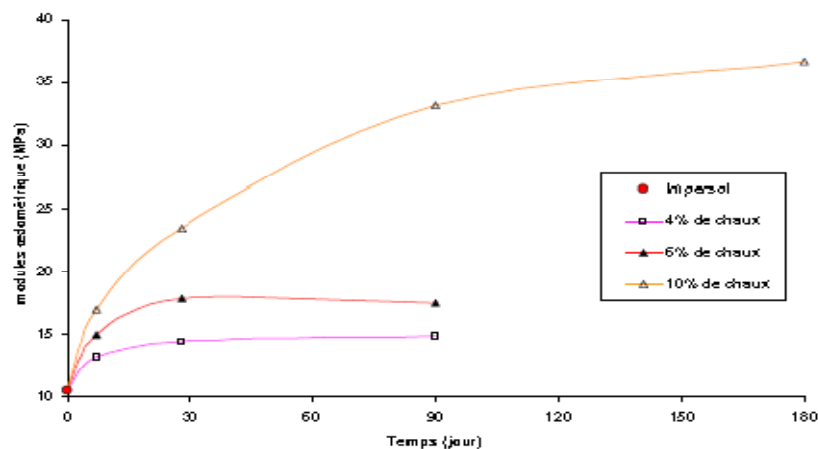


Figure 2.30 Evolution de module oedométrique avec le temps et le pourcentage de chaux (Lasledj, 2009).

2.8.10 Sur le module d'élasticité :

Le module d'élasticité est la tangente initiale de la courbe de compression simple. La variation de ce module pour une kaolinite étudié par Mouissat (2010) et traitée à 3% de chaux est remarquable il augmente avec l'accroissement de la teneur en chaux. Avec l'accroissement du temps de cure augmente le module d'élasticité de sol.

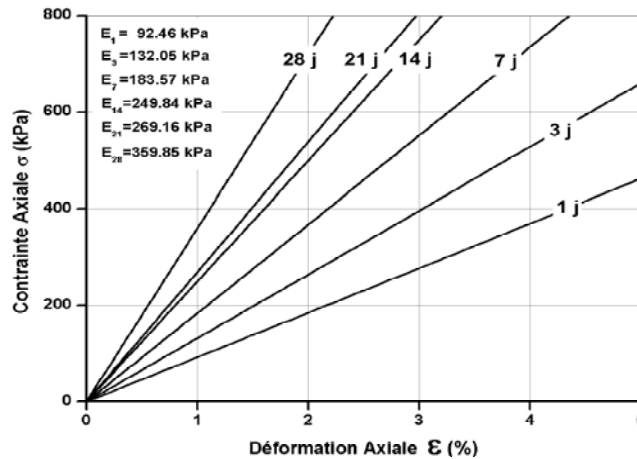


Figure 2.31 Effet de temps de cure et taux en chaux sur le module d'élasticité (Mouissat, 2010).

2.8.11 Sur la perméabilité de sol :

Les études expérimentales ont montré que la perméabilité augmente avec l'ajout de chaux immédiatement car le traitement avec la chaux réduit l'épaisseur de la couche d'eau adsorbée par échange cationique et provoque la floculation. Lasledj (2009) a montré que la perméabilité augmente avec l'augmentation de pourcentage de chaux. Il a montré aussi qu'avec l'augmentation de temps de cure la perméabilité diminue. La diminution de la perméabilité est due à la diminution de la porosité à cause de développement de nouvelles liaisons de cimentation.

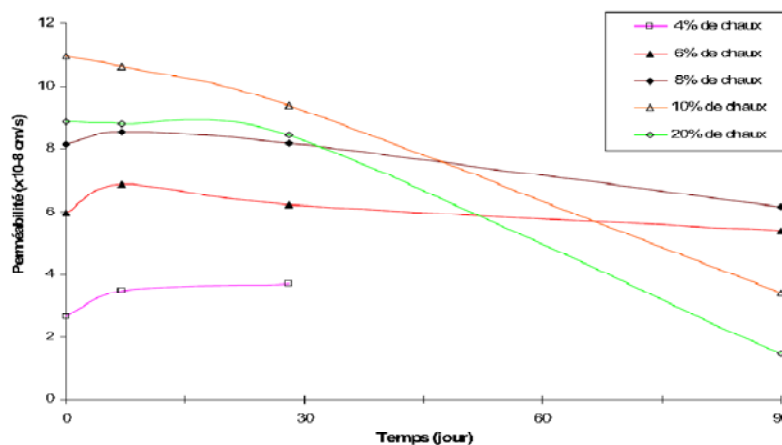


Figure 2.32 Evolution de la perméabilité avec le temps de cure et le pourcentage de chaux (Lasledj, 2009).

2.9 Technique de réalisation des travaux de traitement :

La réalisation des travaux de traitement des sols fait appel suivant les cas de chantier à un certain nombre d'opérations élémentaires exigeant un ordonnancement précis, un savoir faire et des matériels spécifiques. D'après Dupraz (2006) la réalisation des travaux de traitement d'un sol en place suit en général les opérations élémentaires suivantes :

- La préparation du sol à traiter (élimination des éléments grossiers, homogénéisation).
- L'épandage du liant de traitement.
- Le malaxage du liant avec le sol.
- L'ajustement de l'état hydrique (soit humidifier le sol par arrosage, soit l'assécher par aération).
- Le réglage du mélange.
- Le compactage.
- L'application de la protection superficielle du sol traité (cas d'une couche de forme).

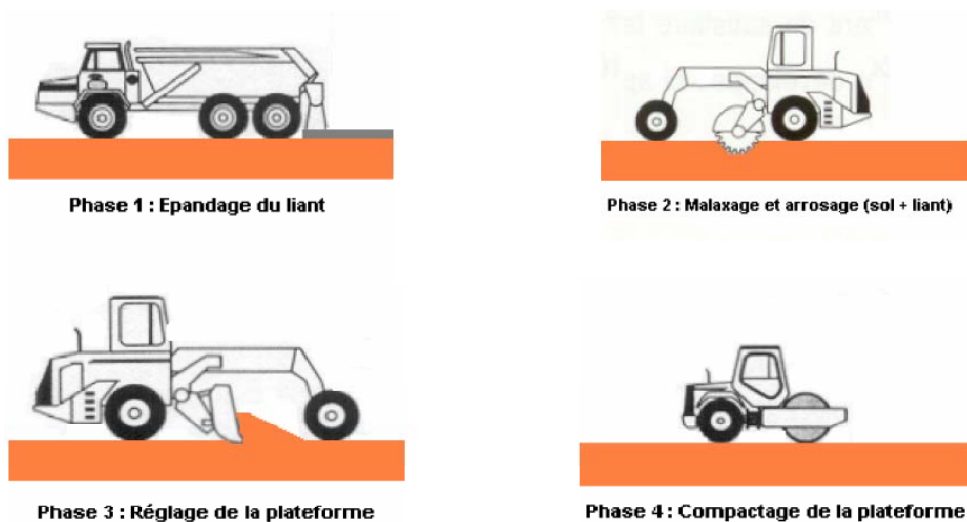


Figure 2.33 Procédé de traitement des sols (Dupraz, 2006).



Figure 2.34 Exemple de traitement de sol à la chaux.

Chapitre 03

Matériaux de l'étude et méthodes expérimentales

3.1. Introduction

On présente dans ce chapitre le programme expérimental effectué au laboratoire dans le cadre de cette étude. On identifie les matériaux utilisés et on expose les méthodes expérimentales suivies pour réaliser les différents essais.

3.2. Identification des matériaux de l'étude

Le sol objet de l'étude est un matériau reconstitué d'un sol naturel (80%), et de bentonite (20%). Il sera traité à la chaux à des pourcentages pondéraux choisis. On identifie dans cette section tous les matériaux utilisés dans cette étude.

3.2.1. Le sol naturel

✓ Provenance

Le sol naturel utilisé a été récupéré à partir d'un site de l'Ecole Nationale des Travaux Publics. C'est un remblai entreposé depuis quelques années à cet endroit en attendant son évacuation. Il a été extrait au début de janvier 2011, à une profondeur d'environ 30-40 cm. Il est de couleur marron claire, et sa teneur en eau naturelle est de 12%. Une série d'essais a été effectuée au laboratoire pour classer le sol. Tous les essais ont été réalisés selon les normes AFNOR1990.

✓ Essai du bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène a été conduit selon la norme française NF-P94-068. La valeur au bleu de méthylène obtenue est 2,5. Elle a permis d'obtenir une surface spécifique de $53 \text{ m}^2/\text{g}$. La détermination de la surface spécifique des fines a été déterminée par la relation de Gaillabaud et Cinot (1982). Cette relation relie la surface spécifique à la valeur au bleu de méthylène selon l'équation : $S = 21 \times V_B (0/2\mu\text{m}) \text{ (m}^2/\text{g)}$.

✓ Composition chimique de sol

La composition chimique du sol naturel est donnée dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Analyse chimique de sol naturel

SO ₄ ⁻	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P.F	Insolubles
Traces	46.38%	16.80%	9.28%	7.20%	18.36%	80.91%

✓ La distribution granulométrique

L'analyse granulométrique du sol comprend trois étapes : le tamisage par voie humide (XP P 94-041), le tamisage à sec après lavage (NF P 94-056) et la sédimentométrie (NF P 94-057).

Cette analyse, complétée par d'autres paramètres, permet de classer le matériau à partir de la dimension des grains. La courbe granulométrique du sol naturel est donnée dans la figure 3.1.

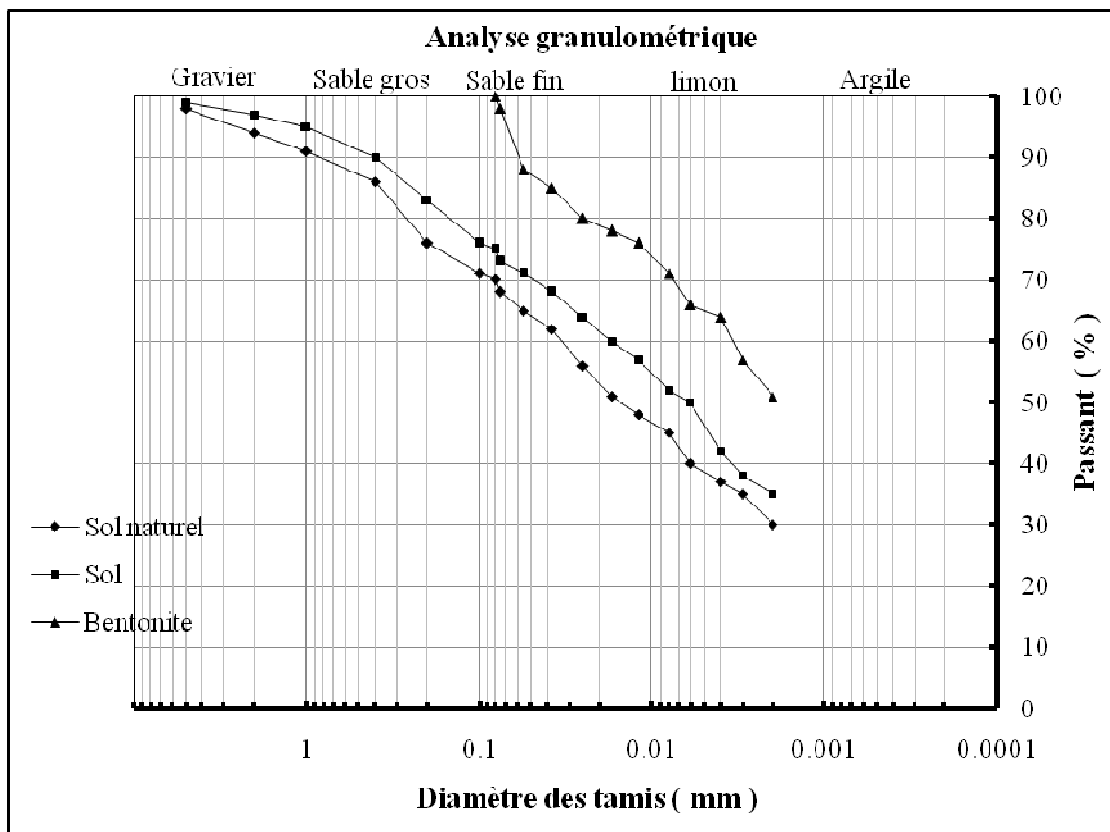


Figure 3.1 Courbe granulométrique des matériaux utilisés.

La courbe granulométrique montre que le sol naturel étudié a une granulométrie étalée avec un coefficient d'uniformité très élevé. Le pourcentage des fines (inférieures à 80µm) est de 70%. La fraction d'argile est de 30%.

✓ **Les limites d'Atterberg :**

La limite de liquidité a été déterminée par l'appareil de Casagrande, elle est de 39%. La limite de plasticité est de 19%, elle a été déterminée par la méthode de fuseau sur une surface plane. L'indice de plasticité, $I_p = W_L - W_P$, est de 20%. Le quotient de l'indice de plasticité au pourcentage d'argile présent dans le sol s'appelle l'activité. La corrélation entre ces deux propriétés exprime quelque peu l'aptitude du sol à être stabilisé à la chaux. Cette corrélation est donnée par l'équation proposée par Skempton (1953) :

$$Ac = \frac{\text{Indice de plasticité } (I_p)}{\% \text{ de fraction argileuse } \leq 2\mu\text{m}}$$

D'après sa situation dans l'abaque de Casagrande le sol naturel est une argile moyennement plastique et selon la classification GTR elle appartient à la classe A2. Son activité électrochimique est 0.67.

✓ Les caractéristiques du compactage

L'essai Proctor normal a été conduit selon la norme en vigueur. La valeur de la teneur en eau optimale est de 18% correspondant à une masse volumique sèche maximale de $1,70 \text{ t/m}^3$. La courbe Proctor pour le sol naturel est présentée sur la figure 3.2.

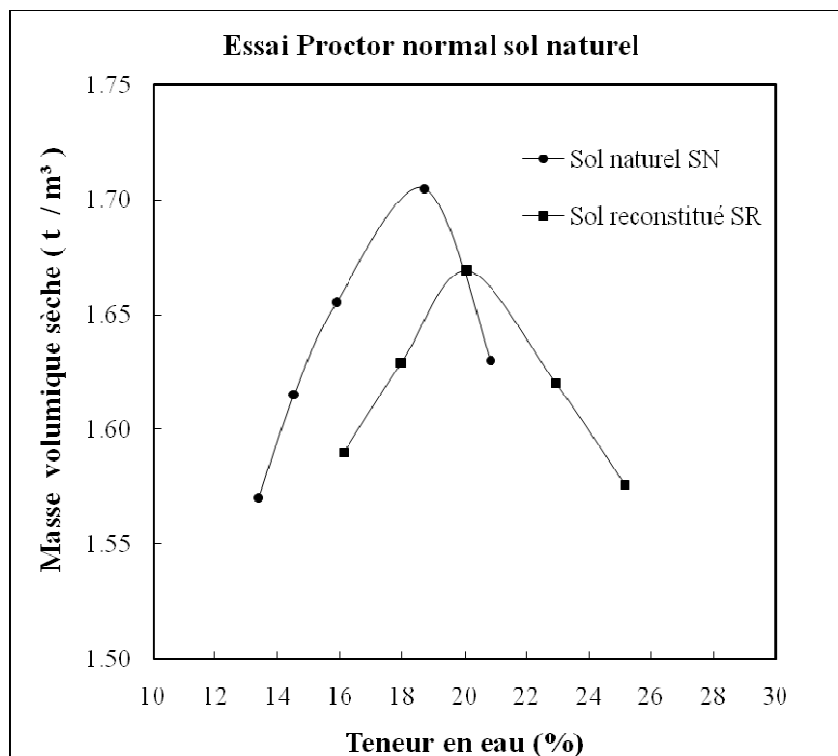


Figure 3.2 Courbe de compactage des sols utilisés.

3.2.2. La chaux

La chaux utilisée pour le traitement est commercialisée par l'entreprise Algérienne BMSD, briqueterie moderne de Saida. Elle est conditionnée dans des sacs de 25kg portant un tag rouge. Elle se présente sous forme d'une poudre blanche passant entièrement au tamis de 0.08 mm. Les propriétés physiques et chimiques de la chaux de Saida sont données dans les tableaux 3.2 et 3.3. Ses limites d'Atterberg sont déterminées au laboratoire. Sa limite de liquidité est 65%, sa limite de plasticité est 44%, et son indice de plasticité est 23%.

Tableau 3.2 : composition chimique de la chaux.

SO ₃	SiO ₂	CaCO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O+K ₂ O
< 0.5	< 2.5	< 10	< 1.5	< 2.0	< 5.0	< 0.5	> 73.3	0.45

Tableau 3.3: caractéristiques physiques de la chaux.

Densité spécifique	Plus de 90 µm	Densité apparente
2 g/cm ³	< 10%	600- 900 g/l

La Teneur en CaO = 73.3% > 50% et la teneur en MgO = 0.30% < 6%. Il s'agit donc d'une chaux qui vérifie bien les spécifications de la norme NF P 98-101 1991.

3.2.3. La bentonite

La bentonite utilisée dans cette étude a été fournie, à titre gracieux, par l'entreprise BENTAL qui exploite les gisements d'argile bentonitique de Hammam Boughrara, à 15 km de la ville de Maghnia (Tlemcen) où se situe l'usine de traitement. C'est une argile servant à une utilisation dans les boues de forage comme additif viscosifiant de haute qualité. Elle est de couleur jaunâtre et se présente sous forme d'une poudre finement broyée passant entièrement au tamis de 80 microns. Sa composition chimique (reprise de la fiche technique du produit) est donnée dans le tableau 3.4.

Sa teneur en eau naturelle est de 13%. La courbe granulométrique représentée sur la figure 3.3 montre qu'elle contient près de 100% d'éléments fins et 51% d'éléments inférieurs à 2 microns.

La bentonite est une argile très plastique selon sa situation sur l'abaque de Casagrande, et selon la classification GTR elle appartient à la classe A4. Sa limite de liquidité est 280%, sa limite plasticité est de 93% et son indice de plasticité est 187%. Son activité électrochimique est $3.67 > 1.25$ d'après Skempton (1953) c'est une argile très active.

Tableau 3.4 : composition chimique de la bentonite.

Elément chimique	Teneur (%)
SiO ₂	58.89
Al ₂ O ₃	17.37
MgO	3.37
Fe ₂ O ₃	3.32
Na ₂ O	1.32
CaO	1.06
K ₂ O	1.30

D'après leur composition chimique, les bentonites de Maghnia sont intermédiaires. Elles se composent principalement de silice et d'aluminium, avec des faibles pourcentages de sodium, de ferrite, d'oxyde de magnésium, et de calcium.

3.2.4. Le sol reconstitué

Le sol reconstitué utilisé dans cette étude a été obtenu en mélangeant 20% de bentonite avec 80% de sol naturel pour obtenir un sol argileux qui sera stabilisé par ajout de chaux. Il est

nommé SR (ou SNB). On effectue les mêmes essais cités plus haut pour l'identifier et le classer.

Le sol reconstitué est une argile inorganique de haute plasticité selon sa situation sur l'abaque de Casagrande. D'après la courbe granulométrique, sa granulométrie est étalée. Il contient 75% d'éléments fins et 35% d'éléments inférieurs à 2 microns.

Sa limite de liquidité est 58%, sa limite de plasticité est 28% et son indice de plasticité est 30%. Son activité électrochimique est 1,11 d'après Skempton (1953) elle est normale et est apte à être stabilisée à la chaux. Cette aptitude est aussi confirmée par le guide technique de l'Association Nationale de la Chaux (NLA) qui a suggéré que « le sol qui contient 25% de passant à travers le tamis N°200 (75µm) avec un indice de plasticité I_p supérieur ou égal à 10 est apte à être stabilisé à la chaux ».

La courbe de compactage représentée sur la figure 3.2 donne une densité sèche maximale de $1,65 \text{ t/m}^3$ et une teneur en eau optimale de 20%.

3.3. Méthodes expérimentales du traitement Sol-Chaux

3.3.1 Préparation des mélanges (Sol – Chaux)

Pour la préparation des mélanges Sol-Chaux pour les différents essais de laboratoire (Limites d'Atterberg, Proctor normal, la compression simple, l'essai oedométrique, et l'essai de perméabilité) on utilise la norme ASTM D 3551-90 (modifié 1996).

La préparation a été effectuée avec les quantités des différents matériaux (sol naturel, chaux, bentonite et l'eau déminéralisée). Ces mélanges ont été préparés à la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale données dans la courbe de compactage du sol.

Le sol naturel, la bentonite et la chaux ont été préalablement séchés à l'étuve. On prend la quantité nécessaire calculée de chaque matériau pour constituer le sol (SR+% chaux). On met dans le bol du malaxeur le sol naturel et la bentonite en premier lieu puis on rajoute la chaux. On met le malaxeur en marche pendant une minute ou jusqu'à l'homogénéité du mélange c'est-à-dire lorsqu'on obtient une couleur uniforme dans la totalité de l'échantillon. On rajoute la quantité nécessaire d'eau au mélange plus 1% pour récupérer l'eau évaporée lors du malaxage avec le malaxeur en marche. Le malaxage s'effectue pendant 5 minutes à partir du moment de l'injection d'eau pour obtenir un mélange homogène.

3.3.2 Conservation des échantillons de sol

A la fin du malaxage, le bol est retiré immédiatement pour éviter l'évaporation d'eau (réduire les pertes d'eau). On met alors le mélange dans des sachets étanches en plastique qu'on conserve dans l'humidificateur à une température de 20°C avec un taux d'humidité de 100%.

Cette conservation a été effectuée pour le temps de maturation et également pour le temps de cure.

3.3.3 Confection des échantillons mélanges (Sol – Chaux)

- **Pour l'essai de granulométrie**

Pour prendre en compte l'effet du temps de cure sur la distribution granulométrique du sol reconstitué traité pour les temps de cure de 2, 7, 28 et 60 jours, on prépare 05 échantillons de sol reconstitué traité à 5% de chaux confectionnés à la densité sèche et la teneur en eau optimale par compactage en trois couches dans le moule Proctor normal. Les échantillons préparés ont été bien couverts et gardés dans l'humidificateur à une température de 20°C pendant 24h comme temps de maturation.

Pour vérifier l'effet des conditions de conservation sur la distribution granulométrique du sol reconstitué traité, on a réalisé l'essai de granulométrie sur un échantillon (traité avec 5% de chaux) exposé pendant 07 jours à l'air libre.

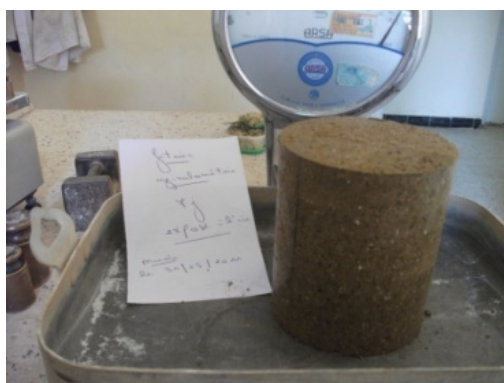


Figure 3.3 Confection des échantillons pour la granulométrie à long terme.

- **Pour l'essai de perméabilité**

Pour étudier l'effet de la chaux sur la perméabilité du sol reconstitué, on prépare des éprouvettes de sol avec les dimensions (20mm d'hauteur x 70mm de diamètre) compactés à la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale de l'essai Proctor normal correspondant. 9 éprouvettes ont été confectionnées par compactage statique en trois couches à l'aide d'une presse à une vitesse de 1.27 mm/min. Les pourcentages de chaux ajoutés au sol reconstitué sont 0, 5, et 9%. Les échantillons préparés ont été bien couverts et gardés dans des sachets étanches dans l'humidificateur à une température contrôlée de 20°C et un taux d'humidité vérifié de 100% pendant le temps de maturation et de cure.

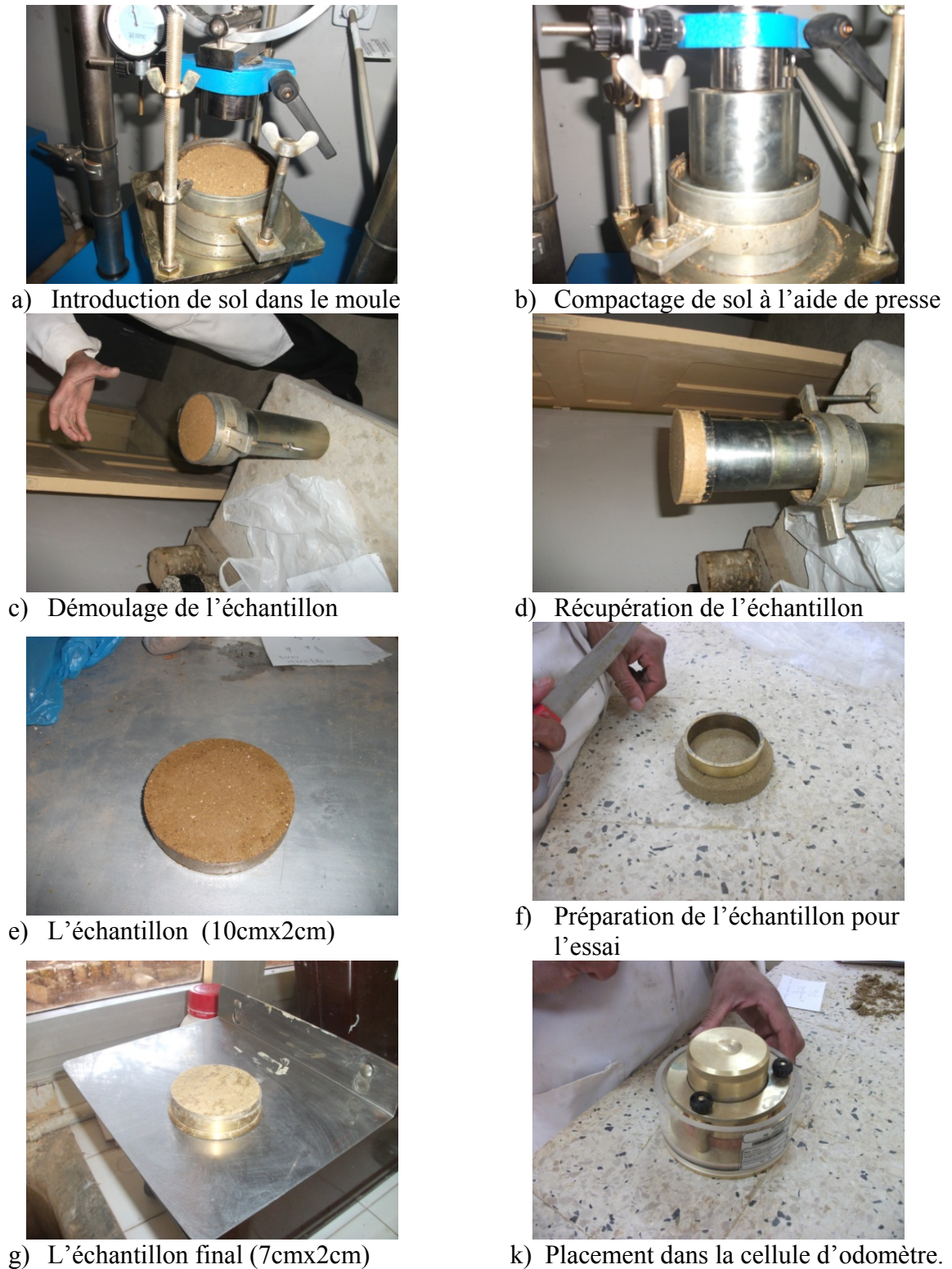


Figure 3.4 Etapes de confection des éprouvettes pour l'essai de perméabilité et oedométrique.

- **Pour l'essai oedométrique**

Pour étudier l'effet de la chaux sur la compressibilité du sol reconstitué on prépare des éprouvettes de sol dans les mêmes conditions de l'essai de perméabilité. 9 éprouvettes ont été confectionnées à cet effet dans les mêmes formes que précédemment.

- **Pour l'essai de plasticité**

Pour étudier l'effet de l'addition de chaux sur la plasticité du sol reconstitué (SR) une série d'essais a été conduite. On prépare 9 échantillons de sol traités à 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, et 8% de chaux. Chaque échantillon est préparé en utilisant une quantité de 160g à 200g de sol reconstitué sec passé au tamis 0.400 mm. On pèse la quantité nécessaire de chaux. Le malaxage du mélange chaux – sol reconstitué a été effectué selon la méthode de malaxage citée ci-dessus. On laisse le mélange reposer pour que la réaction entre la chaux et le sol reconstitué se produise. Après le temps de maturation chaque échantillon préparé a été mélangé une autre fois à l'aide d'une spatule. La limite de liquidité a été déterminée avec l'appareil de Casagrande et la limite de plasticité sur une table lisse.

Pour étudier l'effet de l'addition de chaux à long terme sur la plasticité du (SR) on a préparé 6 échantillons de sol traités à 3, 5, et 7% de chaux qu'on a gardé dans des sachets étanches pendant 07 jours, et 28 jours et on a déterminé leurs limites de consistance selon les normes précitées.

- **Pour l'essai de compression simple**

L'objectif de cet essai est l'analyse de l'effet de l'ajout de chaux sur la résistance à la compression simple. On confectionne des éprouvettes d'éclatement 2 du sol reconstitué (avec les dimensions 70mm de hauteur x 35mm de diamètre) compactés à la densité sèche maximale et à la teneur en eau optimale de l'essai Proctor normal. 92 éprouvettes ont été ainsi confectionnées par compactage statique en trois couches avec une presse appelée «Multi speed tester ». Deux échantillons pour chacun des pourcentages 0, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, et 22% de chaux ajoutée au sol reconstitué. Les échantillons préparés ont été bien couverts et placés dans des sachets étanches et gardés dans l'humidificateur à une température contrôlée de 20°C et un taux d'humidité vérifié de 100%.



Figure 3.5 Moule de confection des échantillons.



Figure 3.6 Eprouvette confectionnées pour l'essai de compression simple.

3.4. Réalisation de programme expérimental

- **Essai de pH (Méthode Eades & Grim).**

La détermination du pourcentage initial de la chaux a été conduite selon la norme ASTM-C 977-00, cette méthode est basée sur l'essai d'Eades et Grim (1966).

La méthode d'Eades et Grim a été utilisée pour déterminer le pourcentage optimal de chaux c.-à-d. en évaluant le pH de différents mélanges Sol-Chaux. Le pH-mètre de cette étude a été étalonné avec une base du pH égale à 10. Une série d'échantillons a été préparée après séchage et tamisage (au tamis 4mm) des matériaux d'étude. Les différents pourcentages de chaux ont été mélangés avec le sol reconstitué dans des flacons en plastique. On ajoute 100 ml d'eau distillée et on agite pendant 30 secondes chaque 10 minute et après une heure on prend une partie dans un bécher en verre et on fait la mesure du pH. Selon la méthode d'Eades et Grim (1966) le pourcentage de demande en chaux est arrêté par le taux de chaux qui correspond à un pH du mélange sol-chaux de 12.4.

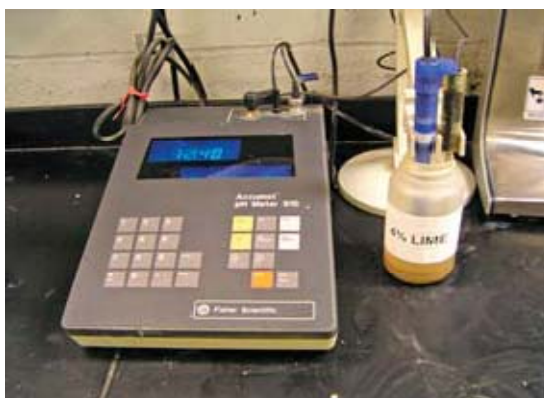


Figure 3.7 Mesure de pH à l'aide d'un pH-mètre.

- **Essai de compactage**

L'essai de compactage au laboratoire a pour but de déterminer la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale pour chaque échantillon du sol reconstitué traitée à 3, 5, 7, 9, et 11% de chaux, et suivre la variation de ces deux paramètres avec l'addition de chaux. Les paramètres de l'essai de compactage sont aussi utilisés dans la préparation des échantillons pour les essais de compression simple, de perméabilité, et de l'analyse granulométrique. Les six échantillons ont été préparés à différents pourcentages de chaux. Le mélange a été conservé dans des sachets bien étanches et laissé dans l'humidificateur pendant un temps de maturation de 24h comme recommandé dans le guide technique de Dallas (2006) de l'Association Nationale de la Chaux (NLA) aux Etats Unies. En suite, chaque échantillon a été compacté dans un moule Proctor normal.

- **Essai de compression simple**

Le but de cet essai est de déterminer la résistance du sol traité à la chaux. C'est un type spécial de l'essai UU (non consolidé non drainé) qui est généralement employé pour les échantillons d'argile. La pression de confinement (σ_3) est égale à zéro. L'échantillon de sol reconstitué sera testé jusqu'à la rupture de l'éprouvette. A la rupture l'effort principal mineur égal à zéro tandis que l'effort principal majeur est (σ_1). On rappelle que ce test sera effectué sur des échantillons de sol avec les dimensions (70mm de hauteur x 35mm de diamètre) compactés à la densité sèche maximale avec la teneur en eau optimale de l'essai Proctor normal.

L'essai a été effectué selon la norme ASTM D 5102-96 Méthode B sur des échantillons conservés dans des sacs étanches. L'essai de compression non confiné (UCST) a été réalisé au maximum dans 10min. Après 24h de conservation, l'écrasement des éprouvettes a été effectué en utilisant l'appareil «Multi speed tester » avec une capacité de 50kN, et une vitesse variable de 0.5 à 63mm/min, équipée d'un poinçon monté sur un anneau dynamométrique de 5kN étalonné. Un comparateur au 100e de millimètre a été utilisé pour mesurer le déplacement. La vitesse de déplacement du plateau inférieur a été fixée à 1mm/min, les lectures des forces qui correspondent à la force de l'écrasement ont été enregistrées en fonction du déplacement et les courbes contrainte/déformation ont été tracées pour chacune des éprouvettes testées.

Pour étudier l'effet du temps sur la compression simple on effectue l'écrasement des éprouvettes pour les temps de cure de : 2, 7, 14, 28, 60, 90, 180, 240 jours. Puis on trace la courbe de la résistance à la compression simple qui donne les contraintes (kPa) en fonction des déformations (%).

- **Essais de perméabilité**

Le but de cet essai est d'étudier l'influence du traitement à la chaux sur la perméabilité du sol étudié. Pour mesurer la perméabilité on utilise un oedoperméamètre ensuite on consolide le sol sous une charge et on calcule la perméabilité à partir du taux de consolidation.

La mesure de k utilise la théorie de consolidation rappelée qui écrit k :

$$k = \frac{C_v * \gamma_w}{E}$$

Où : C_v est le coefficient de consolidation et E le module oedométrique du sol.

On prend l'échantillon après 24h de conservation, on prélève un échantillon du sol reconstitué à l'aide d'une trousse coupante et on le met entre deux pierres poreuses dans la cellule oedométrique et on le laisse saturer pendant 24 heures. On commence le chargement et on

prend les lectures à des temps réguliers : 0, 15'', 30'', 1', 2', 4', 8', 15', 30', 60', 120', 240', et 1440'. Pour chaque palier de chargement on effectue les mesures de temps et de raccourcissement à l'aide d'un comparateur. En traçant les variations de tassement (Δh) en fonction de temps on obtient la courbe de consolidation (figure 3.8). On utilise la méthode de Casagrande on trace (Δh) en fonction de ($\log t$) pour déterminer la valeur du coefficient de consolidation :

$$C_v = \frac{T_v (H^2)}{t} = 0.197 \frac{H^2}{t_{50}}$$

T_v est le facteur temps, H est la distance de drainage, t_{50} est le temps nécessaire pour atteindre le degré de consolidation 50%.

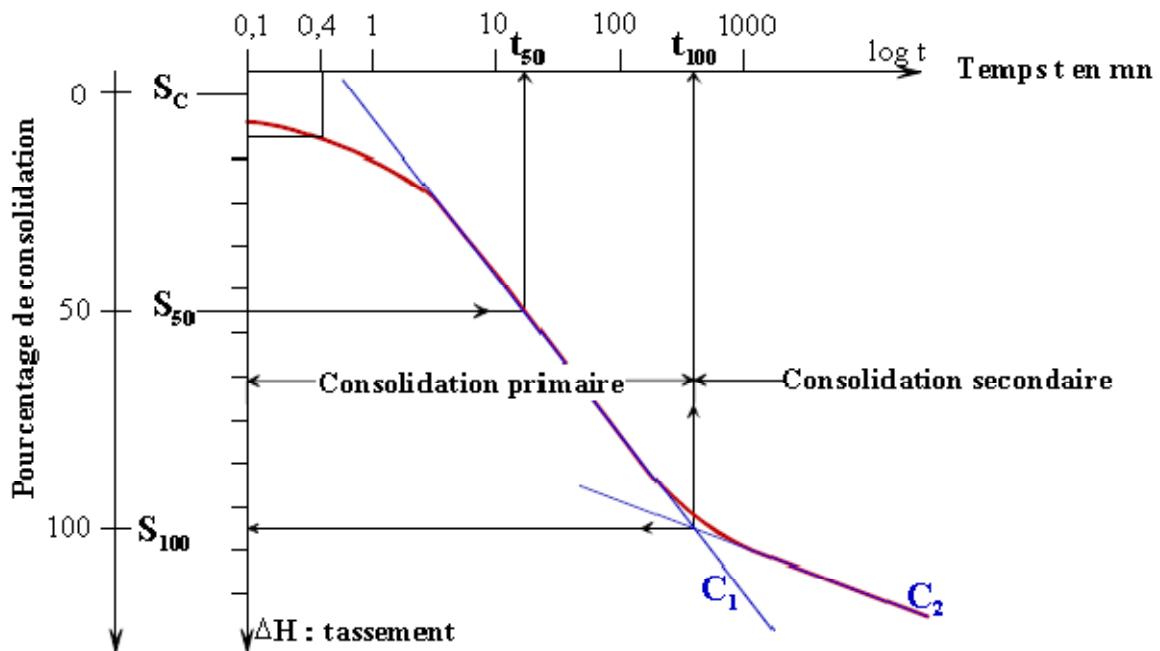


Figure 3.8 La courbe de consolidation selon la méthode de Casagrande.

- Essai oedométrique

L'essai oedométrique a pour but de déterminer l'indice de compressibilité C_c qui est la pente de la tangente à la courbe de chargement (figure 3.10). Ce coefficient permet de préciser la sensibilité du sol au tassement le long de cette courbe, il est donc défini par :

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta(\log \sigma)}$$

L'essai permet aussi de déterminer le coefficient de recompressibilité ou de gonflement C_g qui est la pente de la courbe de déchargement, et il a la même expression que C_c .

$$C_g = -\frac{\Delta e}{\Delta(\log \sigma)}$$

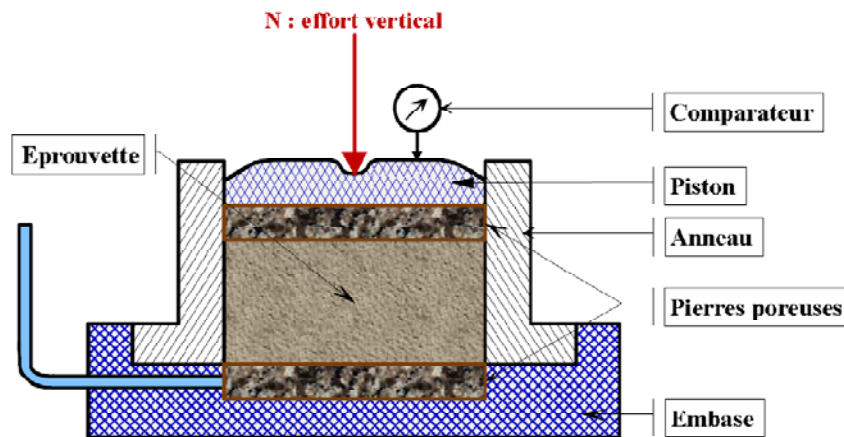


Figure 3.9 Cellule oedométrique.

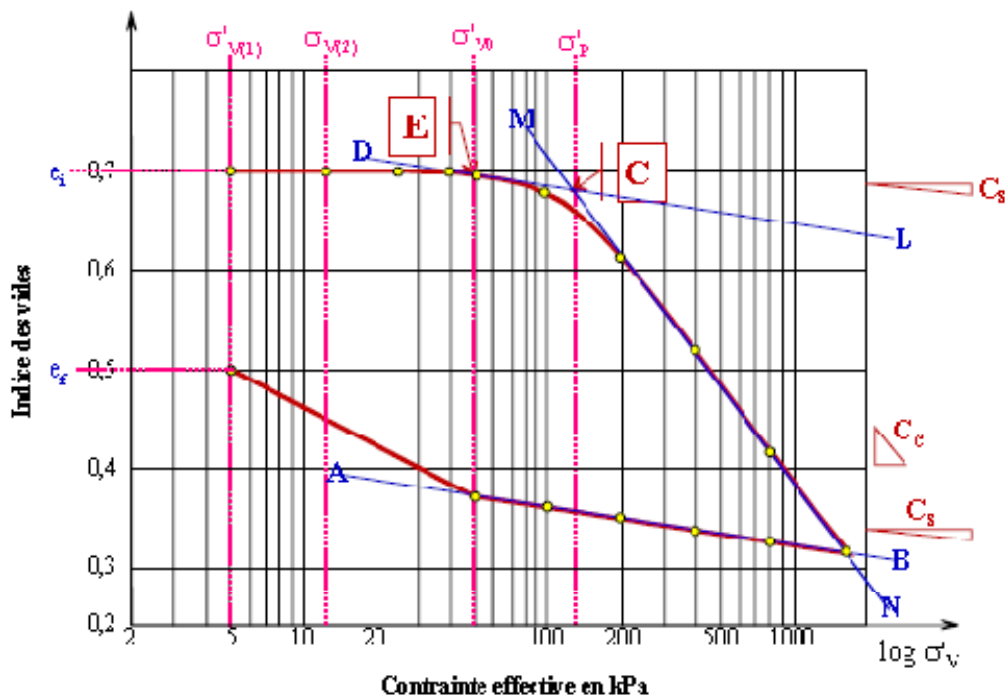


Figure 3.10 Courbe de compressibilité.

- **Essai diffractométrique**

Le diffractomètre X PERT PRO aux rayons X du laboratoire de physique de l'Université Amar Tledji Laghouat (Figure 3.11) a été utilisé pour l'analyse minéralogique de la fraction argileuse (inférieur à $2\mu\text{m}$). Dans ce cas il faut éliminer la matière organique avec 30% H_2O_2 à un pH de 5 comme traitement préparatoire de l'échantillon. L'échantillon préparé est balayé par étapes à un temps de quatre secondes de $0,075^\circ$ à 2θ . L'appareil utilise le rayonnement de $\text{CuK}\alpha$ (20 mA, 40 kilovolts).



Figure 3.11 Appareil X Pert Pro aux rayons X (Laboratoire de physique, Laghouat).

3.5 Synthèse du programme expérimental

On présente dans le tableau 3.5 une synthèse des essais réalisés dans cette étude en rappelant à la fois leur finalité, le matériau utilisé et le nombre de spécimens testés pour chaque cas.

Tableau 3.5 Synthèse des essais réalisés.

Essais	Matériaux de l'étude	Nombres d'essais	Total
Essais chimiques	SN, B, chaux	3x1	3
L'analyse granulométrique	SN, B, SR	3x2	6
Les essais de plasticité	SN, B, chaux, SR, SR+1%, SR+2%,SR+8%	12x2	24
Compactage Proctor normal	SN, SR, SR+3%, SR+5%, SR+7%, SR+9%, SR+11%	7x2	14
pH	Eau, chaux, B, SN, SR, SR+1%, SR+2%,SR+7%	12x2	24
La perméabilité immédiate	SR, SR+5%, SR+9%	3x1	3
Effet du temps sur la plasticité : 7, 28j	SR+3%, SR+5%, SR+7%	3x2	6
Effet du temps sur la granulométrie immédiat, 2, 7, 28, 60j	SR+5%	5x1	5
Effet du temps sur la perméabilité : 7, 28, 60j	SR+5%, SR+9%	1x3+1x3	6
Effet du temps sur la compressibilité immédiate, 7, 28, 60j	SR+5%, SR+9%	1x4+1x4	8
Etude de la résistance mécanique à court terme	SR, SR+3%, +5%, +7%, +9%, 11%	6x2	12
Etude de la résistance mécanique à 07 j	SR, SR+3%, +5%, +7%, +9%, 11%	6x2	12
Etude de la résistance mécanique à 14 j	SR, SR+3%, 5%, 7%, 9%, 11%, +13%	7x2	14
Etude de la résistance mécanique à 28 j	SR, SR+3%, 5%, 7%, 9%, 11%, 13%, 15%, et 22%)	9x2	18
Etude de condition de conservation sur la résistance mécanique à 28 j	SR+5%, 11%, 13%, 15%	4x2	8
pH des mélanges	SR+3%, 5%, 7%, 9%, 11%, 13%	6x2	12
Etude de la résistance mécanique à 60 j	SR+3%, +5%, +22%	3x2	6
Etude de la résistance mécanique à 90 j	SR+3%, +5%, 13%, et 22%)	4x2	8
Etude de la résistance mécanique à 180 j	SR+3%, +5%	2x2	4
L'analyse diffractométrique à 28 j	SR, SR+5%, +7%	3x2	6

Chapitre 04

Présentation des résultats et interprétations

4.1. Introduction

Dans ce chapitre on présente et on interprète les différents résultats obtenus dans cette étude. On discute sur la base des résultats obtenus les mécanismes qui seraient responsables des améliorations observées sur les caractéristiques géotechniques du sol traité. On interprète séparément les mécanismes qui se réalisent à court terme qui seraient, d'après l'état des connaissances, le résultat de phénomènes d'échange cationique et ceux qui ont lieu à long terme et qui sont l'expression des réactions pouzzolaniques. On tente de faire ressortir parmi ces mécanismes ceux qui ne sont jusqu'à nos jours que partiellement élucidés et qui appellent plus d'effort de recherche pour leur compréhension.

4.2. Détermination de taux singuliers en chaux

4.2.1. Détermination du taux de fixation en chaux :

On étudie ici l'influence du pourcentage de chaux sur la limite de liquidité, la limite de plasticité ainsi que l'indice de plasticité du sol. La figure 4.1 montre l'évolution des limites de consistance en fonction du taux de chaux utilisé.

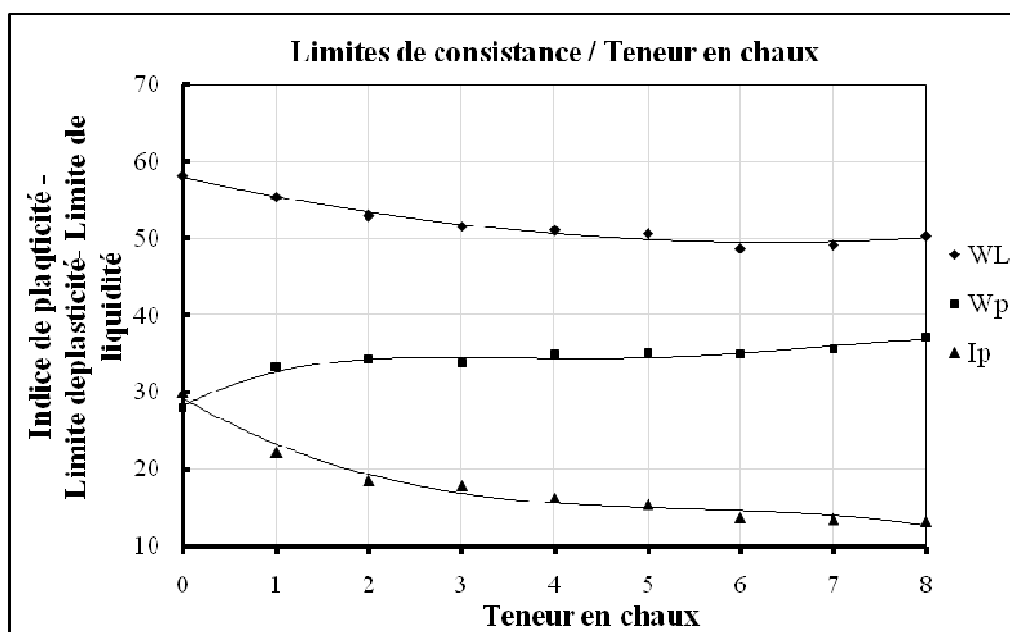


Figure 4.1 Influence de la chaux sur les limites de consistance.

La courbe montre une diminution de la limite de liquidité pour les faibles dosages en chaux. La limite de liquidité ne semble plus affectée par l'augmentation de la chaux au delà de 5%. La courbe montre aussi un accroissement de la limite de plasticité en fonction de l'augmentation du pourcentage de chaux jusqu'à un pourcentage de 2 à 3% et se stabilise au delà de ces valeurs.

Chapitre 04 Présentation des résultats et interprétations

En effet la chaux agit sur les charges électriques des particules fines et modifie les champs électriques inter-particulaires, ce qui entraîne la floculation des particules. Les cations de calcium fournis par la chaux remplacent les cations monovalentes de minéraux d'argile comme : Na, K.... ce qui favorise la réduction de la plasticité (Bell, 1996). Le pourcentage optimum d'ajout de chaux pour l'obtention de l'accroissement maximum de la limite de plasticité du sol est appelé « seuil de fixation de la chaux » si l'on ajoute de la chaux au delà de ce seuil elle est utilisée par le processus de cimentation, et conduit à une augmentation de la résistance du sol. Bell (1996) a montré que la quantité de chaux requise pour la modification est généralement comprise entre 1 à 3% selon le type de minéraux d'argile présents dans le sol. Par conséquent des petites quantités de chaux sont capables de provoquer des changements instantanés dans la plasticité du sol traité.

La courbe montre une diminution de l'indice de plasticité avec l'augmentation du pourcentage de chaux. Ces observations ont été aussi faites par Hilt et Davidson (1960), Leroux et Riviere (1969), Brandl (1981), Bell (1989 et 1996), Sherwood (1993), Lazzali (1997), Evans (1997), Al-Rawas et al (2006), Beng (2006), et Gueridi (2009).

4.2.2. Détermination du taux de demande en chaux

L'influence du pourcentage de chaux sur le pH du sol a été investigué au moyen d'un pH mètre. Les résultats obtenus durant cette série d'essais sont donnés dans la figure 4.2. La figure montre que la valeur de pH en fonction du pourcentage de chaux est croissante jusqu'à une valeur d'environ 12,65. Ce pH atteint la valeur nominale de 12,4 (Eades et Grim, 1966) et celui-ci montre que le sol est apte à être traité à la chaux à partir de 3% d'ajout de chaux. Ce taux qui donne un pH de 12.4 est appelé le taux de demande en chaux. Il représente le taux nominal qui peut assurer la réaction pouzzolanique (Gueridi, 2009) et dans le cas de la chaux utilisée, le taux qui donne un pH de 12.65 (le PH de la chaux) correspond à un pourcentage de chaux de 5%.

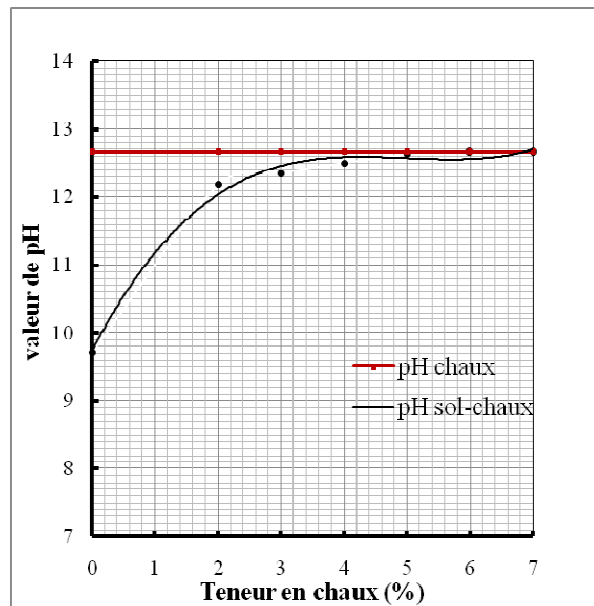


Figure 4.2 Evolution du pH en fonction de la chaux selon la méthode d'Eads et Grim (1966).

4.3. Effet du traitement à la chaux sur les caractéristiques géotechniques du sol

4.3.1. Les effets géotechniques à court terme

4.3.1.1 Influence du pourcentage de la chaux sur les paramètres de compactage

L'essai Proctor normal a été conduit sur des échantillons non traités et des échantillons traités à 3, 5, 7, 9, et 11% de chaux. La relation entre la masse volumique sèche et la teneur en eau pour le sol non traité, et traité à 3, 5, 7, 9, et 11% est donnée sur la figure 4.3.

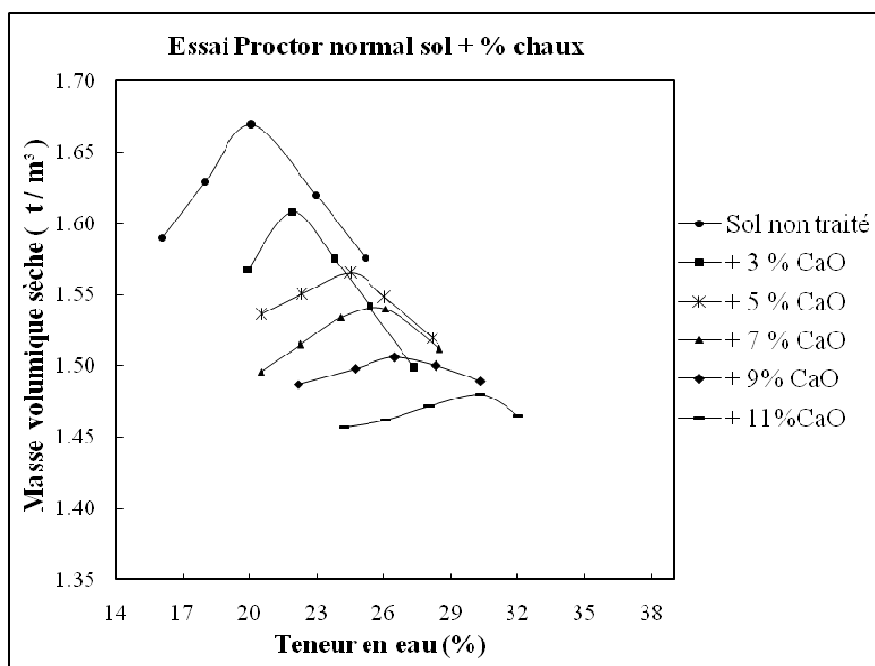


Figure 4.3 Influence de l'ajout de la chaux sur les paramètres de compactage du sol.

La comparaison des courbes de compactage obtenues pour les différents pourcentages de chaux ajoutés au sol montre qu'avec l'augmentation du pourcentage de chaux la masse

Chapitre 04 Présentation des résultats et interprétations

volumique sèche diminue et la teneur en eau optimale augmente et la courbe de compactage devient aplatie et plus étalée.

En plus, l'augmentation de pourcentage de chaux entraîne une augmentation de la teneur en eau optimale, même si l'optimum de compactage est décalé vers des teneurs en eau plus importantes, les caractéristiques de compactage s'améliorent et le sol traité devient de moins en moins sensible à l'eau, la figure 4.5 montre clairement cette observation qui justifie l'insensibilité à l'eau de sol traité.

Les figures 4.4 et 4.5 montrent les relations (linéaires) entre les caractéristiques de compactage (densité maximale, teneur en eau optimal) et la teneur en chaux. Ces mêmes résultats ont été observés par : Lees et al (1982), Abdi et Wild (1993), Little (1995), Bell (1989 et 1996), Lazzali (1997), Afès et Didier (2000), Nalbantoglu (2006), Tono et al (2006), Gueridi (2009).

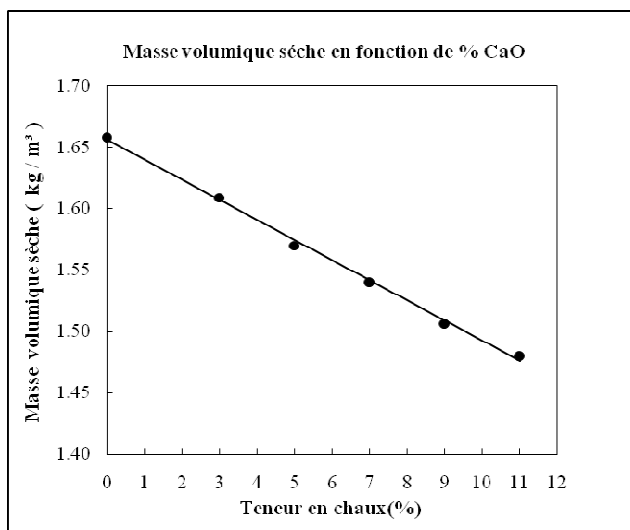


Figure 4.4 Influence de la chaux sur la masse volumique sèche maximale.

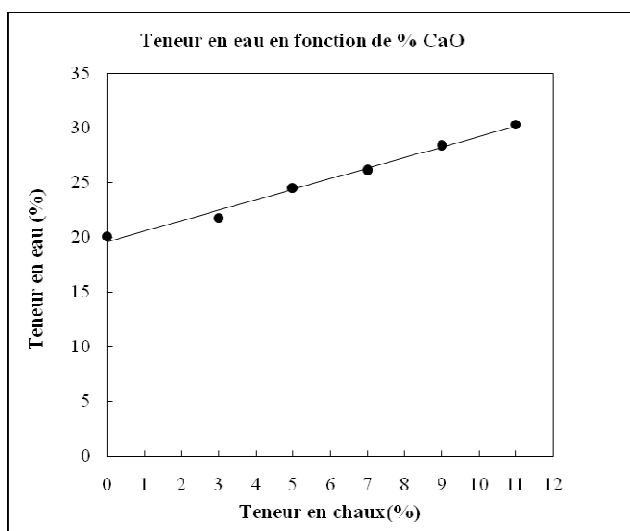


Figure 4.5 Influence de la chaux sur la teneur en eau optimale.

4.3.1.2. Sur la perméabilité

La courbe de la perméabilité du sol reconstitué non traité est donnée sur la figure 4.6 pour différents paliers de chargement. Cette figure montre que le sol non traité a un coefficient de conductivité hydraulique (k) faible, compris entre $1.55.10^{-13}$ et $1.93. 10^{-10}$ cm/s indiquant que le sol est quasiment imperméable. La figure montre aussi la courbe représentant la perméabilité immédiate du sol traité à 5% et à 9% de chaux. On voit une augmentation immédiate de la perméabilité du sol avec l'ajout de chaux.

On constate que pour les paliers de chargement de (0-8 bars), le coefficient de conductivité augmente légèrement, on ne sent pas réellement l'effet des charges sur la perméabilité du sol. Mais au-delà (8-16 bars) la perméabilité diminue. On doit noter également que l'essai dure quelques jours, ce qui veut dire que la réaction sol-chaux représentée n'est pas immédiate. Par exemple, le palier de chargement (8-16 bars) correspond à plus de 7 jours de l'essai. Donc à ce niveau, la réaction a déjà avancé. Il y a l'effet du temps conjugué à l'effet de la charge qui est un peu plus importante.

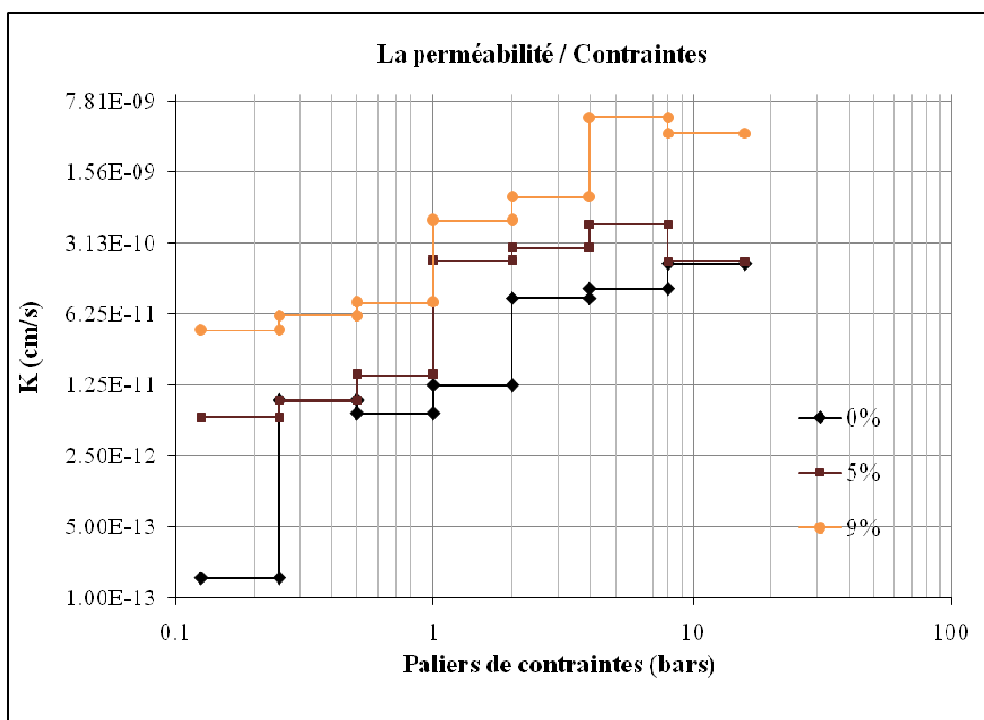


Figure 4.6 Evolution de la perméabilité immédiate du sol reconstitué avec différents pourcentage de chaux

4.3.1.3. Sur la résistance mécanique :

Les différents résultats montrant cette influence sur la résistance mécanique (la contrainte et la déformation) des échantillons sont donnés dans la figure 4.7. A 2 jours de cure, ce qui est considéré comme un court terme, on peut voir que les variations des résistances pour les

Chapitre 04 Présentation des résultats et interprétations

premiers taux de chaux sont quasi-régulières et pas très importantes car les agents de cimentations ne sont pas encore présents. Les résistances à court terme sont demandées sur les chantiers pour réaliser des plates-formes de travail stables pour la circulation des engins.

Sur la base des résultats de la figure 4.8 on remarque que le rendement en résistance est important jusqu'à 9%, à 11% la pente de la droite semble diminuer indiquant un essoufflement du rendement.

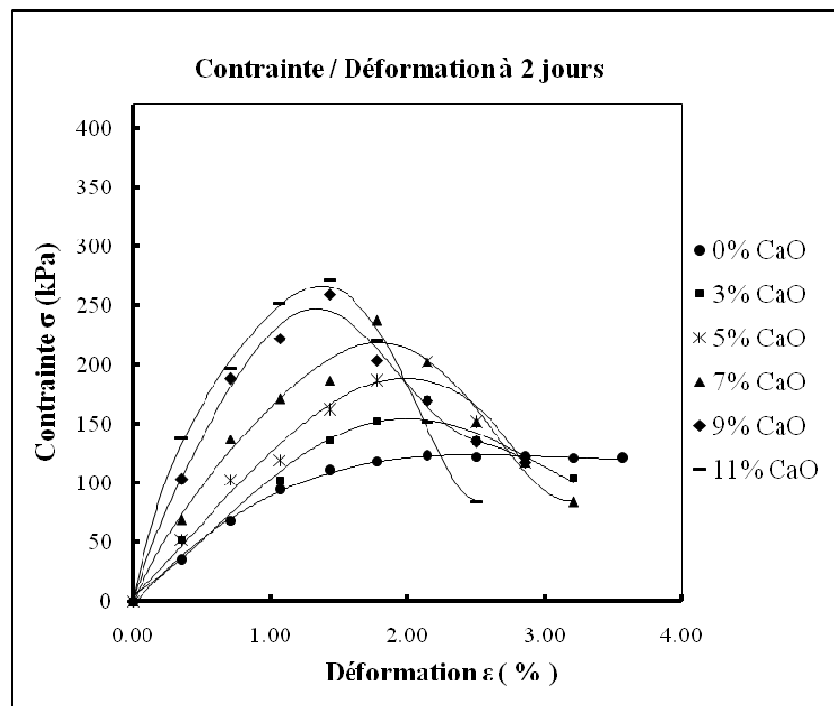


Figure 4.7 Influence de l'ajout de chaux sur la courbe contrainte-déformation pour 02 jrs.

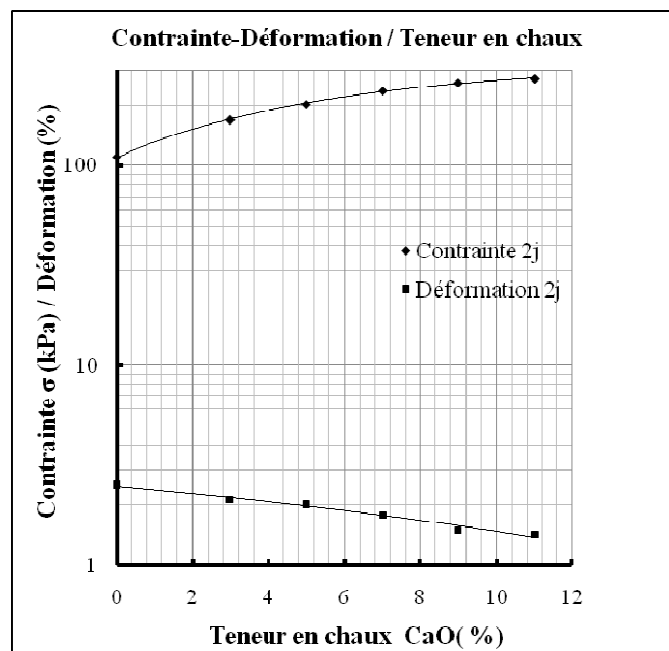


Figure 4.8 Effet de la chaux sur la résistance mécanique et la déformation axiale à 02 jrs.

4.3.2. À long terme

4.3.2.1. Sur la plasticité

Une série d'essais est effectuée pour étudier l'évolution de la plasticité dans le temps pour le sol reconstitué traité aux taux de chaux de 3%, 5%, et 7%. On teste la plasticité aux temps de cure de 7 et 28 jours. La procédure de conduite des essais a été explicitée au chapitre 03. Les différents résultats montrant cet effet sur les limites de consistance sont donnés dans la figure 4.9.

L'observation des résultats de la figure 4.9 montre que, contrairement aux résultats de Saker et al (2008) si la limite de liquidité diminue avec la teneur en chaux à court terme, pour les temps de cure de 7 et 28 jours elle semble plutôt augmenter avec les mêmes teneurs en chaux dans le temps.

Cependant la limite de plasticité n'est pas affectée par le temps de cure. Si la diminution de la limite de liquidité du sol provoquée par l'ajout de chaux à court terme exprime des modifications qui s'opèrent dans la texture du sol traité, la variation dans le sens inverse de la limite de liquidité à long terme pourrait indiquer la disparition relative de ces modifications.

Par ailleurs, la constance de la limite de plasticité à long terme semble indiquer que le phénomène qui a lieu à est plus complexe qu'une simple réversibilité des effets d'échange cationique et de floculation.

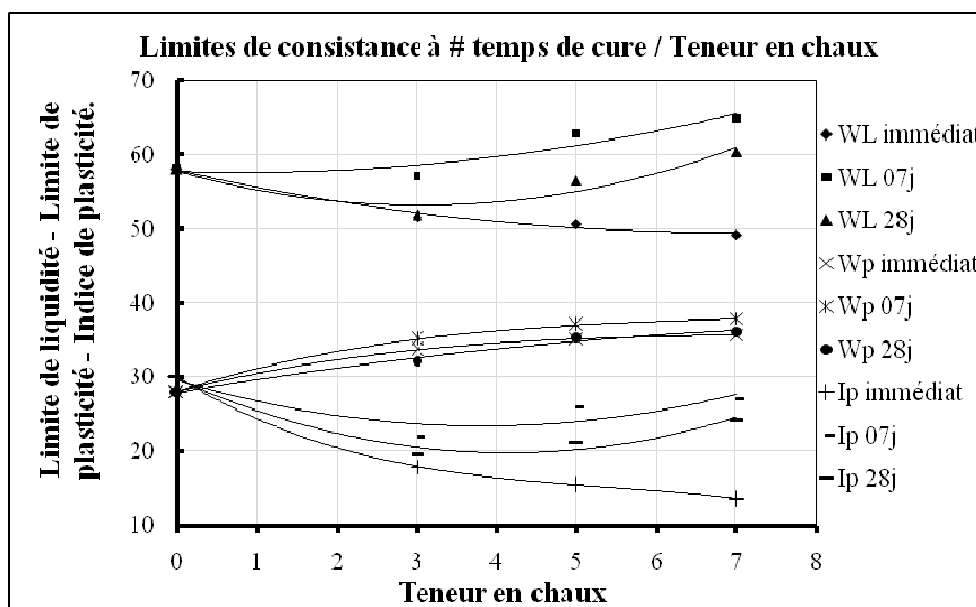


Figure 4.9 La plasticité du sol stabilisé à 7 et 28 jrs de cure.

4.3.2.2. Sur la granulométrie

Afin de mieux cerner les effets du traitement à la chaux on étudie l'effet de temps de conservation et l'effet de conditions de conservation sur la distribution granulométrique du sol

Chapitre 04 Présentation des résultats et interprétations

traité. On réalise une série d'essais de l'analyse granulométrique selon la procédure explicitée au chapitre précédent. On a choisi le pourcentage 5% de chaux pour les temps de cure de 2, 7, 28 et 60 jours et un échantillon exposé à l'air libre pendant 07 jours. L'effet sur la distribution granulométrique est donné dans la courbe de la figure 4.10.

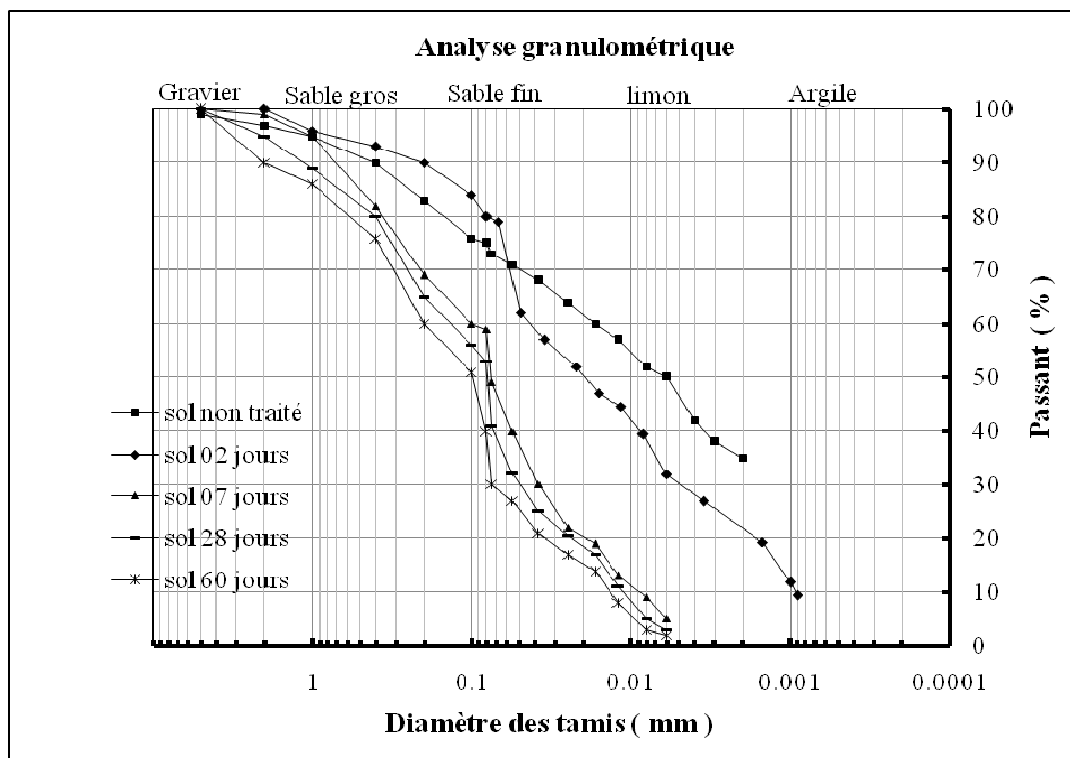


Figure 4.10 Effet du temps sur la distribution granulométrique du sol stabilisé.

On remarque qu'avec le temps, le déplacement des courbes du sol traité vers la gauche ce qui met en évidence les changements de la structure du sol stabilisé, et par conséquent le changement de sa classification géotechnique.

Avant le traitement, le sol est classé argileux. A 02 jours de cure, il devient sable limoneux argileux et à 7, 28, 60 jours, il passe à un sable limoneux. On peut dire que les grands changements se sont réalisés à 07 jours. On gagne tout de suite une classe dans la classification. La réaction pouzzolanique continue à opérer des changements dans la structure du sol dans le temps mais à un rythme plus faible qu'au démarrage.

Après le traitement du sol, un changement remarquable se produit dans la structure du sol stabilisé. Les particules fines flocculent et le taux des éléments fins, comme le montre la courbe granulométrique, diminue.

L'effet des conditions de conservation sur la distribution granulométrique du sol stabilisé à 07 jours est représenté dans la figure 4.11. La courbe montre que l'échantillon exposé à l'air libre présente plus d'éléments fins. On serait tenté de croire que l'exposition à l'air libre a empêché le sol de flocculer, à cause de l'évaporation de l'eau. La carbonatation de la chaux en présence

Chapitre 04 Présentation des résultats et interprétations

du gaz carbonique de l'air, peut aussi avoir lieu pendant la durée de l'exposition. Cette réaction est en principe mise en évidence par le test à la phénolphtaléine. Ce dernier est la technique la plus simple pour mesurer la profondeur de la carbonatation. La phénolphtaléine est un indicateur du pH coloré dont le virage se situe aux alentours de 9. Ce seuil permet de différencier la zone carbonatée ($\text{pH} < 9$) qui reste incolore de la zone non carbonatée ($\text{pH} > 9$ allant jusqu'à 13) colorée en violet. La figure 4.12 montre un échantillon après aspersion de solution de phénolphtaléine selon le laboratoire d'études et de recherches sur matériaux LERM (2006). Il existe aussi d'autres méthodes plus précises mais lourdes telles que la microscopie optique et le microscope électronique à balayage pour mettre en évidence la carbonatation.

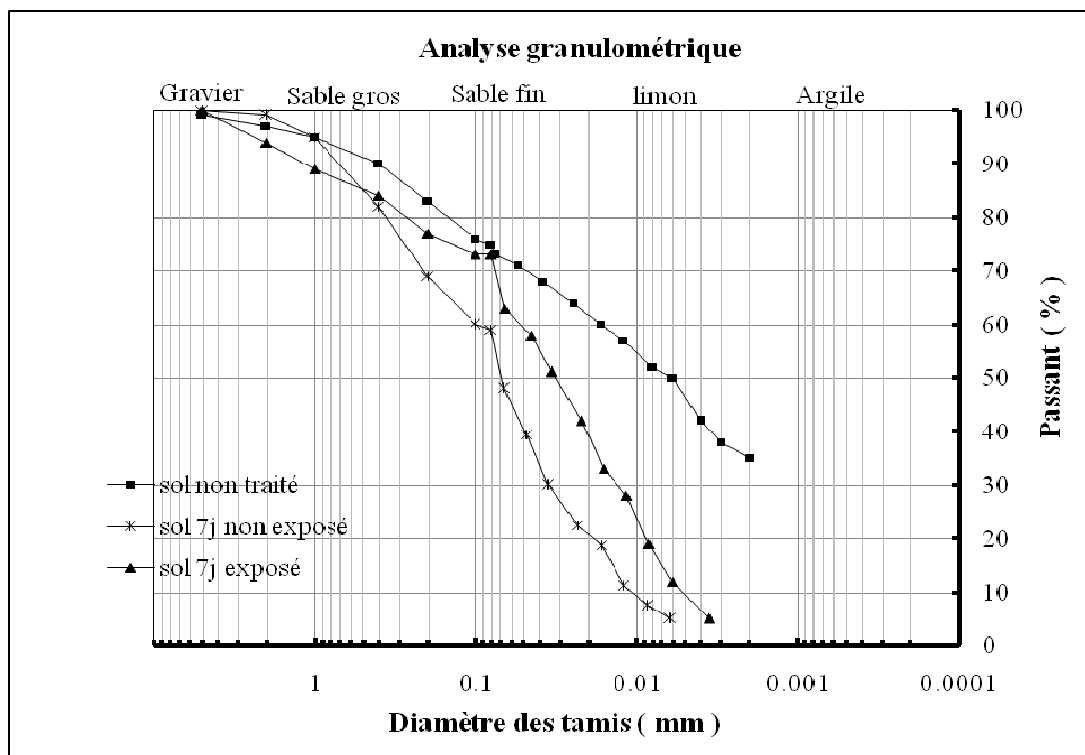


Figure 4.11 Effet de condition de conservation sur la distribution granulométrique.



Figure 4.12 Mise en évidence de la carbonatation par phénolphtaléine (LERM, 2006)

4.3.2.3. Sur la perméabilité

On rappelle que pour étudier l'effet de temps de cure sur la perméabilité du sol stabilisé, on a choisi deux pourcentages de chaux 5% et 9%. Les figures 4.13, 4.14 illustrent les variations de la perméabilité en fonction du temps de cure et donnent l'évolution de la perméabilité des échantillons du sol traité à des temps de cure de 02, 07, 28 et 60 jours.

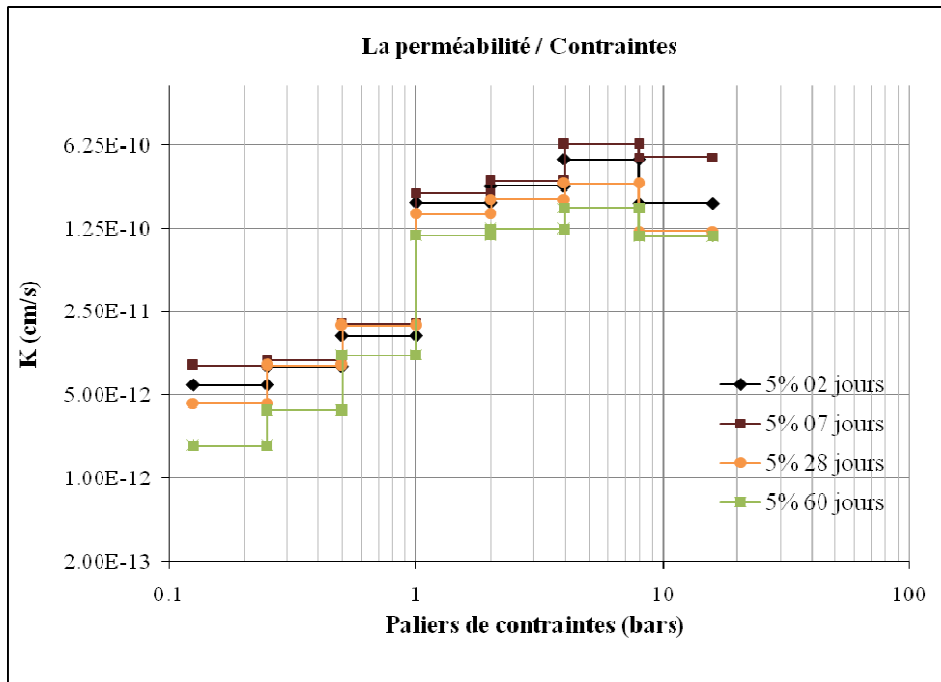


Figure 4.13. Perméabilité du sol traité à 5% de chaux à différents temps de cure.

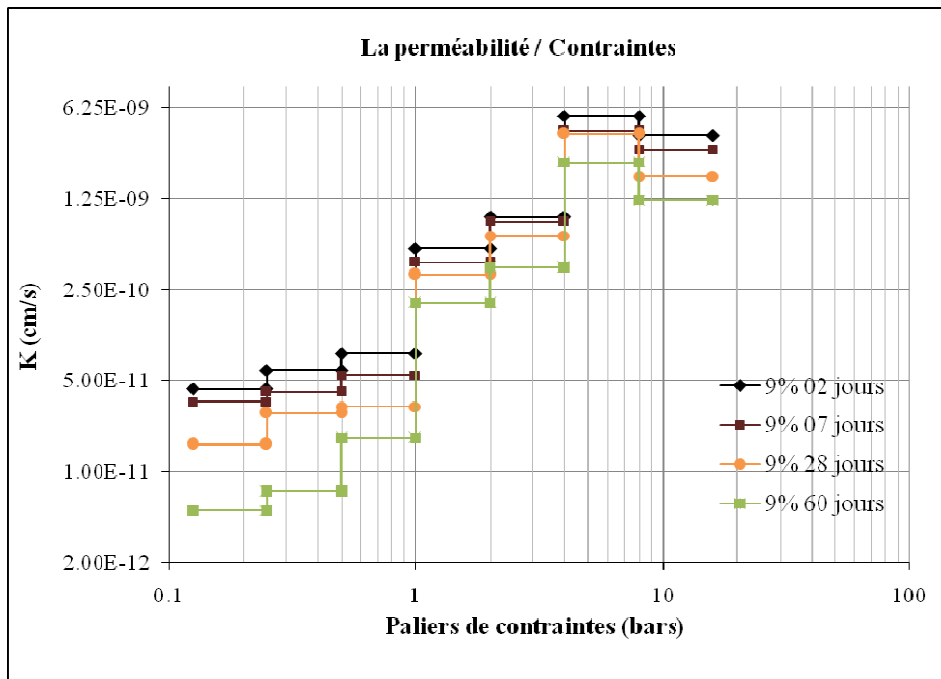


Figure 4.14. Perméabilité du sol traité à 9% de chaux à différents temps de cure.

Chapitre 04 Présentation des résultats et interprétations

Tous les échantillons desol traités montrent une diminution de la perméabilité avec le temps. En plus, avec l'ajout de 9% de chaux, la perméabilité du sol diminue d'une façon importante relativement à celui de 5% pour lequel la diminution est de moyenne importance.

La comparaison de l'évolution de la perméabilité avec différents pourcentages de chaux et à différents temps de cure montre qu'à court terme : la perméabilité augmente avec l'addition de chaux lorsque la quantité de chaux est importante, cette augmentation est immédiate.

Cette modification de la perméabilité est due essentiellement à la réaction d'hydratation sol-chaux qui est due à la capacité d'échange cationique qui change la structure du sol stabilisé. Ceci produit donc une agglomération des particules, ce qui augmente les vides et par conséquent la porosité. Cette augmentation de la perméabilité continue avec 5% de chaux jusqu'à 07 jours puis elle commence à diminuer au delà de cette période.

À long terme, on remarque que le coefficient de perméabilité du sol stabilisé diminue avec le temps de cure et le sol devient moins perméable. Avec 5% de chaux le coefficient de perméabilité (K) diminue légèrement mais avec plus de chaux (9%) cette diminution continue avec le temps de cure. Cette diminution est due à la réaction pouzzolanique. Il y a la formation des nouveaux matériaux de cimentation qui remplissent les vides et influencent la porosité et par conséquent la perméabilité du sol étudié.

Les figures (4.15, 4.16 et 4.17) donnent la comparaison de l'évolution de la perméabilité du sol traité à 5% et à 9% avec le temps de cure. Pour mieux montrer l'effet de temps de cure et du pourcentage de chaux sur la perméabilité du sol, on présente les résultats sur les différents paliers des contraintes et on analyse surtout les valeurs de la perméabilité à faibles chargement c.à.d. en éliminant les effets des charges. La figure 4.18 montre la comparaison de l'évolution de la perméabilité du sol traité à 5% et à 9% avec le temps de cure et pour les différents paliers de chargement.

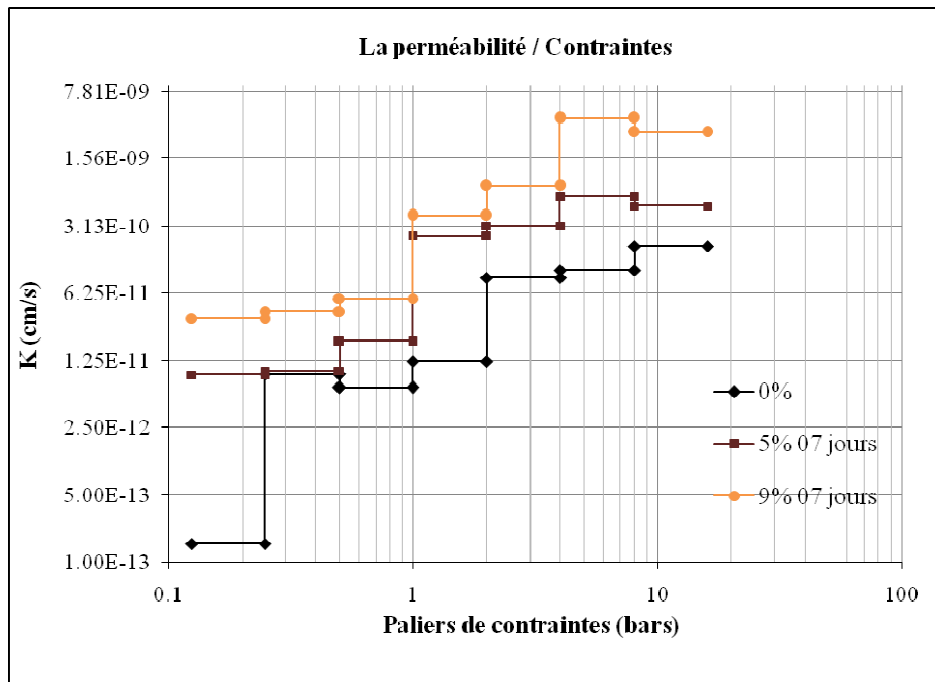


Figure 4.15 L'évolution de la perméabilité avec différents pourcentages de chaux pour 07 jrs.

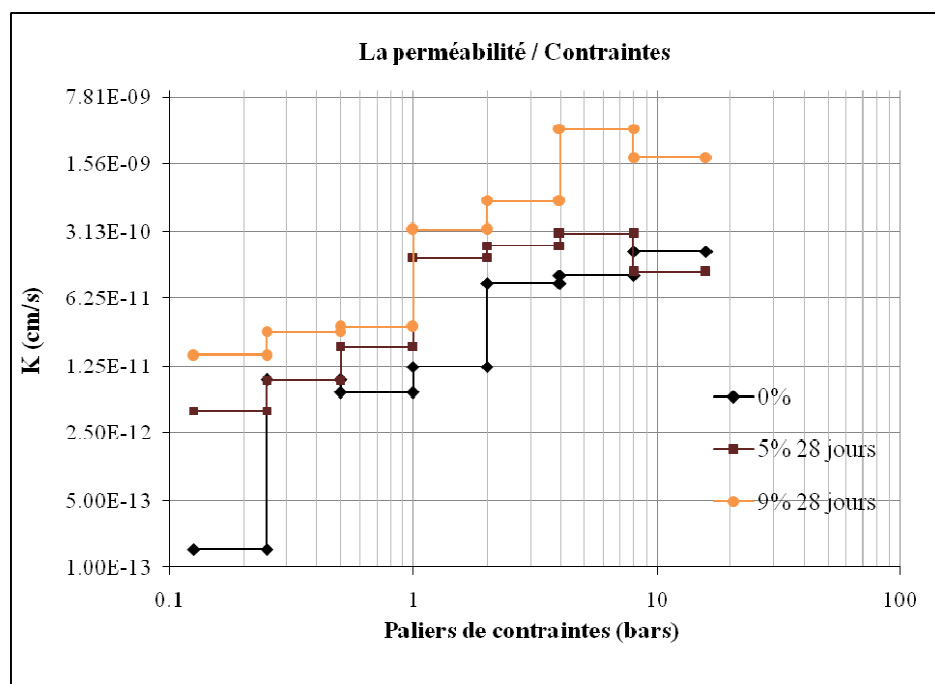


Figure 4.16 L'évolution de la perméabilité avec différents pourcentages de chaux pour 28 jrs.

Chapitre 04 Présentation des résultats et interprétations

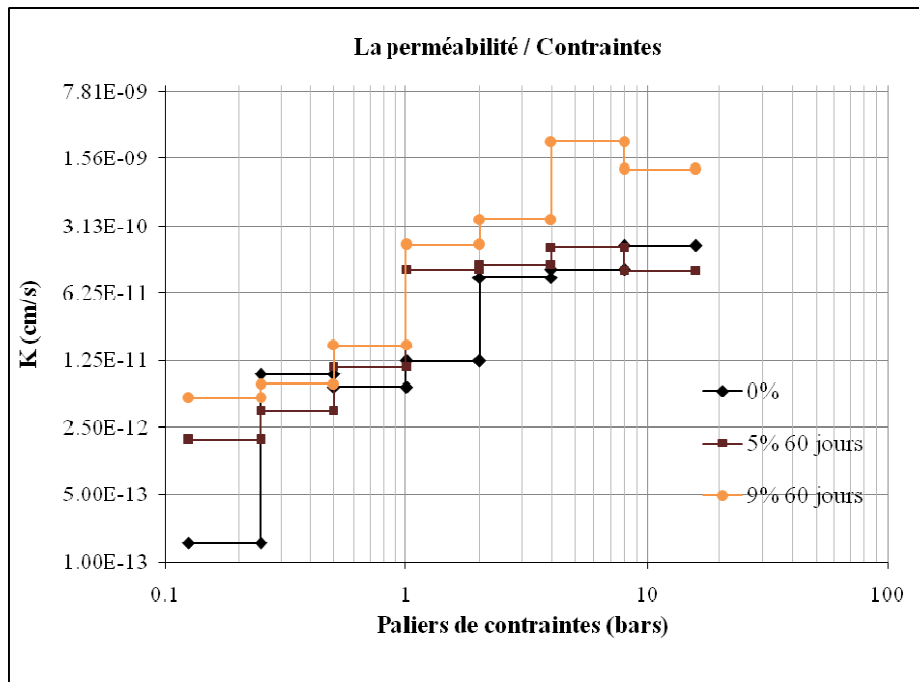
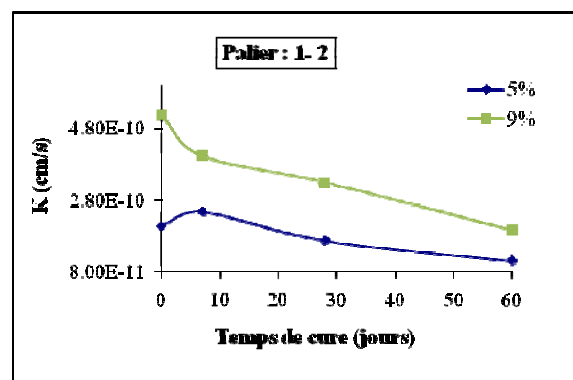
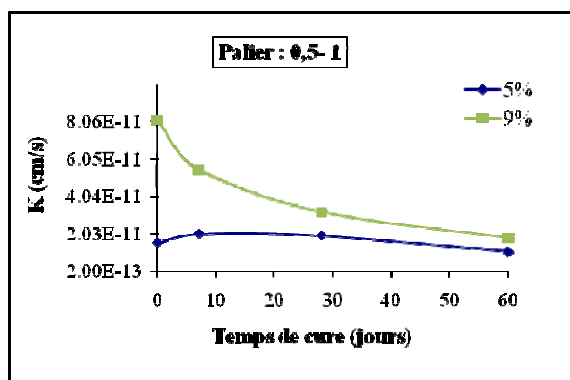
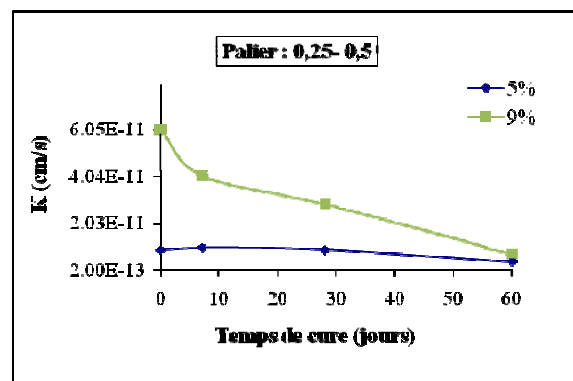
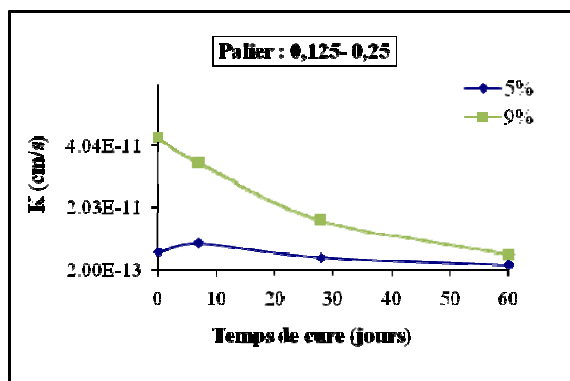


Figure 4.17 L'évolution de la perméabilité avec différents pourcentages de chaux pour 60 jrs.



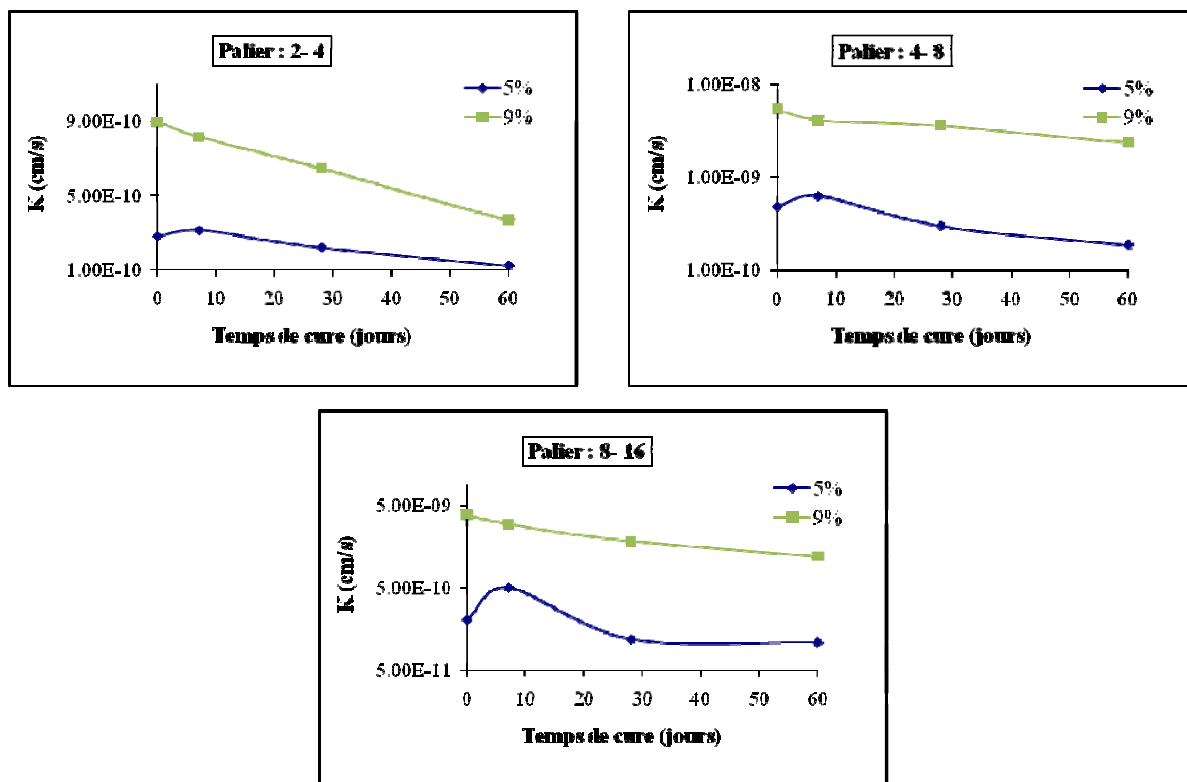


Figure4.18 L'évolution de la perméabilité du sol traité à 5% et à 9% de chaux pour différents paliers de chargement.

Il convient de noter que les temps de cure des échantillons arrêtés à 02, 07, 28 et 60 jours mais l'essai dure quelques jours à raison de 24 heures pour chaque chargement. Pendant ce temps de l'essai, la réaction continue à se développer et la perméabilité à évoluer. Dans la figure4.19, on montre l'évolution de la perméabilité en tenant compte du temps de chargement.

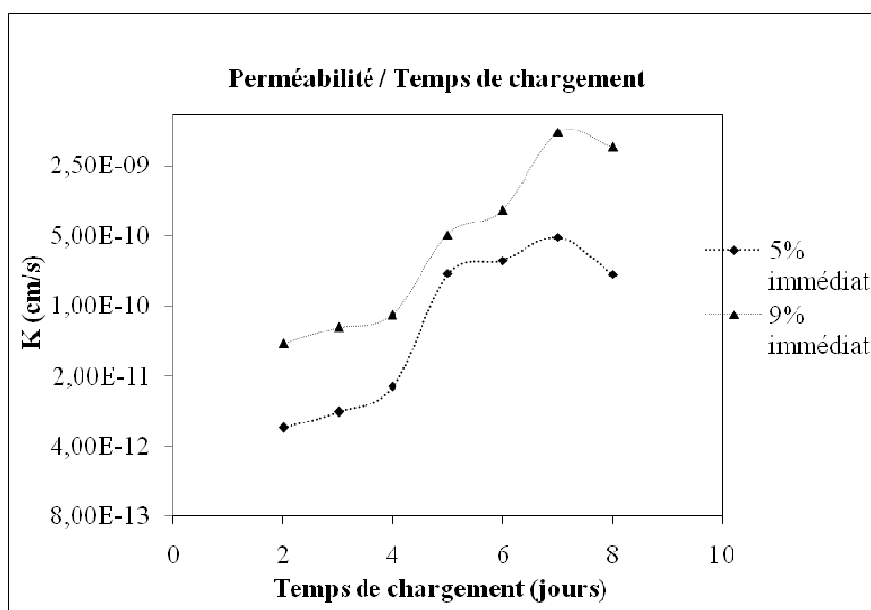


Figure4.19 Evolution de la perméabilité en fonction de temps de chargement.

4.3.2.4. Sur la courbe oedométrique

Les figures 4.20 et 4.21 illustrent l'effet de la chaux sur la courbe oedométrique du sol reconstitué traité à 5% et 9% pour différents temps de cure. Les courbes de compressibilité sont obtenues par le report de l'indice des vides final après chaque palier de chargement en fonction de la contrainte effective verticale.

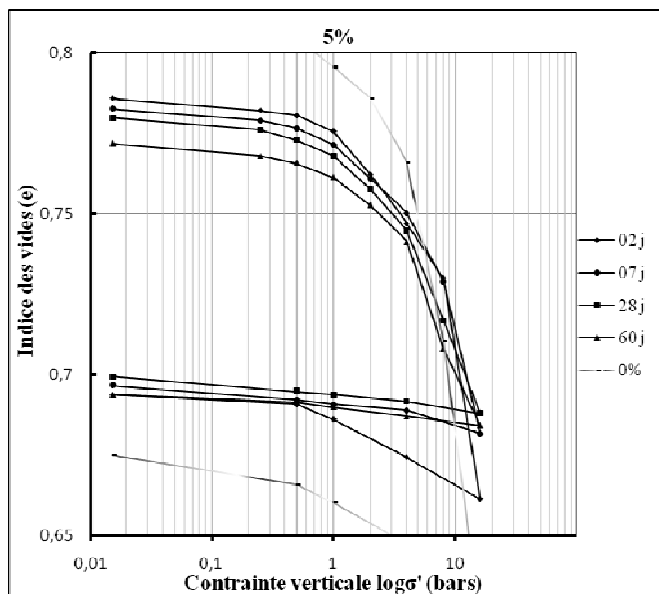


Figure 4.20 Effet de la chaux sur la courbe oedométrique à 5% de chaux pour différents temps de cure.

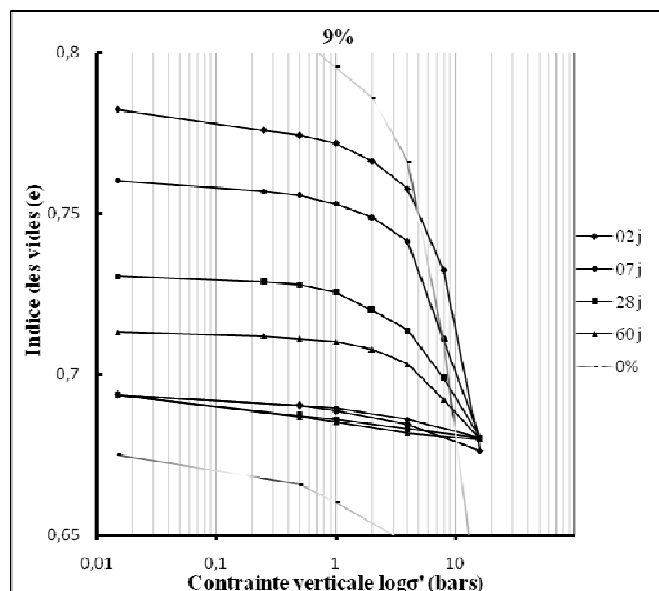


Figure 4.21 Effet de la chaux sur la courbe oedométrique à 9% de chaux pour différents temps de cure.

On observe que la compressibilité diminue avec l'accroissement de la quantité de chaux. Pour 5% la compressibilité diminue avec l'ajout de chaux. La diminution de la compressibilité à

ENSTP 2012 - Analyse de la réaction sol-chaux dans les sols stabilisés.

5% est immédiate. Avec une grande quantité de chaux (9%) la compressibilité diminue d'une façon plus importante jusqu'à 60 jours. Cette diminution est due essentiellement à l'avancement de la réaction pouzzolanique rendant le sol de plus en plus raide dans le temps.

4.3.2.5. Sur la compressibilité du sol

On étudie l'effet de la chaux sur la compressibilité du sol traité à deux taux de chaux 5% et 9%. Par la suite on analyse l'effet de temps cure sur le coefficient de compressibilité C_c , le coefficient de gonflement C_g , et la pression de consolidation P_c à partir des résultats de l'essai oedométrique.

✓ Sur le coefficient de compressibilité

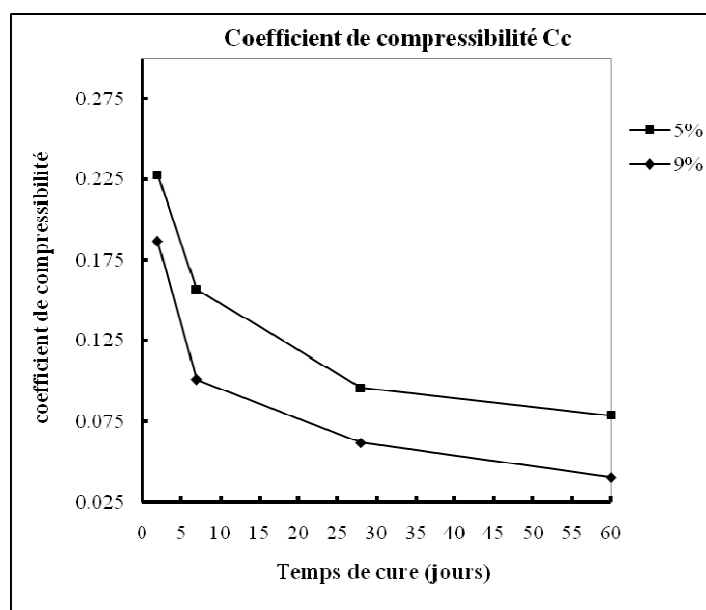


Figure 4.22 Effet de la chaux sur le C_c pour différents temps de cure.

La figure 4.22 illustre l'évolution de coefficient de compressibilité en fonction du temps de conservation du sol traité à 5% et 9% de chaux. On remarque que le coefficient de compressibilité diminue avec l'ajout de la chaux et dans le temps de cure, et le sol devient moins compressible.

Le coefficient de compressibilité continue à diminuer pour les différents temps de cure. Pour les premiers sept jours cette diminution est due à l'augmentation du frottement entre les particules du sol stabilisé car le sol devient friable, moins sensible à l'eau et moins compressible après traitement. Cette diminution est due principalement à la capacité d'échange cationique ce qui diminue le film d'eau autour des particules argileuses et augmente le contact entre elles. L'agglomération des particules favorise le frottement inter granulaire. Avec une quantité plus importante de chaux cette diminution continue avec le temps de cure.

Sur le coefficient de recompressibilité (gonflement) :

La figure 4.23 montre l'évolution de coefficient de recompressibilité avec l'ajout de chaux à différents temps de cure. On observe une diminution du coefficient de recompressibilité du sol traité à 5% et 9% de chaux avec l'augmentation de temps de cure. Ce qui indique que le sol traité présente un potentiel de gonflement de plus en plus faible avec le temps de cure.

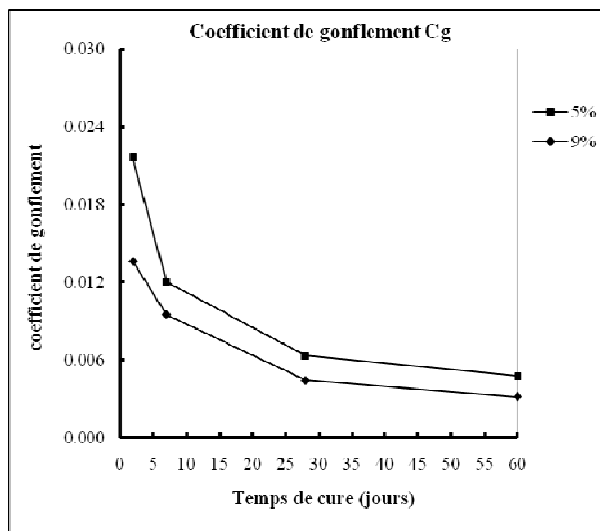


Figure 4.23 Effet de la chaux sur le C_g pour différents temps de cure

4.4. Etude du développement de la résistance

On commence par analyser les changements produits sur la résistance du sol traités à différents taux de chaux et à 28 jours de cure. Ce temps de cure est supposé correspondre, à l'image de l'hydratation du ciment, à l'accomplissement de la réaction pouzzolanique (Bell, 1996; Little, 1999 ; Mooney, 2010). Les effets des autres taux de chaux et durées de cure seront utilisés pour l'analyse des mécanismes de la réaction.

4.4.1. Résistance mécanique à 28 jours de cure

Les résultats montrant l'effet du dosage en chaux sur la compression simple à 28 jours de cure ainsi que sur la déformation des échantillons sont donnés sur la figure 4.25. Les échantillons sont traités à 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, et 22% de chaux.

La figure 4.25 montre que le sol non traité présente une résistance faible avec une courbe de résistance à palier indiquant un comportement franchement plastique. L'ajout de chaux augmente la résistance à la compression et diminue la déformation axiale à la rupture avec apparition d'un pic remarquable dans la courbe effort-déformation. Le pic indique l'apparition de la fragilité qui augmente avec le dosage en chaux.

La figure 4.26 représente l'effet de la chaux après 28 jours sur la résistance mécanique de cure et sur la déformation axiale correspondante. Après 28 jours de conservation, la résistance à la compression simple du sol reconstitué traité continue à augmenter avec le pourcentage de chaux sans qu'aucun maximum de résistance similaire à celui de la figure 4.25 n'apparaisse.

4.4.2. Développement de la résistance mécanique dans le temps

Les courbes de la résistance à la compression simple obtenues à 7 et 14 jours de cure en fonction du dosage en chaux sont données dans les figures 4.27 et 4.28.

La comparaison des résultats des essais sur le sol non traité et traité à 3%, 5%, 7%, 9%, 11% et 13% de chaux montre que le sol non traité présente une courbe de résistance à palier. L'ajout de la chaux augmente la résistance à la compression et diminue la déformation axiale à la rupture avec apparition d'un pic remarquable effort-déformation pour tous les pourcentages.

L'évolution de la résistance à la compression simple en fonction du pourcentage de chaux pour 2, 7, 14, et 28 jours de cure est montrée sur la figure 4.29.

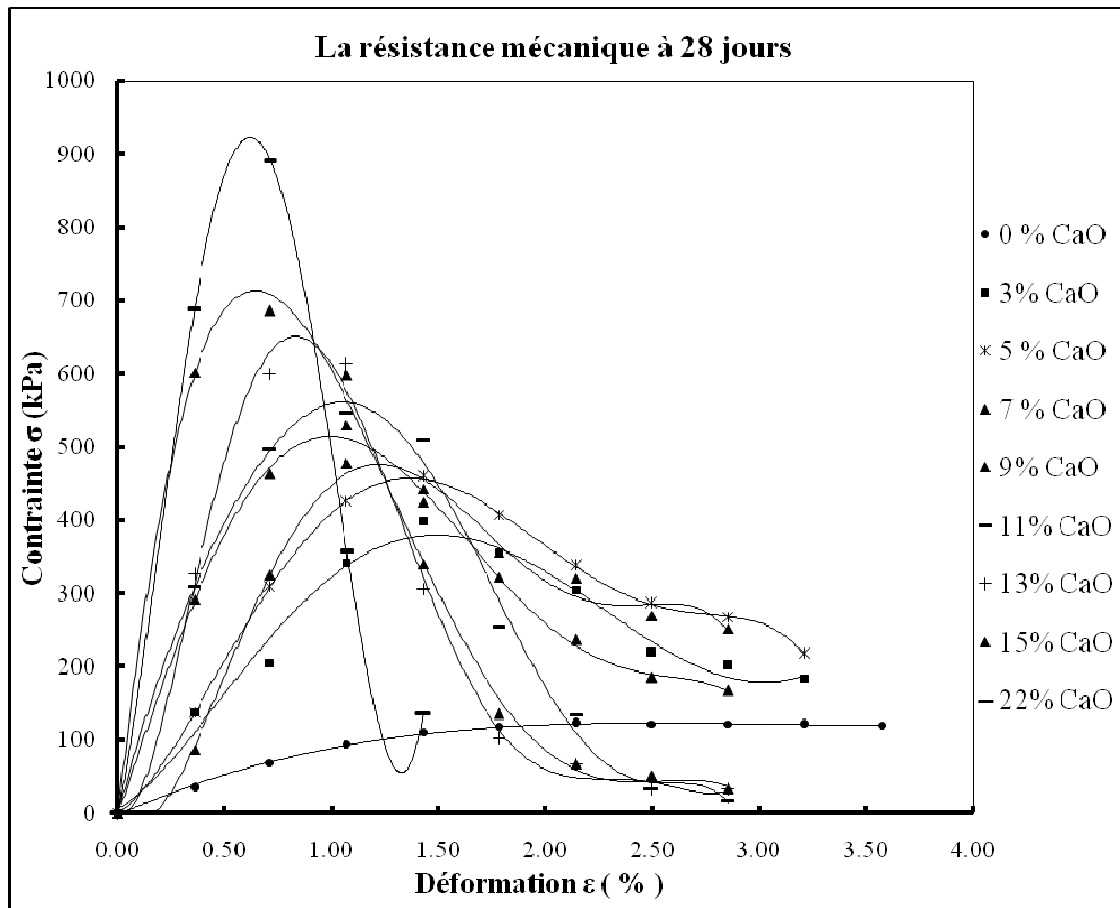


Figure 4.25 Influence de l'ajout de chaux sur la courbe contrainte-déformation pour 28 jours.

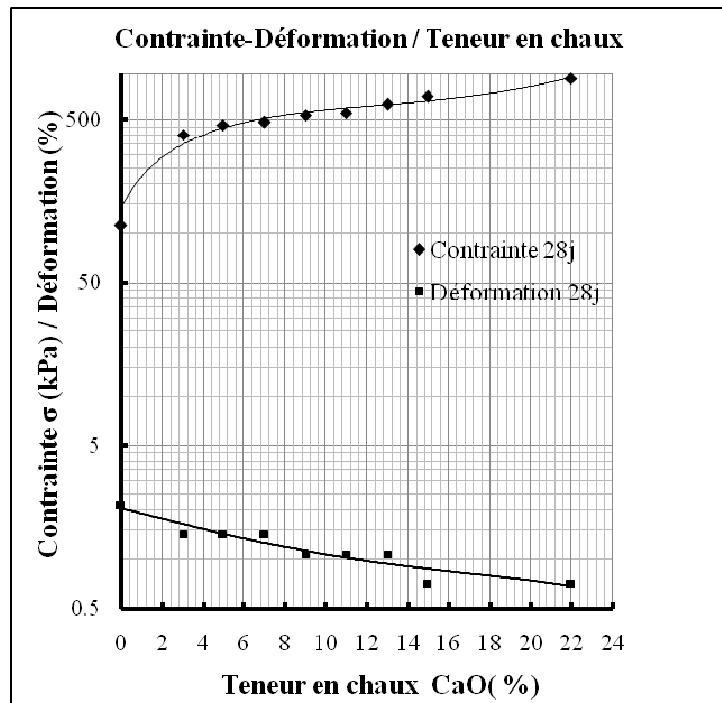


Figure 4.26 Effet de la chaux sur la résistance mécanique et la déformation axiale pour 28jrs de cure.

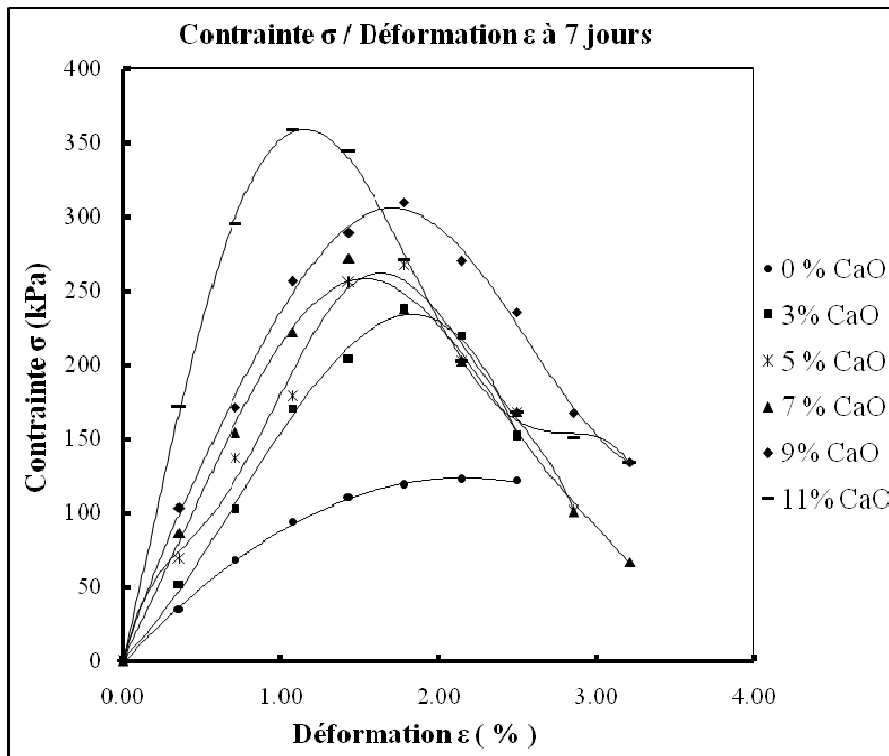


Figure4.27 Influence de l'ajout de chaux sur la courbe contrainte-déformation pour 07 jours.

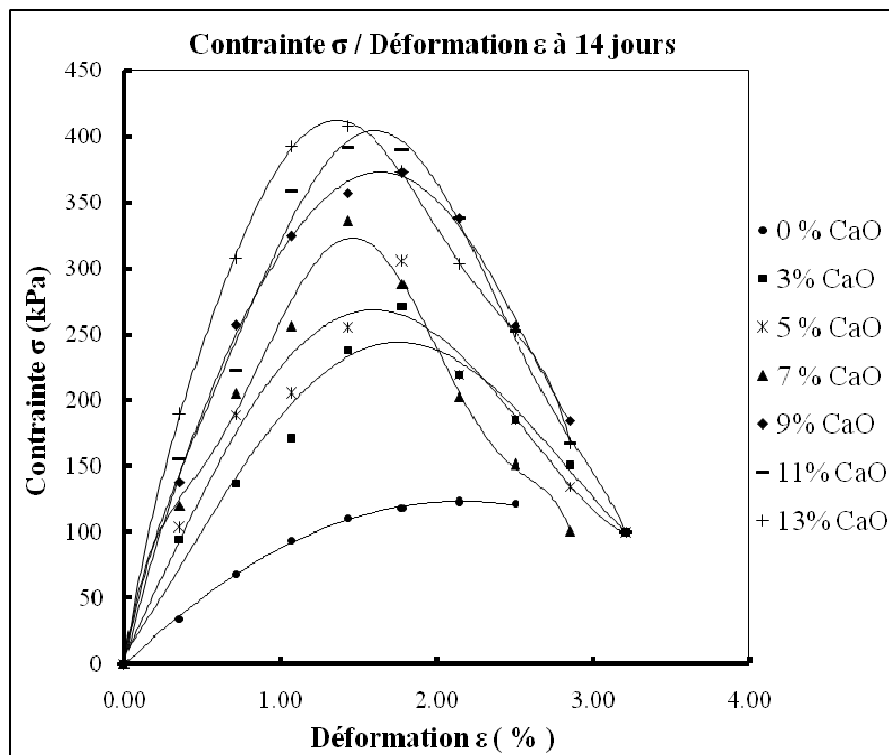


Figure4.28 Influence de l'ajout de chaux sur la courbe contrainte-déformation pour 14 jours.

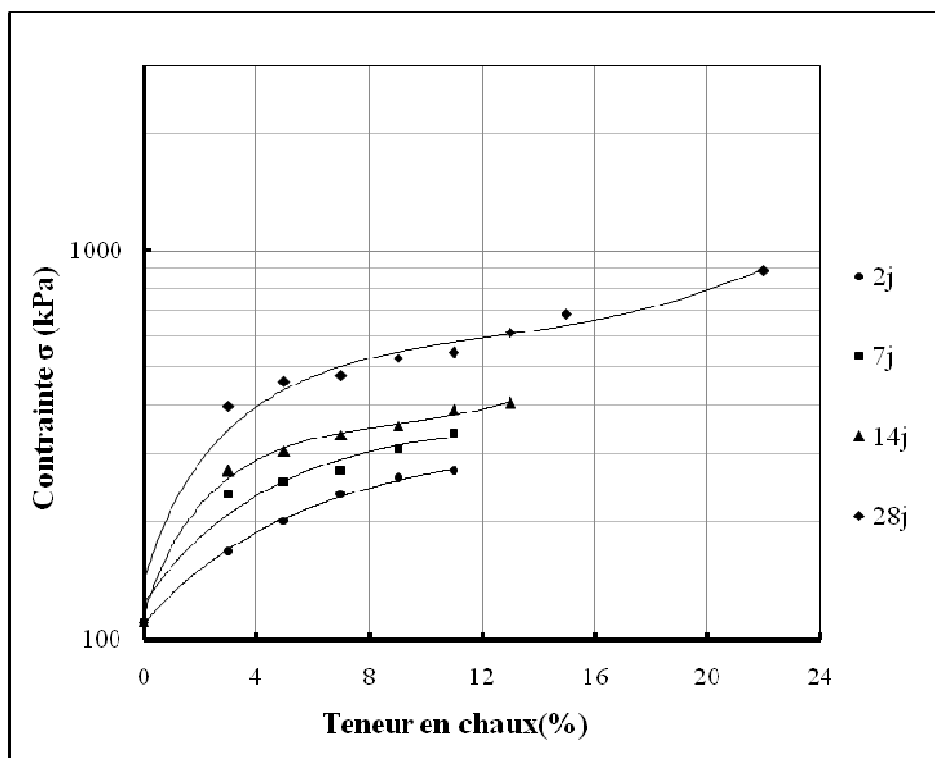


Figure 4.29 Effet de la chaux sur la résistance mécanique pour différents temps de cure.

La comparaison des courbes de compression simple pour le sol non traité et traité à 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, et 22% est présentée sur la figure 4.29. Les courbes montrent, l'accroissement rapide de la pente jusqu'à 5% et puis la stabilisation au delà.

La même tendance de la compression simple en fonction de la chaux a été trouvée aussi par Bell (1989 et 1996) pour le quartz, Little (1995), Lazzali (1997) pour la bentonite, Little (1999), Kassim et Chern (2004), Nalbantoglu (2006), Tono et al (2006), Mohamed et col (2009), Lasledj (2009), Gueridi (2009) pour un mélange sol-bentonite, et Mooney (2010).

Mais pour d'autres auteurs, la compression simple augmente jusqu'à un pourcentage optimal puis elle diminue. Cette tendance a été observée par Bell (1989 et 1996) pour la montmorillonite et la kaolinite, Kassim (2004) pour quatre types d'argiles parmi les cinq étudiées.

Evaluation de pH du sol traité

On récupère le sol des éprouvettes écrasées, et on les conserve dans des sachets étanches et on laisse pour un temps de cure de 28 jours. Après on mesure le pH des mélanges sol-chaux. La figure 4.30 présente les mesures de pH des mélanges sol-chaux.

Après 28 jours de cure le pH des mélanges sol – chaux diminue, cette diminution s'explique par la diminution de la concentration des hydroxydes qui sont consommés dans la réaction (sol – chaux).

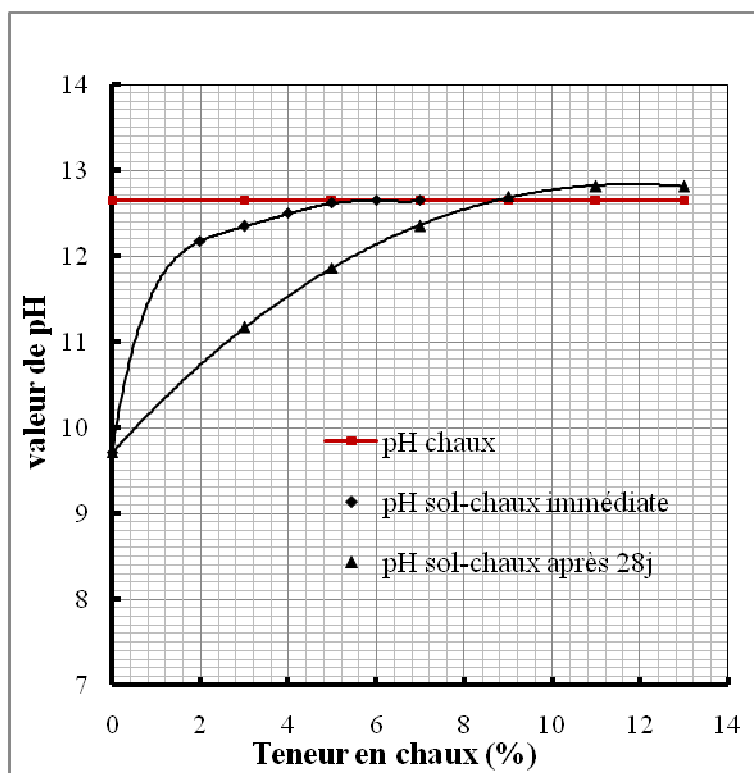


Figure 4.30 Evolution du pH en fonction du pourcentage de chaux pour 28 jrs de cure.

Résultats de l'analyse diffractométrique

Dans le but de comprendre l'évolution minéralogique qui se produit au sein des structures des mélanges sol-chaux.

On utilise la technique de caractérisation et d'identification des phases minéralogiques présentées dans le sol pour investiguer les changements minéralogiques provoqués par le traitement de sol à la chaux. On utilise l'analyse par diffraction aux rayons X.

Avant d'être analysées, les courbes brutes de la diffraction aux rayons X réalisée sur des échantillons poudre ont été traitées (correction offset théta, élimination des raies $K\alpha_2$ et lissage du profil) avec la logiciel Xpovder PRO version 2004.04.70.

On rassemble dans la figure 4.31 les spectres de diffraction des rayons X pour les échantillons de sol traités à 3, 5 et 7% de chaux, testés après 28 jours de cure avec le spectre du même sol non traité.

L'analyse de ces diffractogrammes permet de noter 3 observations majeures :

- 1- Après 28 jours de cure on peut voir la relative disparition des pics correspondant à la montmorillonite (ex. M(3.199)) et à la dolomite (ex. D(2.908)) des spectres des échantillons testés à 3, 5 et 7% de chaux. Ce résultat est l'expression de la destruction de la structure de l'argile et de la dissolution des silicates et aluminates réalisée par le PH élevé du milieu.

Chapitre 04 Présentation des résultats et interprétations

- 2- L'augmentation de l'intensité des pics correspondant à la calcite (ex. C(2.28)) montre l'augmentation de la présence de cette phase avec le pourcentage de chaux rajouté. Ce résultat pourrait indiquer que la chaux utilisée contient des carbonates ou subit une carbonatation pendant la durée de cure des échantillons testés.
- 3- Les spectres montrent l'apparition de nouvelles raies qui pourraient indiquer la présence ou la formation de nouvelles phases cristallines.

En premier lieu on peut noter une faible apparition sur tous les spectres du sol traité des raies correspondant à la portlandite (Ca(OH)_2 , notée P). On remarque que l'intensité de ces raies augmente avec le taux de chaux utilisé.

On peut distinguer nettement sur le spectre du sol traité à 7 % de chaux la présence de raies correspondant aux aluminates de calcium hydratés (C-A-H) et aux silicates de calcium hydratés (C-S-H). Ces raies sont de très faibles intensités dans les spectres de 3 et à 5% de chaux.

4.4.3. Influence de condition de conservation sur la résistance mécanique à 28 jours :

La figure 4.32 présente les courbes contrainte-déformation des essais de compression simple d'échantillons de sol traités après une exposition à l'air libre pendant 28 jours (non conservé) pour les pourcentages suivant : 5, 11, 13, et 15%.

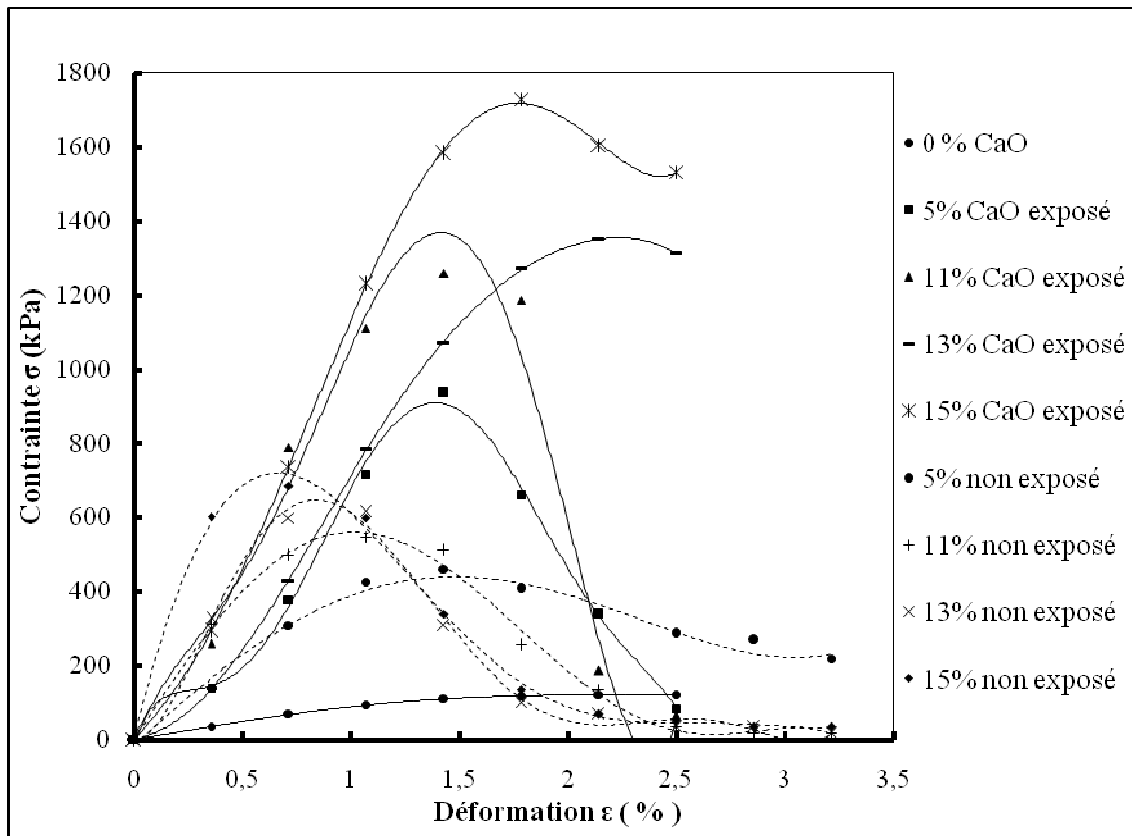


Figure 4.32 Courbe contrainte-déformation à 28 jrs de 5, 11, 13 et 15% exposé et non exposé à l'air.

Après 28 jours d'exposition à l'air libre, la figure 4.32 montre que la résistance à la compression simple des éprouvettes de sol traitées conservées sans conditions contrôlées (exposé à l'air libre) est plus grande à celle conservées dans l'humidificateur (non exposé).

Par cet essai, on voulait vérifier l'effet de l'exposition à l'air libre sur la résistance mécanique. D'après certains auteurs l'exposition à l'air libre provoque la carbonatation de la chaux et ralentit la réaction sol - chaux ce qui diminue la résistance du sol. Dans cette étude, on obtient le contraire c.-à-d. la résistance augmente ce qui pourrait être expliqué par l'effet de la température. L'exposition est faite entre Juillet et Aout lorsque la température est largement supérieure à 20C° (entre 30 et 45) et les échantillons non exposés sont conservés dans l'humidificateur à 20C°.

Bell (1996) a étudié l'évolution de la résistance mécanique de deux sols argileux traités à 8% de chaux. Il a montré que la résistance mécanique du sol augmente significativement avec la

Chapitre 04 Présentation des résultats et interprétations

température et que la résistance mécanique approximativement double lorsque la température de maturation augmente de 20°C à 40°C.

On peut voir sur la base des résultats de la figure 4.33 que la résistance a plus que doublé dans le cas de cette étude.

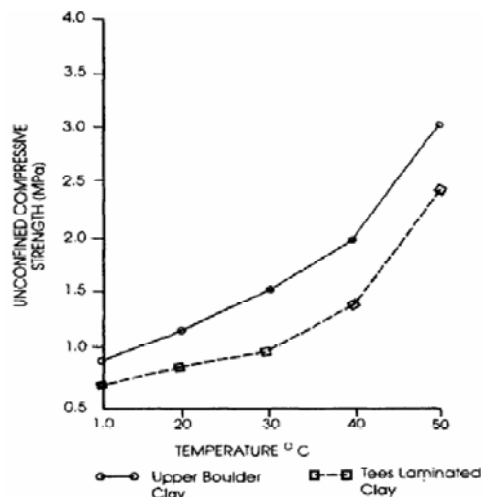


Figure 4.33 Evolution de la résistance mécanique avec la température Bell (1996).

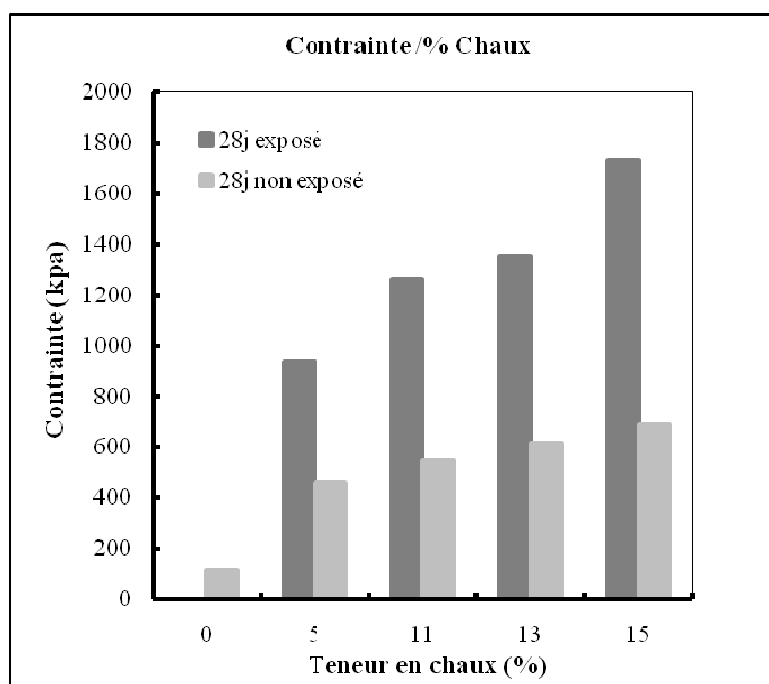


Figure 4.35 Effet de condition de conservation sur la résistance mécanique à 28 jrs.

4.4.4. Analyse de l'effet de longues périodes de temps sur la résistance mécanique de sol stabilisé à la chaux

Pour étudier l'effet de longs temps de cure sur la résistance mécanique à 60, 90 et 180 jours de cure dans une chambre humide à 20°C on a choisi quatre pourcentages de chaux : 3, 5, 13 et 22%. La comparaison des résultats du sol traité avec différents taux de chaux est représentée sur les figures 4.36, 4.37, 4.38. Les figures ci-après, montrent lorsque le temps de

Chapitre 04 Présentation des résultats et interprétations

cure est important la résistance mécanique continue à augmenter avec apparition d'un pic, et la déformation axiale diminue.

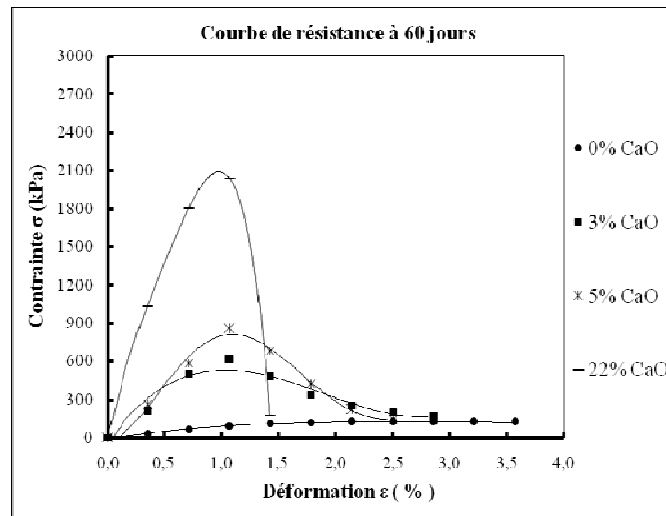


Figure 4.36 Influence de l'ajout de chaux sur la courbe contrainte-déformation pour 60 jours.

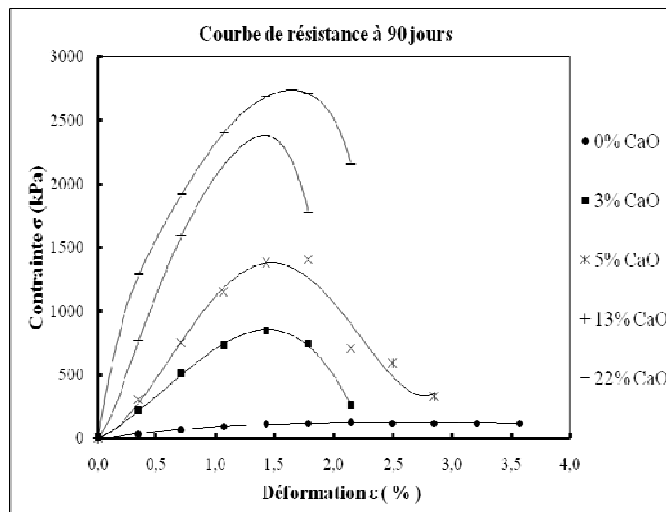


Figure 4.37 Influence de l'ajout de chaux sur la courbe contrainte-déformation pour 90 jours.

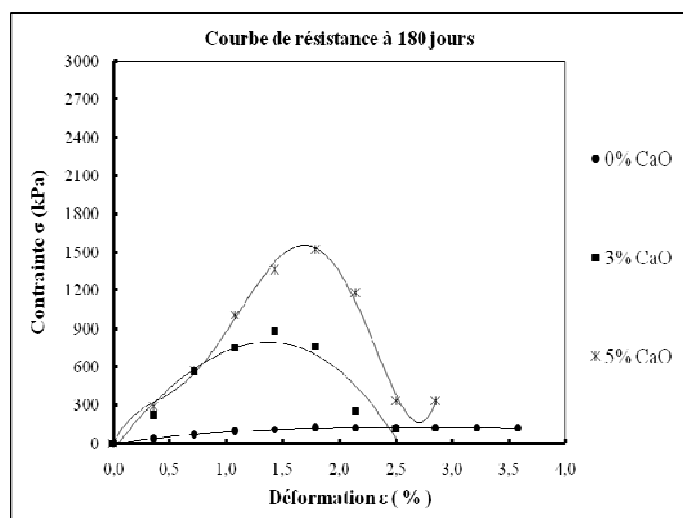


Figure 4.38 Influence de l'ajout de chaux sur la courbe contrainte-déformation pour 180 jours.

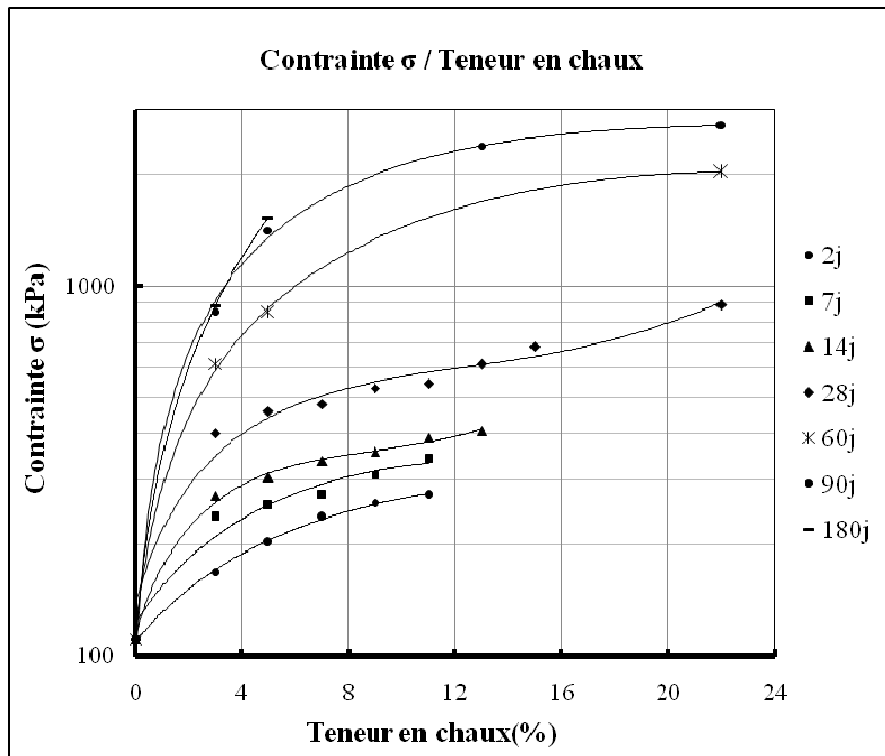


Figure 4.39 Effet de la chaux sur la résistance à la compression pour différents temps de cure. L'évolution de la compression simple en fonction du pourcentage d'ajout de chaux pour 2, 7, 14, 28, 60, 90, 180 jours du sol traité à 3% et à 5% de chaux et à différents temps de cure est donnée sur les figures 4.40 et 4.41.

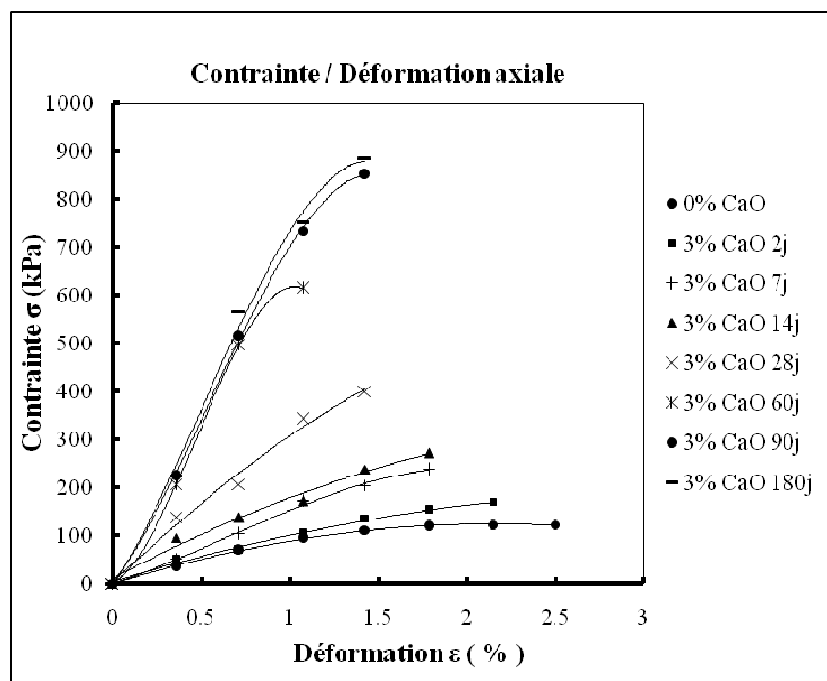


Figure 4.40 Influence du temps de cure sur la résistance mécanique sol traité à 3% de chaux.

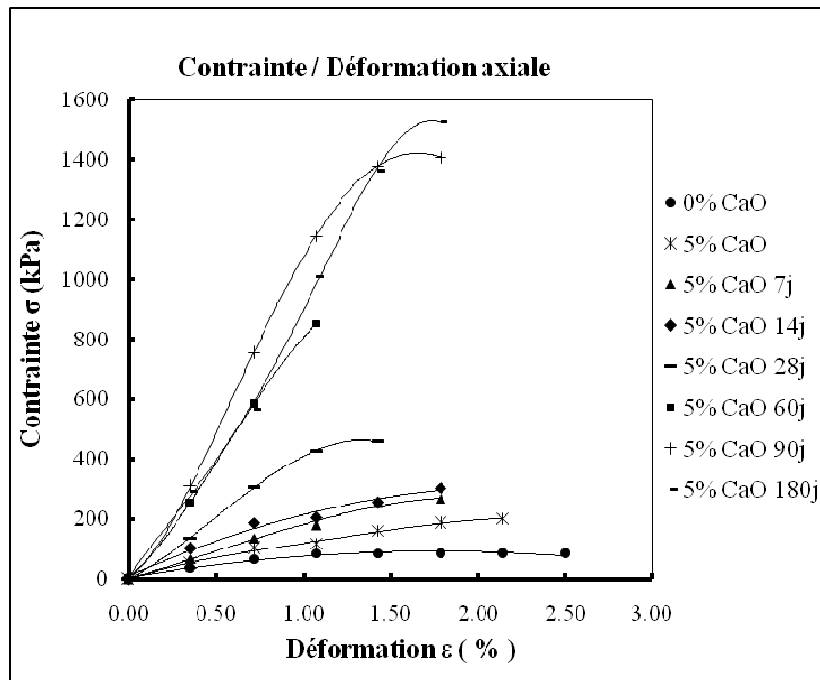


Figure 4.41 Influence du temps de cure sur la résistance mécanique sol traité à 5% de chaux. La figure 4.42 montre l'amélioration de la compression simple avec l'augmentation du pourcentage de chaux. Cette amélioration semble être plus importante lorsque le temps de conservation est plus long.

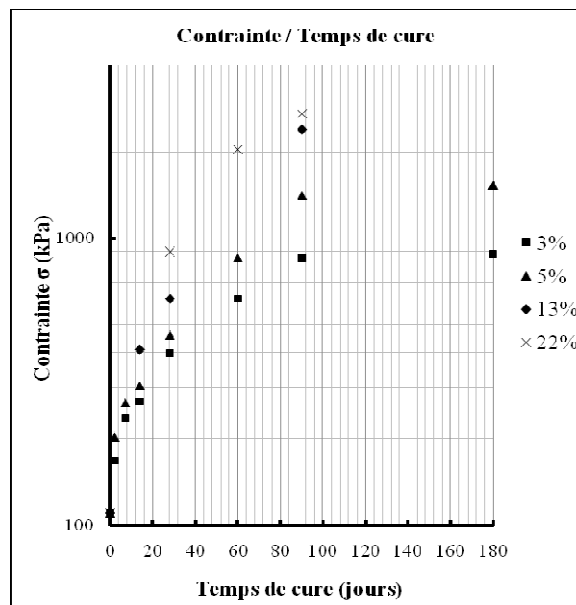


Figure 4.42 Evolution de la résistance mécanique pour différents temps de cure.

4.5. Discussion des résultats

Les résultats ci-dessus présentés sont synthétisés et utilisés pour apporter quelques éclairages intéressants sur la nature de la réaction qui se réalise entre le sol et la chaux et ses conséquences telles que observées sur le comportement du sol traité. Le terme réaction sol-chaux utilisé ici englobe l'ensemble des manifestations physico-chimiques qui se produisent à court-terme ainsi que les réactions chimiques qui se réalisent dans le moyen et long terme.

✓ Sur la granulométrie du sol traité

Afin de comprendre les mécanismes qui s'opèrent lors de la stabilisation du sol à la chaux et leurs effets sur la taille des particules du sol, on présente dans la figure 4.43 l'évolution des pourcentages des classes granulaires (argile, limon, sable fin et sable grossier) du sol stabilisé en fonction du temps de cure.

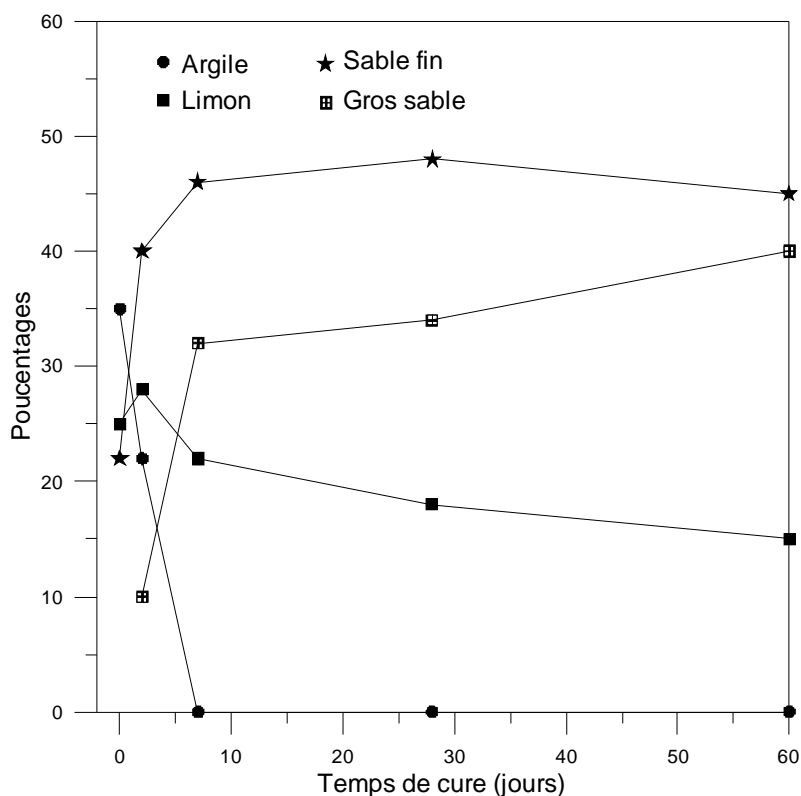


Figure 4.43 Evolution des classes granulaires d'un sol stabilisé à la chaux en fonction du temps de cure

On analyse ici ces résultats en distinguant les mécanismes qui ont lieu immédiatement après la stabilisation à court terme de ceux qui se réalisent à long terme. Comme indiqué plus haut, on pose que le long terme est associé à des temps de cure supérieurs à 7 jours.

Chapitre 04 Présentation des résultats et interprétations

L'évolution des pourcentages correspondant aux différentes classes granulaires permet de remarquer :

1- A court-terme

- La disparition totale de l'argile (dont le pourcentage initial est 35%) dès 7 jours de cure.
- L'augmentation manifestement importante de la présence du sable (fin et grossier) avec une légère augmentation du limon à 2j qui est immédiatement suivie d'une diminution à 7 jours.

2- A long terme

Une diminution graduelle de la présence du limon et du sable fin de manière concomitante avec une augmentation de la présence du sable grossier.

Les transformations à caractère physico-chimique qui se réalisent à court-terme provoquent la disparition des particules fines qui servent à construire par floculation et agglomération des éléments plus grossiers (limon et sable). Les résultats présentés semblent indiquer que le processus d'agglomération se poursuit donnant lieu à long terme à des éléments de sol de plus en plus gros en fonction de l'avancement de la réaction pouzzolanique. Les gels de silicates et d'aluminates de calcium hydratés qui précipitent permettent en se solidifiant de souder les éléments de moindre taille et construire des grains de taille de plus en plus importante. Ces résultats devront être confirmés par des observations de la microstructure du matériau stabilisé.

✓ **Plasticité du sol**

Les résultats obtenus dans ce travail ont permis de confirmer que l'ajout de chaux réduit de manière immédiate la plasticité du sol traité. On a trouvé qu'à long terme néanmoins la limite de liquidité augmente bien au-delà de la valeur du sol non traité. Ce résultat a été expliqué par certains auteurs comme étant une forme de réversibilité de la réaction sol-chaux.

L'évolution à long terme de la granulométrie du sol traité permet de réfuter cette explication. En effet, les changements qui s'opèrent dans la granulométrie du sol stabilisé, tels que montrés dans ce travail, ne sont pas réversibles. Ils se poursuivent à long terme contrôlés par la cimentation des nouvelles phases cristallines qui se forment.

Chapitre 04 Présentation des résultats et interprétations

L'augmentation de la limite de liquidité, observée à plus ou moins long terme serait le résultat de l'absorption d'eau par des gels de silicates et d'aluminates de calcium néoformés et dont la structure est encore poreuse.

✓ Evolution de la perméabilité

On a pu confirmer dans ce travail que la perméabilité renseigne sur les changements qui se produisent dans la structure du sol traité à la chaux. Les modifications qui se réalisent à court-terme (échange cationique, floculation et agglomération) dans la structure du sol construisent des grains de taille plus importante à partir des particules fines. Cette agglomération des particules, mise en évidence par l'évolution de la granulométrie et la diminution de la plasticité du sol, crée dans la masse du sol des pores importants qui sont révélés par l'augmentation de la perméabilité du sol.

La diminution de la perméabilité du sol traité observé à long terme indique que les pores créés à court terme sont obstrués par la précipitation suivi du durcissement progressif dans ces pores des nouvelles phases cristallines (CSH et CAH) mises en évidence par les analyses de diffraction aux rayons X.

✓ La résistance à la compression simple

L'évolution de la résistance à la compression simple du sol traité à la chaux a été étudiée dans ce travail en fonction du dosage en chaux et dans le temps. Contrairement au béton, la résistance atteinte à 28 jours par le traitement des sols à la chaux ne peut pas représenter une résistance nominale. On a pu montrer que la résistance du sol traité continue encore à augmenter de manière significative au-delà de 180 jours.

Ce résultat est confirmé ici par l'importance du pH enregistré pour le sol traité après 28 jours de cure (figure 4.30) et aussi par la présence encore importante de portlandite (mise en évidence par les résultats diffractométrique, 4.31).

Des expériences rapportent que la résistance des sols stabilisés à la chaux peut continuer à augmenter même après plusieurs dizaines d'années d'exploitation des ouvrages (Bell, 1996 ; Little, 1999 ; Lasledj, 2009).

Il reste néanmoins que la nature physico-chimique ou chimique exacte de la réaction sol-chaux continue à être largement méconnue. On ne comprend toujours pas comment les réactions de floculation (d'origine physico-chimique) sont irréversibles et ne sont pas

Chapitre 04 Présentation des résultats et interprétations

totalemment détruites par la trituration du sol lors de la réalisation du compactage et de la granulométrie : tamisage et sédimentométrie avec utilisation d'un défloculant.

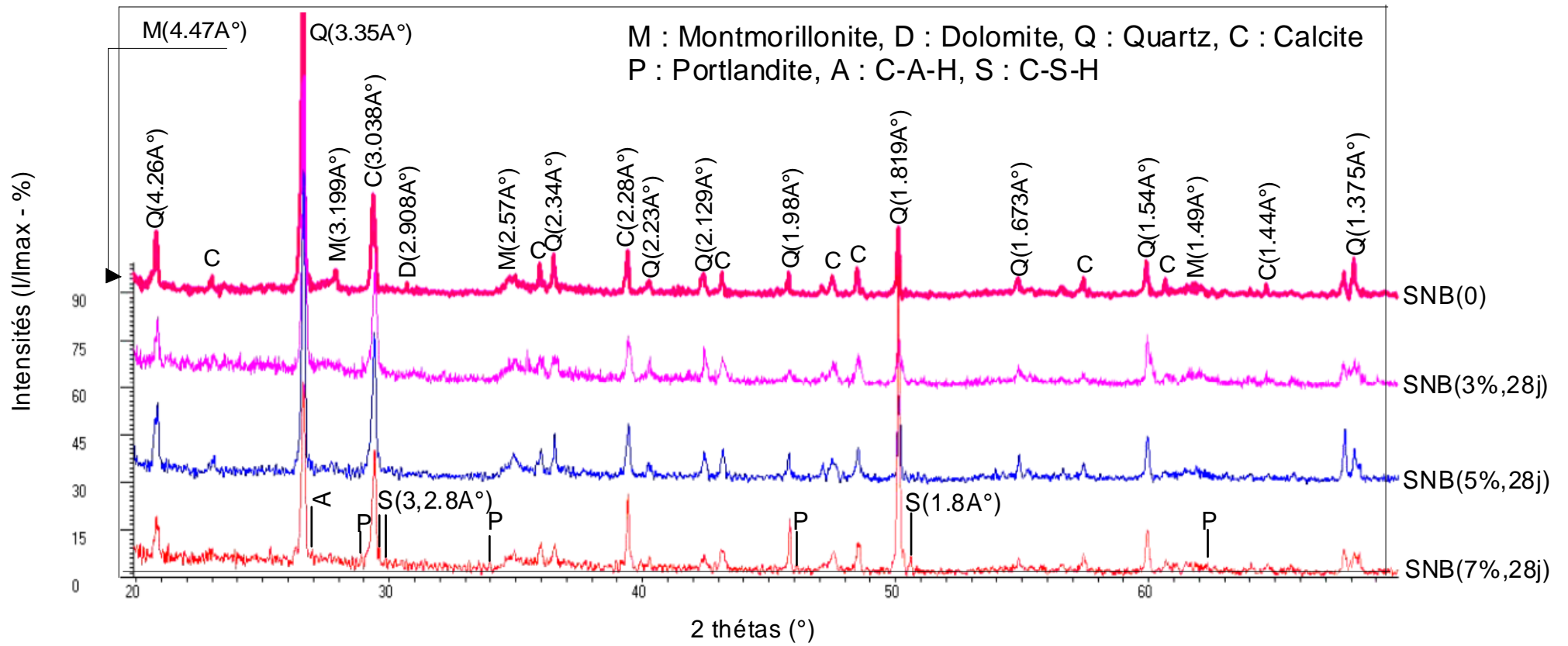


Figure 4.31 : Courbes de diffraction aux rayons X du sol testé à 3, 5 et 7 % de chaux vive après 28 jours de cure.

SNB : Sol Naturel + Bentonite

Conclusions générales

Le traitement des sols à la chaux est une technique ancienne et efficace dans la réalisation des travaux de génie civil. Aujourd'hui, cette technique est largement utilisée de par le monde et elle continue à se présenter comme une des meilleures solutions pour les problèmes de portance posés par les sols.

Quand la chaux est ajoutée au sol plusieurs réactions se produisent :

- À court terme les réactions physico-chimiques rapides entre la chaux et les minéraux d'argile. Les deux réactions primaires : l'échange cationique, la floculation et l'agglomération produisent des améliorations immédiates dans la plasticité du sol et de sa maniabilité. Ceci est connu comme amélioration ou modification des sols.
- À long terme la réaction pouzzolanique entre la chaux et les minéraux du sol produit des agents de cimentation qui augmentent la résistance et la durabilité. C'est la stabilisation à la chaux.
- Une quatrième réaction qui peut se produire qui est la carbonatation, dans laquelle la chaux réagit avec le CO_2 atmosphérique, cette réaction est nuisible au procédé de stabilisation lui-même.

Donc lors de traitement de sol à la chaux les changements des propriétés des sols traités sont dus aux réactions chimiques (échange cationique et activité pouzzolanique) entre la chaux et les minéraux argileux des sols.

L'évolution du processus de traitement dépend des paramètres principaux qui peuvent agir sur la réaction tels que la température, le temps de cure, les conditions climatiques, de mise en œuvre et de conservation, et des caractéristiques physico-chimiques des minéraux argileux du sol traité.

On a utilisé dans ce présent travail, les résultats d'un programme expérimental pour tenter, de mieux comprendre les mécanismes du traitement et de stabilisation, c'est-à-dire les différentes réactions qui se produisent entre le sol et la chaux à court et à long termes et qui construisent l'opération de stabilisation.

Les essais de stabilisation par l'ajout de chaux réalisés sur un sol reconstitué nous permettent de tirer un certain nombre de conclusions qu'on synthétise dans ce qui suit :

Dans la première partie de l'étude on a discuté les taux singuliers en chaux que l'ingénieur projeteur pourrait déterminer pour guider l'opération de conception. On a étudié trois taux : le taux de fixation, la demande en chaux et le taux optimal.

✓ **Le taux de fixation en chaux**

On a montré que la limite de plasticité augmente en fonction de l'accroissement du pourcentage de chaux jusqu'à un pourcentage de 2 à 3% et se stabilise au delà de ces valeurs. Le taux de fixation en chaux est considéré représenter la quantité de chaux requise pour opérer les réactions à court-terme (assèchement, échange cationique donc agglomération des particules ...) à la base des modifications immédiates qui s'opèrent dans le sol traité. L'ajout de chaux au sol fournit un excès de cations multivalents de calcium qui tendent à remplacer des cations tels que le sodium et le potassium (échange des cations). Ce qui produit une diminution de la taille de la couche d'eau diffuse entourant les particules argileuses et autorise un meilleur contact entre elles. Elles s'agglomèrent et leurs tailles augmentent (la floculation et l'agglomération). Ceci transforme le sol argileux humide en un matériau silteux ou sableux, il passe d'un état plastique à un état solide, friable, perd une partie de sa sensibilité à l'eau et devient maniable. Ces transformations permettent de prolonger la période des travaux sur toute l'année au lieu que ça soit uniquement durant les saisons sèches.

✓ **Le taux de demande en chaux**

La deuxième méthode est basée sur la méthode d'Eades et Grim, qui consiste à déterminer le pH des mélanges sol-chaux-eau à différents taux de chaux et fixer le taux qui correspond au pH de 12,4 comme taux de demande en chaux. L'augmentation du pH du mélange sol-chaux-eau provoque la dissolution des silicates et aluminates ce qui permet la possibilité du développement de la réaction pouzzolanique et par conséquent la stabilisation du sol. Le mélange à 5% de chaux atteint le pH de chaux 12,65, ce qui le présente comme le taux de demande en chaux du sol.

✓ **Le taux optimal en chaux**

Comparativement au taux optimal en ciment du béton pour lequel le matériau atteint la meilleure amélioration et au-delà duquel cette amélioration diminue, un taux optimal en chaux n'a pas pu être mis en évidence dans ce travail pour le sol testé. On a trouvé que la résistance du sol stabilisé continue à augmenter jusqu'à des teneurs en chaux très importantes (22%).

Les résultats de cette étude permettent de retenir que le taux de fixation (2 à 3%) est le taux à adopter lorsque la modification est recherchée. Le taux de demande en chaux représente le taux minimal qui doit être considéré lorsque la stabilisation, donc l'amélioration de la résistance, est demandée. Le taux optimal en chaux n'est pas à rechercher pour des considérations pratiques.

Le deuxième volet de cette étude est l'analyse de l'effet de l'ajout de chaux sur les caractéristiques géotechniques du sol à court et à long terme.

On a montré qu'une addition de 3% de chaux est suffisante pour avoir une modification de la plasticité à court terme. A long terme, on a observé que la limite de liquidité semble plutôt augmenter avec l'augmentation des teneurs en chaux dans le temps.

On sait que la floculation des particules qui se base sur des effets de nature physico-chimique, permet de réduire la plasticité du sol (diminution de la limite de liquidité et une augmentation de la limite de plasticité).

L'augmentation de la limite de liquidité à long terme pourrait suggérer la disparition d'une partie de cette floculation. La quasi-constance de la limite de plasticité dans le temps ne permet cependant pas de retenir cette explication.

Il semble que les phénomènes qui interviennent dans la réaction sol-chaux ne soient pas uniquement de nature physico-chimique qui sont normalement réversibles mais peuvent être d'une nature chimique puisqu'ils sont irréversibles.

Les résultats de la plasticité à long terme semblent indiquer que la nature de la réaction sol-chaux est beaucoup plus complexe.

On a suggéré dans cette étude que l'augmentation de la limite de liquidité soit le résultat de la présence des gels de C-S-H (C-A-H ou C-A-S-H) qui se forment et qui participent à fixer des quantités importantes d'eau à cause de leur structure poreuse.

On a montré que l'addition de la chaux change rapidement la texture du sol et réduit sa sensibilité à l'eau. Ce résultat est mis en évidence ici dans les caractéristiques de compactage et dans la nature changeante de la distribution granulométrique du sol, ainsi que dans la perméabilité.

L'analyse de l'effet du temps sur la distribution granulométrique du sol stabilisé à 5% de chaux, a révélé que tout d'abord le déplacement des courbes vers la gauche indique que la texture du sol stabilisé change et que les fines particules argileuses floculent pour former des agglomérats plus stables. On remarque aussi que ces changements sont durables, irréversibles

et non modifiables. Il est aussi important de noter que les courbes granulométriques dans la région des gros sables des sols traités présentent des pentes plus importantes que celles du sol non traité, ce qui dénote que le sol traité présente une granulométrie moins étalée que le sol non traité donc une plus grande perméabilité, une plus grande porosité et une moindre densité du compactage.

La perméabilité de sol non traité augmente avec l'augmentation du pourcentage de chaux ajoutée à court terme. Cette modification de la perméabilité est due essentiellement à la capacité d'échange cationique et à la floculation. L'ajout de chaux provoque immédiatement l'agglomération des fines particules argileuses en grumeaux stables (tels que trouvés dans la granulométrie) qui s'explique par la formation des ponts $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CaOH^+ entre les feuillets d'argile, ces agglomérations ont un aspect plus sableux que les grumeaux du sol non traité ce qui augmente la porosité et par conséquent la perméabilité.

On a trouvé aussi que la perméabilité de sol diminue avec l'augmentation de temps de conservation. Cette diminution est attribuée à la formation des agents de cimentation (Le silicate/aluminate de calcium C-S-H et C-A-H), mis en évidence par l'analyse diffractométrique (figure 4.31), due à la réaction pouzzolanique les silices de calcium hydratées et les alumines de calcium hydratées qui précipitent d'abord sous forme de gel pour bien enrober les particules du sol, et former une liaison, qui se cristallise finalement en silicate/aluminate de calcium hydratés pour remplir les vides inter-particules, avec le temps de cure. Le durcissement graduel du gel affecte considérablement la porosité et par conséquent la perméabilité du sol qui diminue.

Le changement de la structure du sol traité est aussi accompagné d'une amélioration de la compressibilité du sol à court et à long terme. En effet, l'étude de l'action de la chaux sur la compressibilité du sol montre que l'apport de la chaux change le comportement du sol, d'un comportement de sol compressible à celui d'un sol moins compressible (plus en plus raide). Les coefficients de compressibilité et de recompressibilité diminuent avec le temps de cure.

On s'est intéressé à l'étude du développement de la résistance à la compression simple à court terme et à long terme.

La résistance mécanique du sol augmente avec l'augmentation du pourcentage de chaux injecté. De plus, la résistance mécanique continue à augmenter, avec le temps de cure, le sol passe d'un état de consistance molle à une consistance ferme puis franchement raide.

L'analyse des courbes contraintes déformations montre que le sol non traité présente une résistance faible avec une courbe de résistance à palier indiquant un comportement franchement plastique. L'ajout de chaux augmente la résistance à la compression et diminue la déformation axiale à la rupture avec apparition d'un pic indiquant l'apparition de la fragilité qui augmente avec le dosage en chaux.

On a pu montrer que la résistance du sol stabilisé continue à augmenter de manière importante au-delà de 28 jours.

Contrairement au cas du béton dont la résistance à 28 jours représente une valeur de résistance nominale qui peut servir de donnée de projet, la résistance à 28 jours du sol stabilisé à la chaux ne peut pas être considérée comme telle.

La réaction sol-chaux est considérablement plus lente que celle du ciment. Une valeur nominale pour la résistance devrait être recherchée bien au-delà de 28 jours.

L'obtention accélérée de cette résistance pourrait être matérialisée en testant le sol stabilisé à haute température.

La diffraction aux rayons X des mélanges sol-chaux après 28 jours de cure montre la formation de nouvelles espèces minérales (phases cristallines) résultant du traitement à la chaux, sur le spectre du sol traité à 7 % de chaux, on a pu distinguer nettement la présence de raies correspondant aux aluminates de calcium hydratés (C-A-H) et aux silicates de calcium hydratés (C-S-H). Ces raies sont de très faibles intensités dans les spectres à 5% de chaux.

On pu trouver une concordance logique entre les résultats d'identification ou caractéristiques physiques des sols stabilisés (plasticité, granulométrie et pH-mètre) et leur caractéristiques mécaniques (perméabilité, compressibilité et résistance) observées à court et à long terme.

Au terme de ce travail on peut conclure que les mécanismes à la base de la réaction sol-chaux restent à nos jours méconnus malgré le succès que connaît la pratique de stabilisation à la chaux. On a tenté d'étudier ici les mécanismes qui ont lieu dans la réaction sol-chaux sur la base des effets géotechniques tels que la plasticité, le gonflement, la perméabilité, la résistance etc...mais il est évident que des efforts de recherche sont encore nécessaires pour mieux comprendre ces mécanismes et optimiser la méthode de stabilisation des sols à la chaux. Une étude chimique approfondie avec des moyens d'analyse performants tels que les rayons X et l'observation au microscope à balayage permettra sans doute une meilleure explication de la nature de la réaction sol-chaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Afès M et G. Didier, 2000, *Stabilisation des sols gonflants: cas d'une argile en provenance de Mila (Algérie)*, Bull Eng Geol Env 59 : 75–83 7.
2. Al-Rawas A.A, Hago A.W, Hilal Al-Sarmi, 2005, *Effect of lime, cement and sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman*, Building and Environment 40 (2005) 681–687.
3. Amu O.O, Obafemi Awolowo, 2005, *Effects of Lime Stabilization on the pH Values of Lateritic Soils in Ado-Ekiti, Nigeria*, Journal of Applied Sciences 5 (1): 192-194, ISSN 1607-8926, Asian Network for Scientific Information, Department of Civil Engineering, Nigeria.
4. Aissiou F.Z, A. Nechnech, *Amélioration des caractéristiques mécaniques d'un sol argileux par incorporation de chaux*, SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.
5. Arabani M et M. Veis Karami, 2005, *Ceomechanical properties of lime stabilized clayey sands*, the Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 32, Number 1B, IRAN Paper Received 14 September 2004; Revised 16 March 2005; Accepted 17 May 2006.
6. ASTM C 977 – 00, *Standard Specification for Quicklime and Hydrated Lime for Soil Stabilization I*, agencies of the Department of Defense.
7. ASTM D 6276-99a, *Standard Test Method for using pH to estimate the Soil-Lime proportion requirement for soil stabilization*.
8. ASTM D 2166 – 98a, *Standard Test Methods for unconfined compressive strength of cohesive soil*, 1998.
9. ASTM D 5102 – 96, *Standard Test Methods for unconfined compressive strength of compacted soil-lime mixtures*, 1996.
10. ASTM D 3551 – 90 (Reapproved 1996) *Standard practices for laboratory preparation of soil-lime mixtures using a mechanical mixer*, 1996.
11. ASTM D 4972 – 95a, *Standard Test Methods for pH of soils*, 1995.
12. Bell F.G, *Lime stabilization of clay minerals and soils*, Department of Geology and Applied Geology, South Africa Received 12 April 1995; accepted 19 January 1996, Engineering Geology 42 (1996) 223-237.

13. Bensalem Ahmed, 2010, *Caractérisation et exploitation de l'argile Benmaazouz dans la construction routière*, thèse magister, Université d'Annaba.
14. Benjamin Michael Cote A, 2009, *Performance Comparison of Mechanical and Chemical Stabilization of Undercut Sub grades*, thesis for the degree of Master of Science Civil Engineering Raleigh, University of North Carolina.
15. Ben amor K, M.Temimi, J.P.Camps, M.Lasuerbe, *Stabilisation à froid de matériaux montorillonitiques par du ciment portland*, materials and structures/ matériaux et constructions, vol.30 (1997); pp355-361, (1997).
16. Beng Paul Quigley, Ceng, Miei , Mice, FGS IGSL Ltd, *16th February 2006, Modification / Stabilisation of Low Strength Cohesive Soils under Foundations and Floor Slabs*, Paper presented to the Geotechnical Society of Ireland (GSI) at the Institution of Engineers of Ireland, 22 Clyde Road, Dublin 4.
17. Beng Paul Quigley, 2006, *Modification-stabilization of low strength cohesive soils under foundations and floor slabs*, Ireland.
18. Bujang B.K. Huat, Asmidar Alias and Azlan Abdul Aziz, *Evaluation, selection and assessment of guidelines for chemical stabilization of tropical residual soils*, American journal of environmental sciences 4 (4): 303-309, (2008).
19. Braja M. Das, 1965, *Advanced soil mechanics*, livre.
20. Berga Abdelmadjid, 2003, *Eléments de mécanique des sols*, Livre de mécanique des sols, Université de Bécher.
21. Cabane Nicolas, 2004, *Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation*, thèse doctorat de l'Université Jean Monnet et de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de St-Etienne, Génie des Procédés.
22. Clare K. E, 1988, Laboratory experiments in the stabilization of clays with hydrated lime, USA.
23. Choquette Marc, 1988, *La stabilisation à la chaux des sols argileux du Québec*, thèse numéro 8336, Québec.
24. Centre de recherches routières, Guide pratique 1, *Amélioration des sols pour le remblayage des tranchées d'égouts et l'enrobage des tuyaux*, Complément au Code de bonne pratique R 74/04, 2004.
25. Centre de recherches routières, Guide pratique 2, *Stabilisation des sols pour couches de sous-fondation*, 2004.

26. Centre de recherches routières, Guide pratique 3, *Amélioration des sols pour terrassements et fond de coffre*, 2004.
27. Dallas. N. Little, ERIC H. Males, JAN R. Prusinski, BARRY Stewart, 1999, *Cementitious Stabilization*, Committee On Cementitious Stabilization, Chairman: Roger K. Seals, Louisiana State, TRB.
28. Dave S.P, Gandhi G.N, IGC: 17-19 December 2005, *Effect of salt on CBR value of lime treated soil*, Applied Mechanics Department, L.D.College of Engineering, Ahmedabad, INDIA.
29. Department of the army, the navy, and the air force, 1994, *Soil stabilization for pavements*, USA.
30. Document édité par LCPC et CETRA, *Etude et réalisation des remblais sur sols compressibles*, GUIDE TECHNIQUE (2000).
31. Document édité par : LCPC et CETRA, *Traitement des sols à la chaux et/ou liants hydrauliques application à la réalisation des remblais et des couches de forme*, GUIDE TECHNIQUE, (2000).
32. Dupraz J, M. Zohry, 2006, *Apports de la technique de traitement de sols argileux et limoneux à la chaux*, Entreprise MEDINGER et FILS, France, LAFARGE CHAUX, MAROC.
33. Diop Mouhamadou Bassir, Abdoulaye Boiro, Raoul Jauberthie, Ahmed Bouguerra, 2008, *Traitement à la chaux des tufs volcaniques du Sénégal oriental Activation de la réaction pouzzolanique par du phosphogypse*, revue francophone d'écologie industrielle n° 49 reproduction interdite.
34. Diop M. B, A. Bouguerra, R. Jauberthie, A. Boiro & M. Gomina, W. Soboyejo, TREMTI 2005, *Comportement des tufs volcaniques du Sénégal oriental au traitement à la chaux et au ciment*, Communication C164, Équipe Structure et Comportement Thermomécanique des Matériaux, Laboratoire CRISMAT, UMR CNRS 6508, ENSCAEN, Bd du Maréchal Juin, France.
35. ELShrief A. M and Soumaya Ahmed Mohamed, july 2000, *Technical and economical viability of lime stabilization of expansive soils for road construction in Sudan*, Sudan engineering society journal, 47 no 38.
36. Evans Peter Man, 1997, Update on lime stabilization, Paper presented at QMR Technology Transfer Seminar, 12 July.
37. Gaombalet Jérôme, 2004, le gonflement des argiles et ses effets sur les ouvrages souterrains de stockage, thèse doctorat de l'école polytechnique.

38. Gueridi Fatima, 2009, *Stabilisation des sols à la chaux : Détermination du taux optimal* mémoire de magister délivrée par l'école nationale supérieure des travaux publics – Alger.
39. Geiman Christopher M, May 10 2005, *Stabilization of soft clay sub grades in Virginia phase I laboratory study*, thèse master, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Virginia.
40. Holtz R. D et W. A Kovacs, 1981, *An introduction to geotechnical engineering*, New jersey, USA.
41. Kassim Khairul anuar b et Mustafa kamal b. Shamshuddin, 2003, *lime stabilization for marginal sub grade as capping layer for road construction*, Université de Malaysia, Research vote n° 71382.
42. LCPC GTR, Mars – Avril 2001, *Contrôle des travaux de traitement des sols*, Bulletin des labos des ponts et chaussée 231, Réf 4363 pp 33-38.
43. Lazzali Farah, 1997, *Contribution à l'étude de la stabilisation d'un sol gonflant (bentonite) par apport de la chaux*, thèse magister, USTHB.
44. Lasledj Abdelmadjid, 2009, *Traitement des sols argileux à la chaux : processus physico-chimique et propriétés géotechniques*, thèse de doctorat délivrée par l'Université d'Orléans, École Doctorale Sciences et Technologies, Centre de Recherche sur la Matière Divisée.
45. Mooney Michael A., Nathan M. Toohey, January 2010, *Accelerated curing and strength modulus correlation for Lime-Stabilized soils*, Final Report n° CDOT-2010-1.
46. Mouissat Mounir, 2010, Etude et amélioration des propriétés de l'argile Hammam Debbagh par ajout de liants, thèse magister, Université d'Annaba.
47. Milburn Justin P, Robert L. Parsons, May 2004, *Performance of soil stabilization agents*, Final Report on Research Sponsored By: THE KANSAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION TOPEKA, KANSAS, University of Kansas.
48. NLA, 2004, *Lime-treated soil construction manual lime stabilization & lime modification*, USA.
49. National Lime Association (NLA), June 2004, *Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design*, Division of applied research associates, Inc.
50. National Lime Association (NLA), 2001, *Using lime for soil stabilization and modification*, USA.

51. Puiatti Daniel, March 20th, 2006, *Lime Stabilization*, course PowerPoint.
52. Robitaille Vineent, Denis tremblay, *Mécanique des sols, théorie et pratique*, (1997).
53. Rogers C.D.F, *Lime stabilization*, UK, 1996. Tonoz M.C, C. Gokceoglu, R Ulusay, 2003, *A laboratory-scale experimental investigation on the performance of lime columns in expansive Ankara (Turkey) Clay*, Bulletin Eng Geol Env 62: 91–106.
54. Rao Sudhakar M. and P. Shivananda, 2005, *Compressibility behaviour of lime-stabilized clay*, Indian Institute of Science, Bangalore, India, (Received 6 September 2002; revised 8 September 2003; accepted 24 February 2004). Geotechnical and Geological Engineering (2005) 23: 309–319.
55. Sakr Mohamed A., Mohamed A. Shahin, Yasser M. Metwally, 2009, Utilization of lime for stabilizing soft clay, soil of high organic content, Geotech Geol Eng.
56. Sanglerat. G. Costet. J, 1981, *Cours pratique de mécanique des sols*, livre.
57. SN 640 503 a, Norme Enregistrée de l'Association Suisse de Normalisation, 1987, *Stabilisation à la chaux aérienne*, union des professionnels suisses de la route VSS Zurich.
58. Thompson Marshall R., 2005, Admixture Stabilization (Lime Treatment of Subgrades), University of Illinois, Dept of Civil & Environmental Engineering, TN14, USA.
59. Venkatramaiah. C, 2006, *Geotechnical engineering revised third edition*, new age international publishers. Tirupati, Inde.
60. Yunus N. Z., 2007, *Stabilization of organic clay using lime- added salt*, thèse master, Faculty of Civil Engineering, Université de Malaysia.