REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES TRAVAUX PUBLICS – ALGER
DIRECTION POST-GRADUATION ET RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Mémoire présenté pour obtenir le diplôme de
Magister en Génie Civil
Spécialité : Matériaux et Structures

Stabilisation des sols à la chaux :

Détermination du taux optimal

Présenté par :
GUERIDI Fatima
Ingénieur d'Etat en Génie Civil
Diplômée de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger

Soutenu publiquement le 08/12/09 devant le jury composé de :

Président	Taki Mohamed	Maitre de Conférences	ENSTP
Rapporteur	Derriche Zohra	Professeur	ENSTP
Examinateurs	Guettache Brahim	Maitre de Conférences	ENSTP
	Merdoud Meriem	Maitre de Conférences	ENSTP
	Haddadi Smail	Maitre de Conférences	USTHB
Invité	Djidjeli Zahir	Directeur Central	MTP

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics – ENSTP
Rue Sidi Garidi – Vieux Kouba – Alger

Dédicaces

A ma famille

A mes chèrs parents que Dieu les protège

Fatima

Remerciements

Mes remerciements vont tout droit au Professeur Zohra Derriche, ma directrice de mémoire pour son encadrement, son suivi minutieux, ses conseils et ses orientations. Je ne la remercierai jamais assez de m'avoir permis d'accomplir ce travail sous sa direction et bénéficier de son expérience et ses larges compétences.

Je tiens également à remercier les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont accordé à mon travail en acceptant de l'évaluer et d'enrichir le débat le jour de la soutenance.

Je n'oublie pas de remercier les responsables et le personnel du laboratoire de l'Habitat et de la Construction du Centre (LHCC) de Oued Smar de m'avoir accueillie et permis d'effectuer mon programme expérimental.

Je suis redevable aux ingénieurs et techniciens du LHCC pour leur sympathique appui, avec une mention très particulière à Zahra Touami et Samira Zait pour leur précieuse aide.

Je tiens tout autant à remercier madame Seksaoui du laboratoire de Chimie à l'ENSTP pour sa sollicitude ainsi que Ammi Bahim (Saidi) pour son aide et Mr. Boudjlida pour sa disponibilité au laboratoire de mécanique des sols.

Un grand merci aux Entreprises BENTAL et GRANITEX pour les matériaux fournis gracieusement (bentonite et chaux).

Merci à mes collègues responsables de l'ITTPB (directrice, chefs de service, chef de filière) pour leur compréhension et encouragements pendant la réalisation du mémoire.

J'exprime ma gratitude et ma reconnaissance aux collègues de l'ITTPB qui m'ont aidée et soutenue, en particulier mesdames Dalila El Haddad, Souad Medjahed et Salima Ait El Hocine.

Je remercie toute ma famille élargie pour son soutien et ses encouragements de tous les instants.

Enfin que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, trouvent ici, l'expression de ma profonde reconnaissance.

العنوان : معالجة التربة بالجير : تعيين النسبة المثلى

ملخص

إن مشكلة تحديد المزيج الأمثل للجير المستخدم لتثبيت التربة، والذي يضمن تحسين الأداء الميكانيكي للتربة واستدامتها لا تزال قائمة حتى يومنا هذا. العديد من الطرق الغير المباشرة قد اقترحت لهذا الغرض. نقيم في هذا العمل ، اثنين من هذه الأساليب. تعتمد الأولى على أساس اللدونة و تعطي النسبة التي تحدث أقصى تخفيض في اللدونة. تعرف هذه النسبة بنسبة تثبيت الجير في التربة. وتستند الطريقة الثانية على الرقم الهدروجيني للمزيج التربة و الجير، وتعطي نسبة الجير التي توافق الرقم الهدروجيني 12.4 وتضمن طلب التربة للجير. و نستعمل نتائج تجربة أخرى لتقييم النتائج المحصل عليها بالطريقتين السابقتين. وأكدت النتائج أنه على الرغم من أن الطريقتين المدروستين لا تحدد نسبة المزيج الأمثل ، فإنها أكدت أن نسبة تثبيت الجير تنتج الآثار المباشرة التي تحدث تحسينا في خصائص التربة المعالجة كما أن نسبة طلب الجير تعطي الحد الأدنى المطلوب للحفاظ على بيئة قلوية قادرة على تقديم السيليكات و ألومينات اللازمة لإحداث التفاعل البوزولاني لتثبيت التربة.

ونخلص إلى أن التصميم الأمثل لنسبة الجير ينبغي أن يأخذ في الاعتبار جميع العناصر التي تساهم في تحقيق التفاعل البوزولاني وهي التربة، الجير، الماء والماء اللازم للتمييه و الرص في الميدان و كذلك شروط الوسط و البيئة (درجة الحرارة و التقلبات المناخية...).

Titre : Stabilisation des sols à la chaux : Détermination du taux optimal

Résumé

Le problème de la détermination du dosage optimal en chaux à utiliser pour stabiliser un sol, celui qui assure l'amélioration des performances mécaniques du sol et leur durabilité demeure posé jusqu'à nos jours. Plusieurs méthodes indirectes ont été proposées à cet effet. On évalue dans ce travail, deux de ces méthodes. La première, basée sur la plasticité, donne le taux produisant la réduction maximum de la plasticité. Ce taux est défini comme le taux de fixation de chaux du sol. La deuxième méthode basée sur le pH des sols traités, donne le taux de chaux réalisant le pH de 12.4 et qui assure la demande en chaux du sol. On a utilisé les résultats d'un programme expérimental pour apprécier l'apport des deux autres méthodes. Les résultats obtenus ont confirmé que même si les deux méthodes étudiées ne permettent pas de déterminer le taux optimal recherché, il a été confirmé que le taux de fixation de chaux produit des effets immédiats qui réalisent la modification du sol traité et que le pourcentage de demande en chaux produit le taux minimum requis pour maintenir un milieu alcalin capable de fournir les silicates et aluminates pour assurer les réactions pouzzolaniques du sol stabilisé.

On conclut que la conception du taux de chaux optimal doit prendre en considération tous les éléments qui participent à la réaction pouzzolanique notamment le sol, la chaux, la température et l'eau nécessaire pour l'hydratation et pour le compactage sur le terrain ainsi que les conditions environnementales.

Title: Lime soil stabilization : Design of the optimum lime content

Abstract

The determination of the optimal lime percentage which ensures that the improvement of the soil mechanical performance and its durability remains posed until nowadays. Several indirect methods were proposed for this purpose. We evaluate in this work, two of these methods. The first, based on plasticity, gives the rate producing the maximum reduction of plasticity. This rate is defined as the lime fixation percentage of the soil. The second method, based on the pH of the treated soil, gives the lime rate corresponding to a pH of 12.4 and which ensures the lime demand percentage. We use the results of an experimental program to appreciate the contribution of the two studied methods. The results obtained confirmed that even if the two studied methods do not give the required optimal rate, it was confirmed that the lime fixation rate produces immediate effects which carry out the modification of the treated soil and the lime demand percentage produces the minimum rate required to maintain an alkaline environment able to provide silicates and aluminates dissolution to ensure the pozzolanic reactions of the stabilized soil.

It is concluded that the design of the optimal lime rate must take into account all the elements which take part in the pozzolanic reaction in particular the ground, lime, the temperature and the water necessary for the hydration and the compaction on the soil as well as the environmental conditions.

Liste des figures

		Page
Figure II.1	Développement du réseau routier National.	6
Figure II.2	Exemple de mauvais sol à traiter.	8
Figure II.3	Exemple de traitement de sol à la chaux.	16
Figure II.4	Organigramme du choix de la méthode de stabilisation appropriée.	18
Figure III.1	Exemples de courbes d'hydratation (Ahnberg et Pihl, 1997).	21
Figure III.2	Formation d'une couche d'eau diffuse autour des particules d'argile (d'après Little, 1987).	24
Figure III.3	Changement de texture des sols traités à la chaux.	25
Figure III.4	Courbe de solubilité des silicates et aluminates	26
Figure III.5	Perte de la réactivité de la chaux.	28
Figure III.6	Variation des limites de consistance du sol traité avec le taux de chaux (TRB, 1987).	32
Figure III.7	Caractéristiques du compactage d'un sol traité à la chaux (Little, 1995).	33
Figure III.8	Courbe contrainte - déformation d'un sol stabilisé à la chaux à différents temps de cure (en jours) (Little, 1995).	35
Figure III.9	Relation gonflement - indice de plasticité (d'après Little, 1995).	36
Figure III.10	Pression de Gonflement – Ajout chaux (d'après TRB, 1987).	36
Figure III.11	Augmentation du CBR immédiat avec la chaux.	38
Figure IV.1	Courbes granulométriques des matériaux utilisés.	45
Figure IV.2	Classification des matériaux, abaque de Casagrande.	47
Figure IV.3	Procédure de détermination du pH des solutions – méthode de Eades- Grim.	48
Figure IV.4	Détermination du pH des solutions de sol – chaux selon la méthode de Eads & Grim.	50
Figure IV.5	Photos montrant détails préparation des éprouvettes pour l'essai compression simple.	51
Figure IV.6	Schématisation de la procédure de mesure du GLS.	53
Figure V.1	Variation des limites de consistance en fonction du taux de chaux.	57

Figure V.2	Variation du PH des mélanges en fonction du taux de chaux.	59
Figure V.3	Variation de la résistance en fonction du taux de chaux et du temps.	60
Figure V.4	Courbes Contrainte – Déformation pour différents taux de chaux.	61
Figure V.5	Variation contrainte-déformation avec le temps à 10% de chaux.	62
Figure V.6	Variation de la résistance en compression des mélanges avec le temps de cure	63
Figure V.7	Courbes Proctor des mélanges à taux de chaux différents.	64
Figure V.8	Variation du potentiel de gonflement avec le taux de chaux à 28 jours de cure.	65
Figure V.9	Variation du potentiel de gonflement avec le taux de chaux et le temps de cure.	66
Figure V.10	Courbes Proctor Modifié des mélanges à des taux de chaux différents.	67
Figure V.11	Variation de l'Indice CBR immediat avec l'ajout de chaux.	68
Figure V.12	Distribution des tailles des particules en fonction du taux de chaux.	69
Figure V.13	Cinétique de sédimentation du sol à différents taux de chaux.	70
Figure V.14	Taux de GLS du sol pour différents taux de chaux.	71
Figure V.15	Influence du temps d'attente sur les caractéristiques du compactage.	74
Figure VI.1	Exemple de changement de distribution de tailles des particules.	77
Figure VI.2	Variation de la plasticité dans le temps	78
Figure VI.3	Variation de la surface spécifique avec le temps.	78
Figure VI.4	Résultats diffractométrie aux rayons X. Al Mukhtar et al. (2008)	85

Liste des tableaux

		Page
Tableau III.1	propriétés de la chaux (NLA, 1988)	23
Tableau IV.1	Composition chimique du sol naturel	44
Tableau IV.2	Composition chimique de la bentonite	46
Tableau IV.3	Propriétés de la chaux utilisée	46
Tableau IV.4	Synthèse des essais effectués	56
Tableau V.1	Distribution des tailles des particules pour des différents taux de chaux	69
Tableau V.2	effet du temps d'attente sur les limites de consistance du sol stabilisé	73
Tableau V.3	caractéristiques du compactage en fonction du temps d'attente	73
Tableau VI.I :	Limites de consistance d'un sol traité à la chaux à différents temps de cure	79

Table des matières

Chapitre I : Introduction 1

Partie I. Analyse bibliographique 1

Chapitre II. Méthodes de stabilisation chimique des sols

1. Introduction 5

2. Techniques de stabilisation 7

2.1 Stabilisation par ajout de matériaux inertes 7

2.2 Stabilisation chimique des sols 8

2.2.1 Liants organiques 9

2.2.2. Les liants hydrauliques 13

3. Sélection du mode de traitement 17

Chapitre III : Stabilisation des sols à la chaux 19

1. Introduction 19

2. Présentation de la chaux 20

3. Mécanismes de réactions sol - chaux 22

3.1 Réactions immédiates 24

3.2 Réactions pouzzolaniques 25

3.3. Carbonatation 27

4. Choix des sols pour stabilisation à la chaux 28

5. Effets du traitement des sols à la chaux 28

5. 1 Effets immédiats (modification des sols) 29

6. Observations sur le développement de la résistance 37

6.1. La rigidité 39

6.2. La fatigue 39

6.3. La durabilité 39

6.4. Le module de Young ou module d'élasticité 40

6.5. La perméabilité 40

Partie II : Etude expérimentale et analyse des résultats

Chapitre IV : Matériaux et méthodes 42

2. Programme expérimental 43

3. Matériaux utilisés 44

3.1. Sol naturel 44

3.2. La bentonite 45

3.3. La chaux 46

3.4. Le sol reconstitué 47

4. Procédures et essais 47

4.1 Détermination du taux de fixation de la chaux 48

4.2 Détermination du taux de demande en chaux par la méthode du pH-mètre 49

4.3 Détermination du taux de demande en chaux par la méthode de la résistance en compression simple à 28jours (RCS) 50

5. Mise en évidence des effets immédiats dans la structure 52

6. Etude de l'effet du temps d'attente sur l'état du sol stabilisé 53

7. Etude des effets de la chaux sur quelques caractéristiques du sol stabilisé 54

8. Synthèse du programme expérimental 55

Chapitre V : Présentation et Interprétation des résultats 57

1. Détermination du taux de chaux optimal 57

1.1 Détermination du pourcentage de fixation de chaux (lime fixation percentage) 57

1.2 Détermination de la demande en chaux du sol (lime demand) 58

1.2 .1 Par la méthode du pH-mètre (Eades et Grim) 58

1.2.2 Par la méthode basée sur la résistance en compression simple à 28 jours 59

2. Effets de la stabilisation à la chaux sur d'autres caractéristiques du sol Stabilisé. 63

3. Mise en évidence des effets immédiats sur la qualité du sol 68

4. Etude de l'effet du temps d'attente sur l'état du sol stabilisé 72

Chapitre VI : Discussion et Conclusion 75

1. Discussion 75

2. Conclusion générale 86

Références Bibliographiques 89

Chapitre I

Introduction

La construction des routes consomme des quantités impressionnantes de matériaux. Très souvent, lorsque les sols supports de chaussées sont inadéquats pour supporter les charges du trafic, ils doivent être remplacés par des matériaux plus performants qui doivent être déplacés d'ailleurs. Le sol local est alors excavé et simplement mis en décharge.

Cette pratique est contraire à l'essence même de la construction durable qui prohibe le gaspillage et préconise la valorisation des matériaux locaux qui permet de limiter l'utilisation des matériaux naturels nobles épuisables. Une alternative à l'utilisation de ces matériaux nobles en remblai, en couche de forme ou en couche d'assises de chaussées, réside dans l'amélioration et la stabilisation des sols présents sur place. Cette alternative permet :

- Une utilisation réduite des matériaux nobles,
- Un transport limité,
- Une suppression des coûts de déchargement pour les terres déblayées et par conséquent, un respect de l'environnement. Dans certains pays, la mise en décharge des remblais est sérieusement taxée, ce qui augmente le prix de revient de l'ouvrage.

Parmi les techniques de valorisation les plus utilisées, la stabilisation des sols à la chaux se présente comme une méthode très économique et simple. C'est une technique très ancienne qui a été utilisée depuis les romains. C'est durant les années 1930, que la chaux a connu une vaste utilisation dans les projets de stabilisation des matériaux supports de chaussées aux Etats-Unis.

Depuis, plusieurs projets de grande envergure ont utilisé la chaux avec succès.

Après un léger essoufflement de son utilisation dans les années 1970, on assiste cette dernière décennie à un regain de popularité de la chaux, tiré justement par la consécration des principes du développement durable dans les pays occidentaux.

Il est important de noter que de nos jours, la réalisation des routes consomme plus de 2 millions de tonnes de chaux tous les ans, soit dans la construction de nouvelles chaussées ou dans l'entretien et la maintenance de chaussées existantes. Il est même attendu que la chaux connaisse une plus large utilisation dans la construction des routes au vu du grand développement de la recherche appliquée et des efforts de vulgarisation des méthodes de stabilisation utilisant ce matériau.

La chaux est largement utilisée dans l'assèchement des sols, la stabilisation de sol supports et des couches de chaussée, dans la construction des pistes d'aviation, des aires de stationnement et dans d'autres secteurs de construction et de réhabilitation.

Elle est également utilisée dans la stabilisation des remblais sous chaussées routières ou ferroviaires. Les talus naturels sont traités à la chaux pour augmenter leur résistance au cisaillement et à l'érosion par l'eau.

Dans le cas des structures légères, la chaux peut être appliquée immédiatement sous les fondations. Alternativement, le traitement à la chaux peut être utilisé pour former un mur vertical sur les fondations pour minimiser les mouvements de l'eau.

Dans toutes ces applications, la chaux est utilisée sous plusieurs formes, en poudre ou sous forme liquide, seule ou mélangée à d'autres additifs.

L'insertion de pieux de chaux dans le sol à traiter est une technique simple à réaliser qui ne nécessite ni grands efforts ni équipements spéciaux. Les pieux de chaux sont enterrés dans le sol à traiter et sont arrosés d'eau pour assurer la diffusion de la chaux dans le sol et permettre l'amélioration de ses propriétés mécaniques

Les pieux de sol stabilisé sont aussi très utilisés en Suède (Janz, Johansson, 2002)..

L'injection des coulis de chaux sous pression a été utilisée pour le traitement des argiles expansives dans le but de réduire leur potentiel de changement de volume et d'améliorer la capacité portante des argiles silteuses. L'injection permet aussi de minimiser les tassements différentiels sous les structures et réduire l'érosion des argiles hautement plastiques. La chaux est utilisée pour stabiliser les pentes des remblais et dans la reprise en sous œuvre pour traiter les problèmes d'instabilité des sols sous des structures existantes.

Les drains de chaux peuvent être installés in situ au moyen d'outils rotatifs enfoncés dans le sol jusqu'à la profondeur requise en quelques minutes.

Les colonnes de chaux ont été utilisées en remplacement des pieux pour fonder les constructions légères. Ces colonnes réduisent les tassements totaux et différentiels (Broms & Browen, 1979).

On cite toutes ces méthodes pour donner la mesure du potentiel que recèle la chaux dans le domaine de la construction.

Malheureusement et malgré la vaste utilisation de ce matériau, des contre-performances dans les chaussées traitées à la chaux ont été enregistrées dans le comportement à long terme de divers ouvrages routiers (Little, NLA, 1988).

Le problème de la durabilité des effets acquis par le traitement à la chaux a permis de mettre à l'index le problème récurrent de la détermination du taux optimal à utiliser pour garantir la pérennité des gains en résistance apportés par la stabilisation à la chaux. Il est difficile d'accepter qu'un procédé qui a été si largement utilisé pendant des décennies pouvait s'avérer non performant sur le terrain et devait être abandonné (Little, 1995).

Une recherche intense a été alors entreprise, mettant au centre l'étude de la durabilité de la stabilisation à la chaux. Dans ce but, la détermination du taux optimal de chaux à utiliser a été et demeure jusqu'à nos jours, la quête des chercheurs.

Plusieurs méthodes de conception de ce taux ont été proposées et testées dans plusieurs projets de par le monde. Les plus connues sont basées sur la plasticité, sur le pH des mélanges, appuyées par la performance observée sur le terrain. Pour chaque expérience, des procédures ont été décrites et des abaques ont été établis.

Ce travail tente une modeste contribution dans la problématique de la détermination du taux optimal de chaux à utiliser pour stabiliser un sol insuffisamment performant. On teste dans ce contexte deux méthodes indirectes supposées dans la littérature, permettre d'obtenir ce taux optimal recherché.

La première, basée sur la plasticité, définit le taux de fixation de chaux comme le taux produisant la réduction maximale de la plasticité. La deuxième méthode, basée sur le

milieu alcalin définit le taux de demande en chaux comme celui qui donne le pH capable de libérer le maximum de silices et d'alumines pour réaliser la réaction pouzzolanique sol - chaux.

On utilise les résultats d'un programme expérimental réalisé sur un sol stabilisé pour évaluer l'apport des deux méthodes indirectes testées.

Les résultats obtenus dans cette étude, sont discutés, comparés et confrontés aux résultats tirés de la littérature. Afin d'interpréter les résultats obtenus, d'autres effets réalisés par le traitement à la chaux sont mis en évidence. Ce qui a permis de vérifier la durabilité des effets immédiats et l'importance de l'effet du temps d'attente sur les caractéristiques du matériau compacté.

Le travail réalisé, est présenté dans un mémoire qui compte six chapitres.

Le premier chapitre comporte l'introduction qui pose la problématique adressée dans le travail et présente le travail effectué dans le mémoire.

Dans le deuxième chapitre, on analyse la stabilisation chimique des sols et les produits nouveaux qu'elle utilise. On présente quelques exemples et on cite quelques projets dans lesquels ont été utilisés ces différents produits.

Dans le troisième chapitre, on donne une présentation de la chaux, sa production, son utilisation et les effets qu'elle produit sur les sols traités.

On réserve le quatrième chapitre à la présentation du programme expérimental réalisé. On commence par présenter les matériaux utilisés. On expose ensuite les méthodes et les procédures d'essais employés et les normes suivies. Dans le cinquième chapitre, on donne les résultats obtenus et on les interprète.

Dans le sixième chapitre, on présente une discussion approfondie des résultats, sur la base de confrontations et de comparaisons entre des valeurs de différents paramètres étudiés dans ce travail et d'autres tirés de la bibliographie. On énonce quelques recommandations pour réussir le traitement des sols à la chaux.

On termine le travail par une conclusion dans laquelle on rappelle l'essentiel des résultats et on donne des propositions de prolongement de la présente recherche.

Chapitre II

Méthodes de stabilisation chimique des sols

1. Introduction

Les développements économiques, sociaux et technologiques ont été suivis par un développement fulgurant du réseau routier dans le monde. Ce réseau ne cesse d'augmenter et d'évoluer sur tous les plans pour répondre aux impératifs des économies de plus en plus croissantes, des exigences d'un parc de transport de plus en plus performant et des besoins des sociétés en perpétuelle évolution. En Algérie, par exemple le réseau routier a connu une expansion rapide en terme de réalisation de routes et d'autoroutes. Le rapport établi par le Conseil National Economique et Social (CNES, 2003) évalue le schéma directeur des infrastructures qui représente la configuration du réseau routier et autoroutier à l'horizon 2020 (figure II.1). L'ensemble des aménagements proposés pour la période 2002 - 2020 totalise un linéaire de 12075,5 km et touche plusieurs régions du pays. L'autoroute Est Ouest à elle seule s'étale sur une longueur de 1216 Km et sera livrée à l'horizon 2010. Dans le rapport l'accent est aussi particulièrement mis sur le volume des travaux d'entretien que nécessitent ces projets et les moyens financiers qu'ils demandent.

On sait que la réalisation de ces projets exige une quantité phénoménale de matériaux dits nobles qui doivent satisfaire à des conditions spécifiques de qualité pour assurer la pérennité de ces grands projets.

Sur un plan purement technique, il est connu que la performance des chaussées est attribuée principalement à la qualité de ses couches d'assises constituées du sol support et des couches de fondation et de base. Ces couches doivent fournir à la chaussée les caractéristiques suivantes

- La résistance au cisaillement : l'aptitude à résister aux contraintes de cisaillement développées suite aux chargements du trafic.
- La rigidité : l'aptitude à répondre au chargement du trafic en maintenant les déformations au minimum.

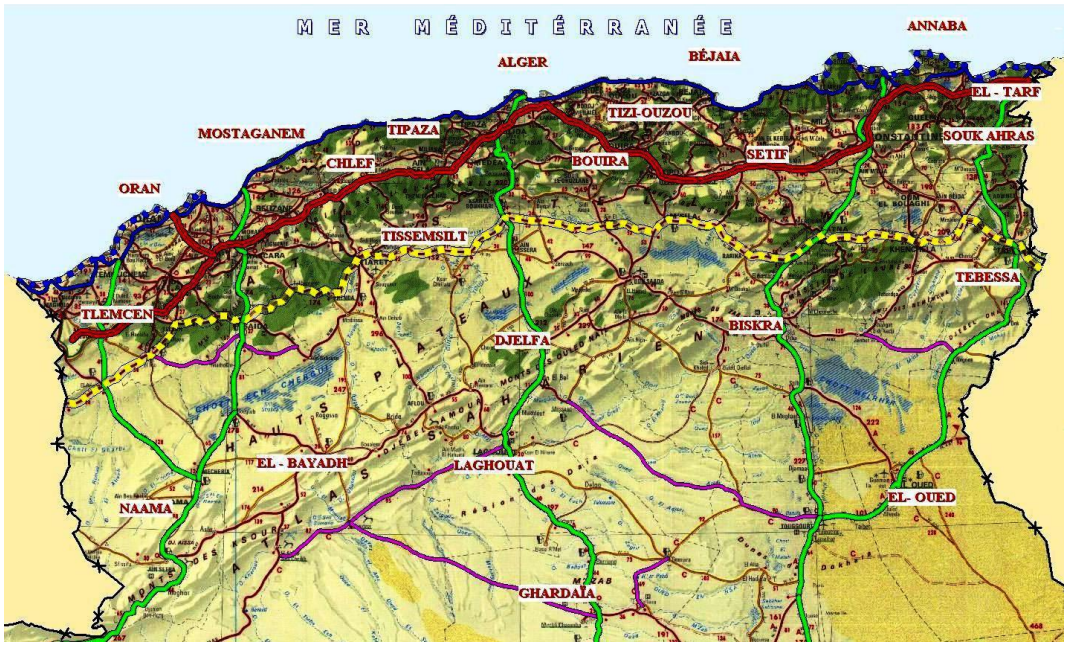


Figure II.1 : Développement du réseau routier national

- La résistance à l'humidité : l'aptitude à résister à l'absorption d'eau et à maintenir à des niveaux acceptables la résistance au cisaillement et la rigidité en réduisant le gonflement volumétrique.

- La stabilité : la capacité de conserver sa masse et son volume physiques quand elle est soumise aux charges et à l'eau.

- La durabilité : l'aptitude du matériau à conserver ses caractéristiques géotechniques à l'exposition aux conditions climatiques telles que les changements de température (problèmes de gel – dégel, séchage-humidification).

Lors de la construction des routes, on se heurte fréquemment au problème du manque de matériaux nobles répondant aux exigences précitées. Par ailleurs, les matériaux locaux disponibles en grandes quantités sont souvent inadéquats ; gonflants, plastiques, pas assez résistants. Et pour être utilisés en se conformant aux exigences spécifiques du projet, ces matériaux nécessitent souvent des traitements ou stabilisations (figure II. 2). D'autant plus que s'ajoutent à ces considérations, les exigences du développement durable qui limitent sérieusement le recours à la mise en décharge des déblais.

Les techniques de stabilisation sont nombreuses et continuent à être réinventées dans

ce contexte de développement durable qui introduit des règles plus strictes en matière de terrassement en imposant des coûts élevés de mise en décharge des matériaux de déblais. Le traitement à la chaux par exemple, offre la possibilité la plus économique du recyclage des ces terres de déblai.

Afin d'introduire le contexte dans lequel s'inscrit la présente étude, on présente dans ce chapitre brièvement, les méthodes de stabilisation les plus utilisées. La présentation porte essentiellement sur la stabilisation chimique conventionnelle et celle utilisant des produits nouveaux, encore méconnus tels que les produits pétroliers sulfonatés.

2. Techniques de stabilisation

Les techniques de stabilisation les plus utilisées (qu'elles soient chimiques ou autres) dans le domaine routier sont :

- La stabilisation par ajout de matériaux inertes.
- La stabilisation chimique,

Le choix de l'une ou de l'autre de ces méthodes fait appel à plusieurs facteurs tels que la nature du sol, la disponibilité du matériau ou du produit stabilisant, les délais de réalisation du projet, les considérations économiques et les conditions environnementales et de mise en œuvre.

2.1 Stabilisation par ajout de matériaux inertes

De nombreuses études scientifiques ont montré qu'on peut stabiliser les sols par ajout de matériaux inertes tels que les sables. Cependant, des cas pratiques de projets de stabilisation par ajout de sable rapportés dans la littérature sont plutôt rares.

Didier (1972) a étudié l'influence du sable et de sa granularité sur le potentiel de gonflement.

El-Sohby et El-Sayed (1981) ont traité les argiles expansives d'Egypte avec du sable et du limon en vue d'étudier l'influence de la finesse des éléments non argileux sur le potentiel et la pression de gonflement.

Suratmana (1985) a testé le gonflement libre de 5 échantillons de montmorillonite

mélangés à 5 pourcentages de sable de 10 à 50% de granulométrie moyenne. Il a constaté que 20% de sable réduit le taux de gonflement de 26% et 30% de sable le réduit à 50%.

Louafi (1997) a montré l'effet du sable sur le taux et la pression de gonflement d'une bentonite. Elle a également mis en évidence l'effet marqué de la taille et de la forme des grains qui composent le sable utilisé.

Bengraa (2004) a étudié l'évolution du potentiel et la pression de gonflement d'une argile par ajout de sable à des granulométries différentes et à différents taux de sable.



Figure II.2 : Exemple de sol à traiter

Il a noté une réduction importante du gonflement.

2.2 Stabilisation chimique des sols

Elle se base sur l'utilisation de produits chimiques ou de liants afin d'augmenter la concentration ionique de l'eau libre et de réduire les phénomènes d'échange indésirables.

Les liants sont de deux types :

- Organiques (goudrons, bitume, résine naturelle, polymère, …)
- Hydrauliques (ciment, chaux, cendres volantes, pouzzolane)

2.2.1 Liants organiques

Les liants organiques sont des produits collants. Lors du malaxage, ils enrobent les particules argileuses et donnent aux sols gonflants des propriétés d'hydrophobes. Ceci entraîne une diminution de l'affinité du sol à l'eau et une modification de sa structure microscopique.

✓ *L'asphalte*

L'asphalte est un matériau viscoélastique qui couvre et lie les particules entre elles plus qu'il n'induit de réactions chimiques ou crée des nouveaux composants. Il peut augmenter la résistance et la rigidité et réduire la sensibilité à l'eau des matériaux.

✓ *Les produits organiques*

Certains produits organiques sont proposés pour la stabilisation des sols fins. Il s'agit de dérivés aminés tensioactifs, de résines associées à des agents durcisseurs ou d'extraits de végétaux du type lignosulfonates ou lignosulfites. Ces produits améliorent les caractéristiques des sols fins en diminuant leur affinité à l'eau, en enrobant leurs particules d'un film tensioactif. Ces additifs sont fournis sous forme de liquide ou de pâte diluable ou de poudre dispersable.

Ils ont une action d'imperméabilisation qui réduit l'imbibition par capillarité et par succion mais qui ne renforce pas les qualités des sols intrinsèquement faibles. La pérennité de leur effet (à long terme) n'est pas assurée. Pour que les dosages ne soient pas excessifs, il faut que le pourcentage d'argile contenu dans les sols traités ne dépasse pas 15%. Les sols qui se prêtent le mieux à ces traitements sont les limons argileux. Les meilleurs produits sont les amines aliphatiques que l'on peut employer pour la protection temporaire des plates formes.

En Algérie, des produits hydrophobants ont été utilisés dans le traitement du sable limoneux de la couche de base de l'aérodrome de Tessalit, dans le sud Saharien (Peltier, 1959).

Des produits hydrophiles ont été utilisés dans le traitement des couches de base de Gassi Touil (couloir de plus de 300 km qui traverse le grand erg oriental du nord au sud), Les 15 centimètres superficiels du sol ont été traités par des lignosulfites (dosage de 1% en poudre).

Un calcul économique a favorisé le recours à la stabilisation chimique au lignosulfite, des matériaux utilisés en couches de base du tronçon Rhourde El Baguel El Borma au sud algérien (SCET- Coopération, Bouzerara, 1998). L'incorporation de 1% environ dans les matériaux sableux à fines calcaires ou gypseuses permet de doubler la résistance à la compression.

Malheureusement, ces produits ont été depuis, abandonnés (Bouzerara, 1998).

✓ *Les produits pétroliers sulfonatés*

Les SPPs sont des produits nouveaux dont la publicité vante les mérites et qui restent fort méconnus d'après les chercheurs. D'après quelques références, plusieurs pays les ont utilisés dans la stabilisation des couches de chaussées et sont satisfaits des performances réalisées. Ils sont utilisés au Canada, en Europe, en Afrique du sud et en Jordanie.

➢ Comment se présentent ils ?

Les SPPs se présentent sous plusieurs formes (liquide, poudre, colle …). Ils sont des surfactants (agents à surface active) qui puisent leur efficacité des réactions ioniques (Paige-Green et Bennet, 1993). Même si ces produits sont industrialisés, leur composition chimique exacte n'est pas dévoilée par les fournisseurs. Les praticiens ne peuvent pas connaître leurs composants actifs. Très peu de ces produits sont brevetés. Cependant la compréhension de leur nature chimique globale est possible.

A partir de la nature chimique et de la structure typique de plusieurs surfactants, il apparaît que leurs constituants actifs sont surtout des huiles minérales (chaînes hydrocarbonées) modifiées par l'acide sulfurique pour former l'acide sulfonique. L'huile minérale peut être un dérivé pétrolier naturel (huile ou bitume) ou une huile artificielle (Paige-Green et Coester, 1996). L'huile sulfonatée est la base des SPPs et chaque marque de ces produits utilise des additifs pour améliorer leur réactivité. Il est cependant possible pour le fabricant d'adapter la formulation de certains de ces

produits pour augmenter leur réactivité dans le but de les utiliser dans des conditions et pour des matériaux spécifiques.

La littérature révèle que les SPPs se basent sur les réactions d'échange ionique avec la fraction argileuse du sol pour effectuer leurs fonctions. Les SPPs se fixent sur les sites d'échange ionique des argiles ou d'autres minéraux appropriés aussi bien des cations libres dans le sol. Ce processus entraîne une réduction de l'eau adsorbée des argiles, modifie les caractéristiques des matériaux et réduit leur susceptibilité à l'eau. Il permet aussi une meilleure densification du sol.

Des SPPs à teneurs en surfactant anionique élevé, c'est-à-dire le produit au plus grand potentiel pour le remplacement des cations échangeables présents dans le sol, sera ainsi considéré comme le meilleur produit pour augmenter la résistance des sols. Ceci a été confirmé par des recherches (Paige-Green, 1999a). Il sera cependant rappelé que la dilution et le taux d'application sur le site affectent la concentration finale du surfactant appliqué au sol.

Théoriquement, deux propriétés spécifiques font que les SPPs soient extrêmement utiles pour la stabilisation des sols, à savoir (Steyn, 1993) :

- Leur capacité à fixer, déplacer ou remplacer les cations échangeables dans l'argile.

- Leur capacité à rendre les sols et matériaux (particulièrement l'argile mais pas seulement) hydrophobes en déplaçant l'eau adsorbée et l'eau d'hydratation et en empêchant la ré-adsorption de l'eau par le sol.

Le traitement des sols par les SPPs entraîne des changements dans les caractéristiques du matériau naturel. Ces changements sont dus au processus physico-chimique qui se déclenche quand les sols (principalement les fractions argileuses) se mettent en contact avec les SPPs dans l'eau. Ils se manifestent par une augmentation de la stabilité du matériau et des modifications dans ses caractéristiques physiques et chimiques, dans sa densité et son gonflement (Kezdi, 1979).

➢ Comment réagissent ils avec le sol ?

Les SPPs peuvent être considérés comme des agents à surface anionique active. Ils

sont cependant appropriés pour réduire la capacité d'échange cationique des sols à l'aide des réactions dans lesquelles les cations présents sur la surface du minéral argileux ou entre les couches d'argile, sont remplacés ou fixés aux molécules organiques anioniques. Ceci réduit la mobilité des ions et donc la plasticité du matériau.

Selon des informations émanant des fournisseurs, la liaison des molécules sulfoniques peut se faire par un nombre de mécanismes :

- Des liaisons chimiques directes, c'est-à-dire entre SO_3, la tête anionique du SPP et le cation métallique à la surface du sol.
- Des liaisons inductives, c'est-à-dire, entre l'ion d'oxygène non chargé dans le groupe sulfonique et le cation métallique à la surface du sol.
- L'occupation du site ionique vacant dans la structure du minéral, par le SPP, ou
- La dissolution de la tête du SPP dans la double couche diffuse de l'argile.

La tendance des différentes réactions d'échange et les processus de liaison à se produire est affectée par des facteurs chimiques tels que la valence, l'état d'hydratation, le rayon ionique des cations et le pH de la solution. Les SPPs sont particulièrement des échangeurs ioniques actifs à cause de leurs propriétés surfactantes et la grande taille de leur molécule. Ils peuvent remplacer la plupart des cations inorganiques.

➢ Quels sont leurs effets sur les sols ?

- *Imperméabilisation*

Cette capacité est apportée par le fait qu'une fois la réaction d'échange ionique est produite et l'acide sulfonique est fixé à la particule d'argile, les prétendus agents hydrophobiques des SPPs sont éloignés de la particule et forment une couche d'huile protectrice autour d'elle. En théorie, ceci réduit l'épaisseur de la double couche électrique ou la couche d'hydratation et empêche l'accès de l'eau à la particule du minéral. Comme conséquence de la réduction de l'épaisseur de la double couche, il devient théoriquement possible de réaliser un plus grand degré de compactage du matériau et aussi de réduire l'absorption possible de l'eau par le matériau à long terme (Paige-Green et Coester, 1996).

- *Propriétés surfactantes*

Les SPPs sont présentés comme des surfactants capables de réduire la tension de surface de la solution avec laquelle ils sont émulsifiés (Paige-Green et Coester, 1996).

Le processus d'échange ionique induit par les SPPs est permanent, il réduit l'attraction entre l'eau et l'argile et par conséquent réduit le gonflement, le retrait et l'indice de plasticité de l'argile traitée.

Les SPPs contiennent des agents floculants qui avec le temps augmentent l'agglomération des particules argileuses.

Des actions de cimentation sont produites dans les sols traités. Elles se font dans le temps, elles durent plusieurs semaines. D'après les brochures de publicité, on assiste à une augmentation de la résistance et de l'indice CBR. Certains de ces produits donnent une bonne adhésion des couches de roulement.

2.2.2. Les liants hydrauliques

Les liants hydrauliques les plus utilisés pour stabiliser les sols ou renforcer les matériaux sont la chaux et le ciment. Leur action résulte essentiellement de l'effet de prise et de la cristallisation de leurs constituants par hydratation. L'emploi de ces techniques s'est développé principalement en technique routière. Les scories des hauts fourneaux et les cendres volantes sont aussi très utilisées. Ces liants ont des réactions quelque peu différentes et exigent des conditions différentes pour se réaliser, cependant les effets de leur réaction sont fortement similaires.

✓ ***Le ciment***

Le ciment Portland est un liant hydraulique qui réagit avec l'eau pour donner une masse dure. Il est fabriqué par mélange de clinker de Portland et 5% de gypse. Sa surface spécifique varie entre 300-550 m² / kg. Il comporte des silicates aluminates et sulfates de calcium. Lors de l'hydratation, le ciment forme de la chaux éteinte appelée Portlandite. Les réactions entre sol ciment et eau commencent par un échange de cations puis la production d'agents de cimentation.

En fonction de la composition du ciment et de la composition minéralogique du sol, des réactions chimiques peuvent se produire entre l'hydroxyde de calcium et les silices et

alumines solubles présentes dans l'argile donnant une modification de la structure des particules et une augmentation de la résistance au gonflement – retrait. Approximativement après deux heures d'exposition du mélange sol – ciment à l'humidité, la liaison entre particules est faite et le compactage est complet. Une manipulation supplémentaire du matériau traité peut casser les liaisons établies. Le gain en résistance peut continuer encore pendant plusieurs jours. La modification des particules à ce stade du processus de réaction est empêchée par l'état des liaisons.

Le mélange du ciment à l'eau initie un processus chimique l'hydratation qui forme une pâte dure. Quand les particules de ciment subissent l'hydratation, un gel cimentaire fin se forme autour des particules. Les produits de la réaction constituant le gel incluent le gel CSH, l'ettringite et le monosulfate. Puisque le gel cimentaire est poreux et contenant de l'eau de cristallisation, son volume va augmenter plus que celui du ciment avant la réaction. Ainsi, dès que la réaction entre le ciment et l'eau se produit, les vides entre les particules du ciment se remplissent graduellement avec le gel. En même temps, la pâte du ciment augmente de densité et devient plus résistante (Janz, Johansson, 2002).

Comme déjà mentionné, l'action de stabilisation par le ciment est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau et de la température. De plus, la présence de chaux dans le ciment provoque des réactions d'échange. Le ciment est fréquemment utilisé dans le traitement des sols de surface. Les pourcentages utilisés varient de 2 à 6% (Thomas, 2002).

Haofeng et al (2009) rapportent que la résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours augmente avec le pourcentage de ciment.

L'ajout de ciment à une argile gonflante augmente sa résistance, diminue sa plasticité et réduit son potentiel de variation de volume. Le ciment augmente aussi la limite de retrait et améliore la résistance au cisaillement du sol traité.

Il a été montré qu'un gain considérable en résistance est souvent enregistré dans les sols traités au ciment seul ou combiné à la chaux (Ahenberg et al, 1995) référence citée par (Janz et Johansson 2002). Le ciment a permis la stabilisation des sols à problèmes contenant les matières organiques et ayant une teneur en eau élevée.

✓ ***La chaux***

La chaux est le produit de la décomposition du calcaire à des températures élevées. Le mélange de l'eau, la silice et le calcium solubles dans l'argile, conduit à la formation de nouveaux composants. Avec l'eau, sa première fonction est la modification de la structure des particules et l'accroissement de la résistance au gonflement – retrait c'est-à-dire à la sensibilité à l'eau. La modification transforme les sols argileux, ils deviennent friables et facilement compactables. Le séchage des sols humides par ajout de chaux réduit au minimum le retard de la construction dû aux conditions atmosphériques. Ce qui se traduit par des économies du temps et d'argent (Figure II.3).
La fonction secondaire est d'assurer la liaison entre les particules (en présence de l'argile) et le gain en résistance. Elle réalise la stabilisation des sols en créant des changements chimiques à long terme dans les sols argileux de faible performance. Puisque la modification de la structure des particules se produit lentement en fonction du type d'argile présent dans le sol, une période de maturation de 1 à 4 jours est permise pour obtenir un mélange homogène et friable. Il n'y a pas de limitations dans les spécifications sur le temps pour accomplir le compactage (NLA, 2004).

La stabilisation des sols à la chaux étant le centre d'intérêt de ce mémoire, elle sera développée avec plus de détails dans le chapitre suivant.

✓ ***Les cendres volantes***

Les cendres volantes sont des produits dérivés de la combustion du charbon. Les éléments les constituant varient en fonction du mode de combustion qui les a générées. La classe FS (Furnace Slag : produit de haut fourneau) est une pouzzolane qui requiert souvent un activateur tel que le ciment ou la chaux pour réagir.

La classe CS est une combinaison de la pouzzolane et du matériau (self setting). Quand ils sont combinés à l'eau, des réactions de cimentation se produisent et créent des liaisons entre les particules. En fonction de la composition chimique, on assiste à une modification de la structure des particules, une augmentation de la résistance, une réduction du gonflement-retrait et de la sensibilité à l'eau.

Ces réactions immédiates (accélérées) par les cendres volantes sont plus lentes que celles obtenues avec le ciment et plus rapides que celles obtenues avec la chaux. Le compactage doit se faire dans les six heures de l'application de la stabilisation.

Pour un sol silteux peu cohérent ou pour reprendre la chaussée sur toute l'épaisseur d'asphalte, des investigations récentes et quelques pratiques récentes ont montré que la stabilisation à la chaux et aux cendres volantes de classe F peut être économiquement utilisée pour réaliser des performances à long terme. Pour les sols appropriés, LFA (Lime Fly Ash) peuvent offrir des économies en réduisant le coût des matériaux jusqu'à de 50% comparé à la stabilisation au ciment Portland (Beegly, 2003).

Pour qu'une pouzzolane telle que les cendres volantes, réagisse avec l'eau, une source extérieure de chaux est nécessaire, par exemple sous forme de ciment Portland ou de chaux brûlée. Quand le ciment ou la chaux brûlée réagissent avec l'eau, ils forment, l'hydroxyde de calcium, qui à son tour peut former un gel CSH augmentant la



Figure II.3 : Exemple de traitement de sol à la chaux

résistance. Ce gel est du même type que le ciment Portland avec un plus faible rapport CaO / SiO_2. Il peut former aussi un gel CASH (calcium aluminates silicates hydratés) qui est étroitement similaire à CSH mais contient de l'aluminium. Dans cette réaction 100g de pouzzolane peut donner 150g de gel CSH ou CASH. Le pH du mélange chute parce que les ions hydroxydes $(OH)^-$ sont consommés (Janz & Johansson, 2002).

La réaction pouzzolanique est lente et devient encore plus lente avec la formation des

gels CSH autour des particules des cendres volantes. Le gain en résistance est proportionnel à la consommation de $Ca(OH)_2$ (Esteoule, Perret, 1999).

Zalihe Nalbantoglu, (2004) a étudié la stabilisation des argiles gonflantes par les cendres volantes. Il a noté une réduction de l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement avec une amélioration de la texture.

3. Sélection du mode de traitement

Les différentes raisons du traitement sont édictées par les conditions particulières du projet telles que rappelées dans l'introduction de ce chapitre.

Les modes de stabilisation des sols doivent être convenablement conçus pour déterminer l'additif le plus approprié à la réalisation de l'amélioration désirée.

La figure II.4 montre un organigramme qui permet de déterminer rapidement le stabilisant hydraulique qui s'indique le mieux pour le traitement des sols ou matériaux. Le choix est basé sur les passants du tamis N° 200 et l'indice de plasticité (Currin et al, 1976). D'autres essais pourront être exécutés pour confirmer la décision. Cela dépend de l'objectif du traitement projeté (modification ou stabilisation).

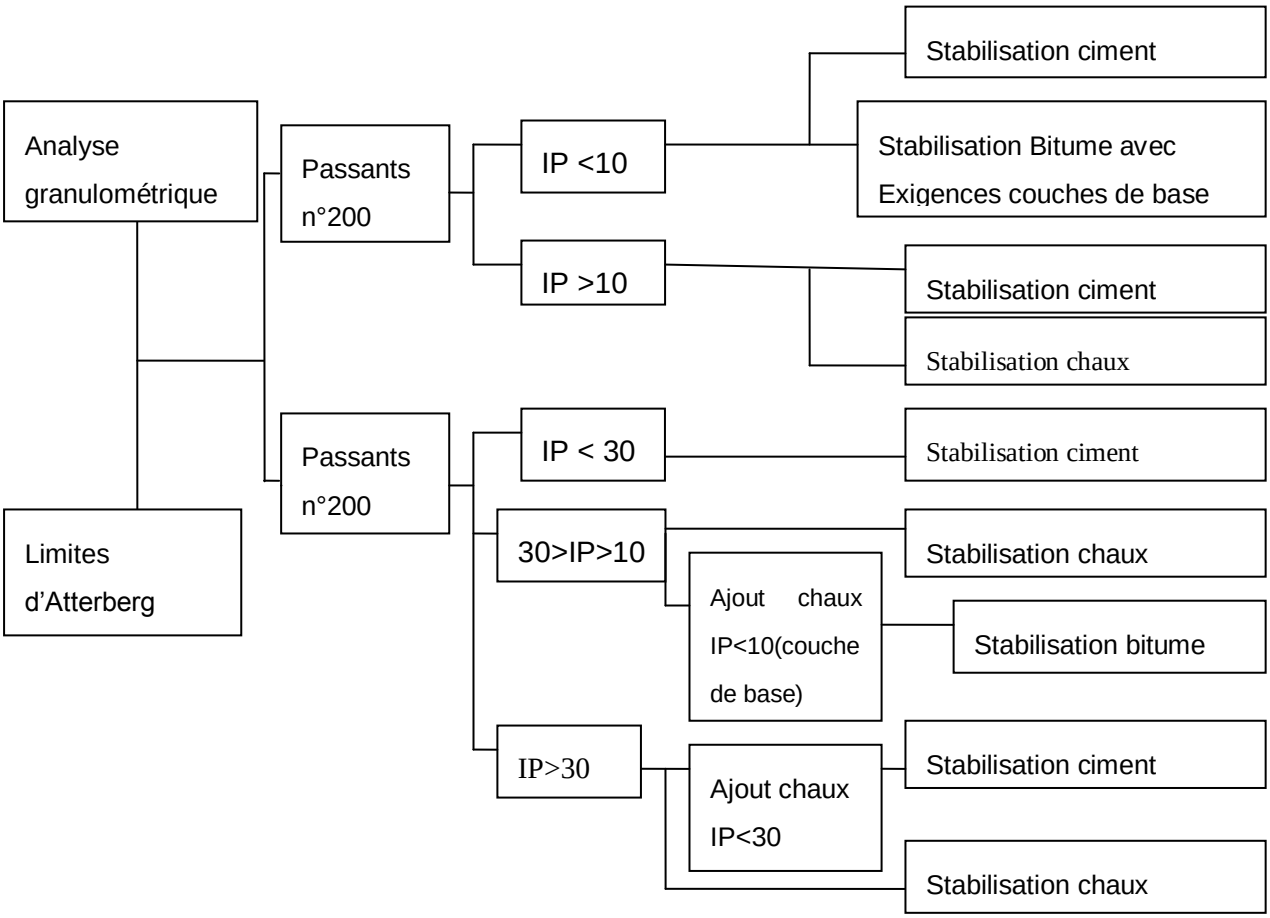


Figure II.4 : Organigramme du choix de la méthode de stabilisation appropriée (Currin & al. 1976)

Chapitre III

Stabilisation des sols à la chaux

1. Introduction

La stabilisation des sols à la chaux est une technique ancienne. Elle a été utilisée dans les voies romaines, dans la construction de la muraille de Chine (argile traitée à la chaux) et dans l'habitat (chaux + sable + terre argileuse). Elle continue à se présenter comme une des meilleures solutions pour les problèmes de portance posés par le sol. Il reste néanmoins que sa plus large utilisation est dans la stabilisation des assises de chaussées (sols supports, couches de base, de fondation, surfaces, canaux de drainage, remblais).

A partir des années 1990, la stabilisation à la chaux a connu un regain d'importance fulgurant qui a fait suite au désintérêt qu'elle a connu durant les années 1970. De nos jours, de nombreux comités, des centres de recherche et des associations scientifiques encouragent et financent la recherche sur l'utilisation de la chaux en tant que matériau de construction et encadrent la vulgarisation des nouvelles procédures de stabilisation à la chaux pour assurer une efficacité optimale de durabilité des structures. En 1996, le département des routes de l'état du Queensland a procédé à la stabilisation de Killarney Road et Freestone Creek en suivant ces nouvelles recommandations (Evans et al., 1997) Les résultats obtenus étaient impressionnants. En 2003, plus de 1,6 millions de tonnes de chaux ont été utilisés dans la stabilisation des sols aux Etats Unis (Miller, 2004).

La stabilisation des sols à la chaux permet l'amélioration immédiate et dans le temps, des performances des sols traités. Ces performances sont obtenues parfois à de très faibles taux de chaux ce qui représente un grand intérêt économique. Les performances se traduisent de manière remarquable sur toutes les caractéristiques du sol traité, à savoir la réduction de la plasticité, du potentiel et de la pression de gonflement, de la densité sèche maximale et de la déformabilité.

Elle permet également l'augmentation de la teneur en eau optimale et de la résistance au cisaillement, de l'indice CBR, de la cohésion et de la perméabilité des argiles.

Afin de pouvoir apprécier les résultats obtenus et la contribution apportée par ce travail, on résume dans ce chapitre, l'état de connaissance sur la stabilisation des sols à la chaux. On commence par une présentation de la chaux, ses mécanismes de réaction et les effets qu'elle apporte aux sols stabilisés. On explique ensuite, les mécanismes des effets immédiats et des effets à long terme qu'elle réalise avec le sol en mettant en avant les paramètres qui les affectent.

2. Présentation de la chaux

La chaux est obtenue par calcination d'un calcaire ($CaCO_3$) pur ou contenant jusqu'à 20% d'impuretés. Le calcaire est broyé et calciné à 1000°C ce qui donne le dioxyde de carbone (CO_2). Le produit est principalement l'oxyde de calcium (CaO) connu comme la chaux vive. La réaction de calcination est donnée par l'équation :

$$CaCO_3 + \text{chaleur} \longrightarrow CaO + CO_2$$

La chaux vive est caractérisée par son degré de calcination et la taille de ses particules. Le degré de calcination indique combien le dioxyde de carbone est extrait du calcaire. Dans le contrôle de la production, il est habituellement, mesuré comme CO_2 résiduel (Pihl et Kuusipiro, 1997).

L'hydratation de la chaux génère beaucoup de chaleur. D'après Boynton (1980), la chaleur totale dégagée est de 1163kJ / kg. La réaction crée aussi une augmentation de pH jusqu'à 12,5 qui est une condition pour les réactions pouzzolaniques secondaires.

La réactivité de la chaux dépend de la taille de ses particules. Plus la quantité des fines est grande plus la réactivité est rapide. Elle est mesurée par la chaleur dégagée quand une quantité de 150 g de chaux vive est mélangée à 600 ml d'eau (d'après la norme suédoise SS 1340 03)

Plus l'augmentation de la température est grande et rapide, plus la réactivité de la chaux est grande. La figure III.1 tirée d'un rapport de recherche (Janz et Johansson, 2002) montre la courbe d'hydratation de différentes chaux.

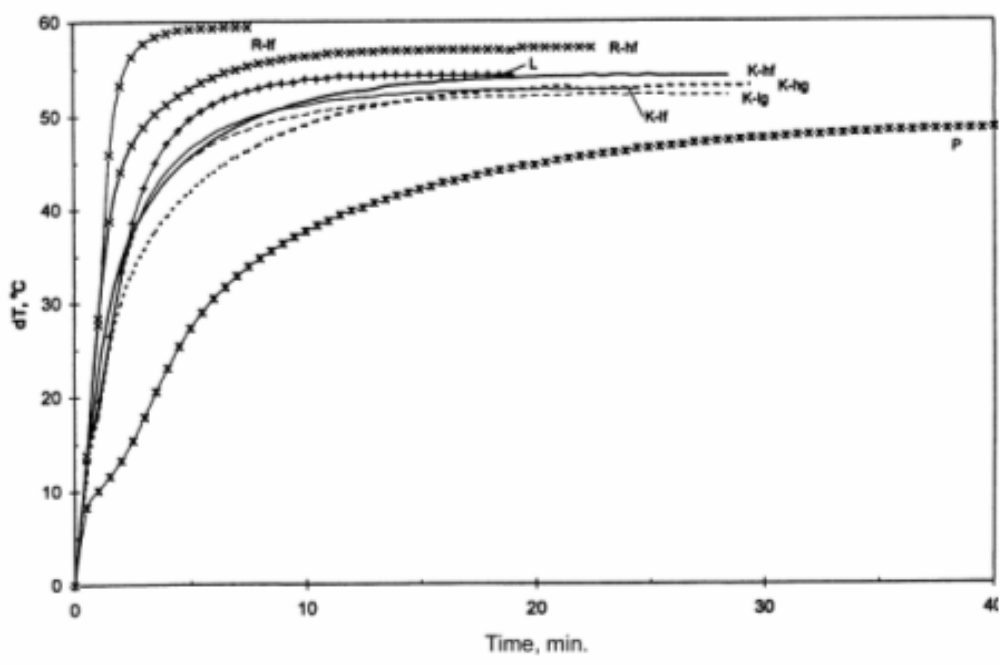


Figure III.1 : Exemples de courbes d'hydratation (Ahnberg et Pihl, 1997)
Référence citée par (Janz et Johansson, 2002)

Il existe trois principaux groupes de chaux :

- ✓ La chaux aérienne,
- ✓ La chaux hydraulique.
- ✓ La chaux magnésienne,

✓ ***La chaux aérienne***

Elle est presque pure, la chaux maigre est obtenue à partir du calcaire impur, 5% d'argile et 3% à 12% d'impuretés. Elle est utilisée dans la préparation des mortiers de maçonnerie, des enduits et dans la fabrication des peintures.

✓ ***La chaux hydraulique***

Elle est obtenue par cuisson, à température modérée, 900 à 1100°C, du calcaire marneux, contenant 6% à 20% d'impuretés argileuses. Au cours de la cuisson, après la décomposition du carbonate de calcium ($CaCO_3$), le monoxyde de calcium CaO s'allie à l'état solide avec les oxydes de silicium (SiO_2).

Les oxydes d'aluminium (Al_2O_3) et les oxydes de fer (Fe_2O_3) contenus dans les minéraux argileux, forment des silicates (βC_2S), des ferrites et des aluminates de calcium CA qui durcissent sous l'eau comme dans l'air.

- ✓ ***La chaux magnésienne***

Appelée aussi chaux dolomitique, elle provient de la calcination du calcaire contenant du magnésium ($MgCO_3$).

On donne à titre indicatif, dans le tableau III.1 les propriétés principales des variétés de chaux commercialisées.

En Algérie, eu égard à l'abondance du calcaire, la chaux est fabriquée et est commercialisée par de nombreuses entreprises publiques et privées de matériaux de construction localisées dans plusieurs régions du pays, à Tipaza, Constantine, Oran, Chlef et Berriane, pour ne citer que celles là.

3. Mécanismes de réactions sol - chaux

La chaux est très utilisée pour modifier les propriétés des sols fins et des fractions fines des sols grenus. Elle est plus efficace dans le traitement des sols plastiques capables de prendre une grande quantité d'eau.

Les particules de ces sols argileux ont des surfaces chargées négativement qui attirent les cations libres (les ions chargés positivement) et les dipôles des molécules d'eau. Comme résultat, on obtient de larges couches diffuses d'eau qui se forment autour des particules argileuses, les éloignant ainsi et les rendant instables avec des liaisons plus faibles Ceci dépend de la quantité d'eau présente dans le sol et de la minéralogie et la morphologie des argiles (Little, 1987, et NLA, 2004).

L'ajout de chaux au sol fin déclenche en présence d'eau plusieurs réactions. Les deux premières réactions, l'échange cationique et la floculation se produisent rapidement et réalisent des améliorations dans la plasticité, la maniabilité, la résistance et la déformabilité du sol stabilisé.

Des réactions pouzzolaniques peuvent aussi avoir lieu, donnant naissance à des agents de cimentation qui augmentent la résistance et la durabilité du sol stabilisé. Les réactions pouzzolaniques dépendent du temps et de la température ambiante. Les

températures élevées (plus de 16°C) accélèrent ces réactions.

Tableau III.1 : Propriétés de la chaux (NLA, 1988)

Chaux vive		
Constituants	**Taux de calcium (%)**	**Taux de dolomie (%)**
CaO	92,25-98,00	55,5 - 57,5
MgO	0,3-2,5	37,6 - 40,8
SiO_2	0,20-1,5	0,1 -1,5
Fe_2O_3	0,1-0,4	0,05 - 0,4
Al_2O_3	0,1-0,5	0,05 -0,5
H_2O	0,1-0,9	0,1 - 0,9
CO_2	0,4-1,5	0,4 -1,5
Densité spécifique	3,2-3,4	3,2 - 3,4
Chaleur spécifique (38°C)	442 J/kg	488 J/kg
Densité brute	880-960 kg /m^3	880-960 kg /m^3
Chaux hydratée		
Constituant principal	Taux de calcium $Ca(OH)_2$	Taux de dolomie $Ca(OH)_2MgO$
Densité spécifique	2, 3 -3,4	2,7 -2,9
Chaleur spécifique à (38°C)	674 J/kg	674 J/kg
Densité brute	400-560 kg /m3	400-560 kg /m3

La quatrième réaction qui peut se produire avec la chaux est la carbonatation. Dans cette réaction, la chaux réagit avec le dioxyde de carbone atmosphérique pour former des carbonates relativement insolubles. Cette réaction est préjudiciable pour le processus de stabilisation et peut être évitée par des méthodes de mise en œuvre adéquates qui minimisent l'exposition de la chaux à l'air et aux chutes de pluie (Chou, 1987).

3.1 Réactions immédiates

Selon Eades et Grim (1960), pratiquement tous les sols fins traités à la chaux, font des réactions d'échange cationique et de floculation – agglomération, en présence d'eau (figure III.2).

Cette réaction produit des modifications immédiates dans les propriétés et la structure

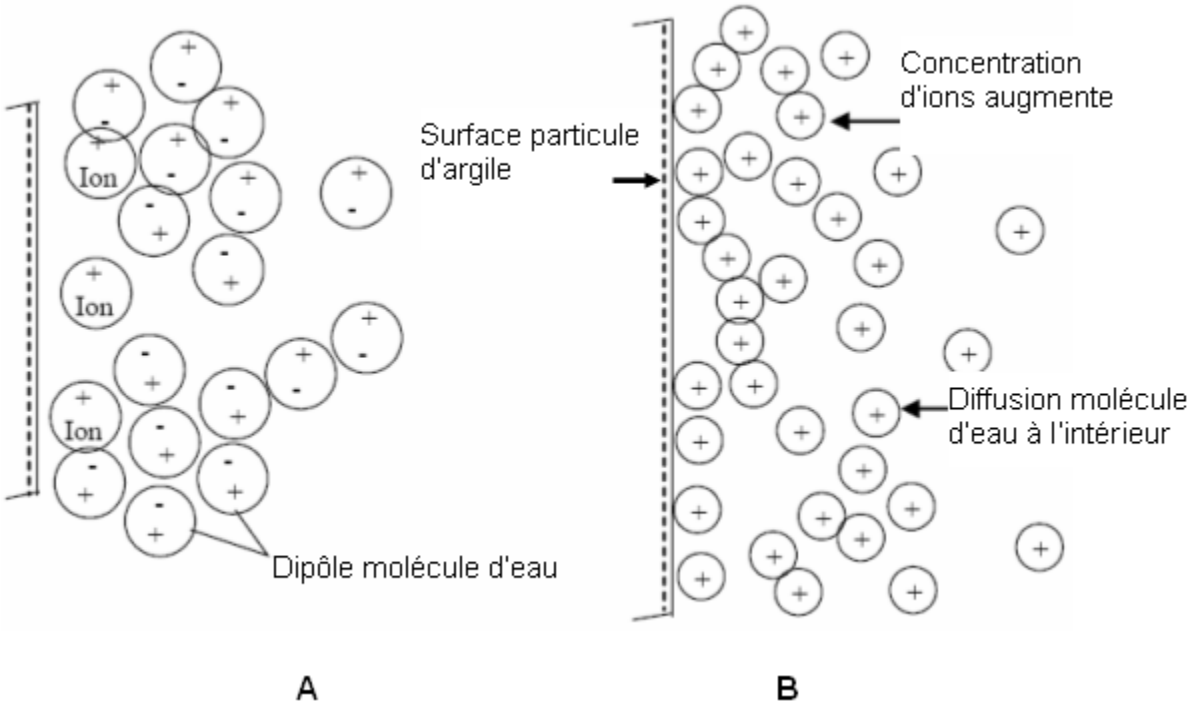


Figure III.2 : Formation d'une couche d'eau diffuse autour des particules d'argile (d'après Little, 1987)

du sol par échange cationique et par floculation ce qui provoque des améliorations immédiates dans la plasticité du sol, sa maniabilité, sa résistance et sa déformation (figure III.3).

L'ajout de chaux au sol en quantités suffisantes fournit un excès de cations multivalents de calcium qui tendent à remplacer des cations monovalents tels que le sodium et le potassium. Ce qui produit une diminution de la taille de la couche d'eau diffuse entourant les particules argileuses et augmente le contact entre elles. Elles s'agglomèrent et leurs tailles augmentent. Ceci transforme le sol argileux humide en un matériau silteux ou sableux, il passe d'un état plastique à un état solide, friable, facilement travaillable et perd une partie de sa sensibilité à l'eau.

En général, cette phase de floculation-agglomération de la stabilisation à la chaux, produit des sols faciles à malaxer, à travailler et à compacter. Ces réactions



Figure III.3 : Changement de structure du sol traité à la chaux

immédiates sont principalement responsables de la réduction du retrait et du gonflement du sol. D'après Holtz (1969) l'ajout de 3 % à 5 % de chaux par poids sec de sol est recommandé pour réaliser des changements considérables.

Ces réactions d'échange cationique sont réputées être réversibles. Dans le souci d'évaluer la durabilité des transformations apportées par la stabilité à la chaux, une recherche active s'intéresse actuellement à l'étude du degré de pérennité de ces transformations (Khattab et Al Mukhtar, 2008).

3.2 Réactions pouzzolaniques

Cette réaction a lieu entre la chaux, l'eau et les silicates et/ ou des aluminates des sols argileux pour donner dans le temps, des agents cimentants qui sont essentiellement les silicates de calcium hydratés ou les alumines de calcium hydratés, similaires à ceux produits durant l'hydratation du ciment Portland (Terrel et al, 1979). Les silicates et les aluminates des sols argileux doivent pour ce faire être libérés de leurs liaisons dans les motifs cristallins octaédriques et tétraédriques des minéraux argileux. Ceci est rendu possible par l'augmentation substantielle du pH du milieu, apportée par la chaux qui autorise la dissolution des aluminates et silicates (figure III.4). Ces réactions de cimentation provoquent les augmentations principales de la résistance dans le mélange sol-chaux dans le temps. On observe aussi l'augmentation de la cohésion, de l'indice CBR, l'amélioration de la perméabilité des argiles, la diminution des variations

volumiques pour les argiles gonflantes et le renforcement de la structure due aux phénomènes de prise et de cristallisation.

La réaction pouzzolanique de base est illustrée par les équations suivantes :

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

$Ca^{++} + OH^- + SiO_2$ (silicates d'argile solubles) $\longrightarrow$ Silicates de Calcium Hydratés (CSH).

$Ca^{++} + OH^- + Al_2O_3$ (aluminates d'argile solubles) $\longrightarrow$ Aluminates Calcium Hydratés(CAH).

Quand une quantité suffisante de chaux est rajoutée au sol, le pH du mélange augmente et quand il atteint 12,4 (pH de la chaux saturée), les silicates et les aluminates des argiles deviennent potentiellement solubles et se détachent du minéral argileux. Ils réagissent alors avec le calcium de la chaux pour former des ciments qui se consolident dans un processus graduel qui peut durer plusieurs années (Eades et Grim, 1960).

Tant qu'il y a suffisamment de calcium pour réagir avec les silicates et les aluminates,

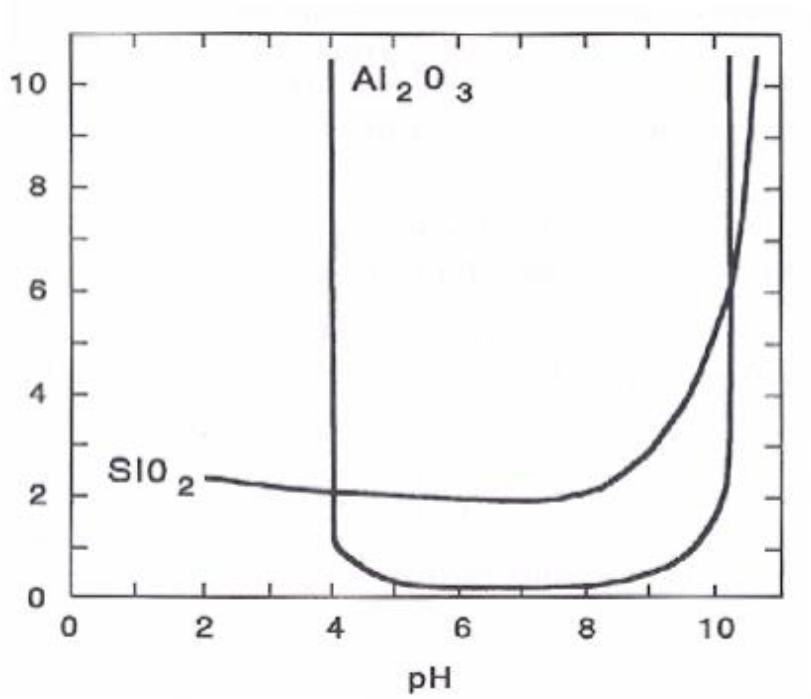


Figure III.4 : Courbe de solubilité des silicates et aluminates
(millimole par litre)

la réaction pouzzolanique continue aussi longtemps que le pH demeure suffisamment élevé pour maintenir la solubilité des silicates et aluminates (Little, 1987). La quantité de

chaux nécessaire pour cet objectif dépend des caractéristiques des sols et de la résistance exigée. En général, elle varie de 3 à 8 %.

Il est important de rappeler que le gain en résistance dépend aussi de la quantité des silicates et des aluminates dans l'argile traitée. Ainsi, il a été prouvé que la stabilisation à la chaux est plus efficace dans les sols montmorillonitiques que kaolinitiques (Lees et al, 1982).

Dans la plupart des cas les sols sableux sont stabilisés au ciment alors que les sols argileux sont stabilisés à la chaux, les sols argileux intermédiaires sont d'abord traités à la chaux ensuite au ciment pour augmenter leur résistance.

Lorsque le sol stabilisé ne contient pas une quantité suffisante de silicates et aluminates, des matériaux pouzzolaniques, tels que les cendres volantes sont quelques fois adjoints à la chaux pour améliorer la résistance du sol. Il est question des sols limoneux ou à fraction argileuse faible, avec un indice de plasticité entre 10 et 20.

3.3. Carbonatation

Simultanément avec la réaction pouzzolanique, la réaction de carbonatation peut aussi mener à une augmentation de résistance à long terme dans les sols stabilisés à la chaux. La carbonatation se produit quand la chaux réagit avec le dioxyde de carbone dans l'air pour produire un carbonate de calcium relativement insoluble. Cette réaction peut être avantageuse et mener à une augmentation de résistance à long terme (Arman and Munfakh, 1970) cité par (Cristopher, 2005).

Cependant, il est recommandé qu'avant le mélange, l'exposition de la chaux à l'air doit être évitée par des méthodes de mise en œuvre adéquates (Chou, 1987).

D'après Jagannath (2004) cette réaction serait indésirable car la chaux réagit avec le dioxyde de carbone au lieu des cimentants CAH et CSH (Figure III.5) citée par (Janz et Johansson, 2002).

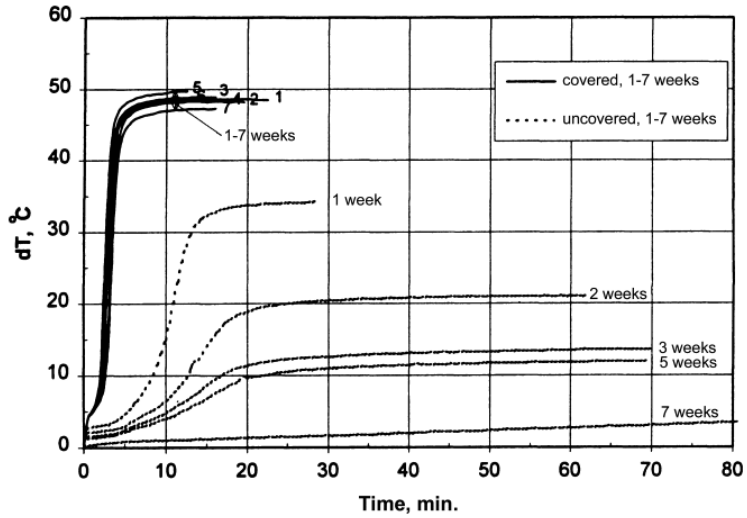


Figure III.5 : Perte de la réactivité de la chaux par mauvais stockage (Ahnberg and Pihl, 1997), citée par (Janz et Johansson, 2002).

4. Choix des sols pour stabilisation à la chaux

Les effets bénéfiques du traitement à la chaux des sols sont les résultats des différentes réactions entre la chaux et la fraction fine du sol. Pour cette raison, les sols fins tels que les argiles, les argiles silteuses, se prêtent plus favorablement à la stabilisation. Une teneur en argile minimum de 10% et un indice de plasticité supérieur à 10% sont recommandés pour une stabilisation efficace à la chaux. Bien que des effets bénéfiques ont été notés sur des sols silteux contenant moins d'argile et avec un indice de plasticité plus faible.

Pour les sables et les sols non plastiques à faible indice de plasticité, des additifs pouzzolaniques sont exigés pour produire la réaction nécessaire entre la chaux et les silicates. Les cendres volantes, les cendres volcaniques et les fines de schiste sont souvent incorporées avec succès aux mélanges.

5. Effets du traitement des sols à la chaux

Comme indiqué ci-dessus, les effets immédiats sont réalisés dans la première phase de la stabilisation. Ils sont atteints rapidement et sans cure. Ils sont le résultat de l'échange cationique et les réactions de floculation qui se produisent dès que le sol est mélangé à la chaux en présence d'eau. Ils sont d'un intérêt principal durant la phase de construction des chaussées.

En revanche, les effets à long terme, appelés effets de stabilisation, s'amorcent durant la construction et continuent dans le temps. Ils concernent la résistance et la durabilité. Bien que ces effets soient générés par l'échange cationique et la floculation, ils sont principalement le résultat du gain de la résistance pouzzolanique.

5. 1 Effets immédiats (modification des sols)

Les effets immédiats se manifestent sur les caractéristiques géotechniques du sol stabilisé.

5.1.1 Limites de consistance

Les modifications obtenues dans les limites de consistance sont immédiates. Ces changements dépendent surtout du minéral argileux. La figure III.6 montre un exemple illustrant les modifications enregistrées dans les limites de consistance d'une argile stabilisée à la chaux. Davidson et Handy (1960) confirment que les ions de calcium provenant de la chaux sont à l'origine de la réduction de la plasticité des sols cohérents, les rendant friables et faciles à manipuler à placer et à compacter. Ce constat a été confirmé également par les travaux de (Leroux et Rivière, 1969), avec 3% de chaux, ils ont obtenu des résultats rapides et importants.

Ces modifications se caractérisent par :

- ✓ Une diminution de la limite de liquidité : Brandl (1981) a montré que la limite de liquidité diminue après le traitement des sols par la chaux, pour la Kaolinite, elle reste inchangée et augmente parfois.
- ✓ Une augmentation de la limite de plasticité : On a constaté que l'augmentation la plus importante de la limite de plasticité des sols traités à la chaux est obtenue dans les sols à composante montmorillonitique prédominante.
- ✓ Une réduction de l'indice de plasticité : Elle est le résultat de la réduction de la limite de liquidité et l'augmentation de la limite de plasticité. En effet, l'indice de plasticité varie avec l'ajout de chaux jusqu'à un taux limite appelé « point de fixation de chaux ». Au-delà de ce taux les variations des limites de consistance sont très faibles.

Des études de l'USBR (US Bureau of Reclamation) (1975) ont montré que l'ajout de 4% de chaux a réduit l'indice de plasticité de quelques sols d'Amérique de 47% à 12%.

(Lazzali, 1997) a traité une bentonite très plastique à la chaux et a montré qu'un dosage inférieur à 4% est suffisant pour réduire de manière significative la plasticité. L'indice de plasticité a diminué presque de 80%.

La réaction rapide qui se produit avec l'ajout de chaux aux sols argileux (montmorillonitiques) diminue remarquablement l'indice de plasticité et augmente aussi rapidement la limite de retrait (Holtz, 1969).

- ✓ Une augmentation de la limite de retrait : Les caractéristiques du retrait des sols argileux sont améliorées aussi, par l'ajout de chaux, Des argiles testées par l'USBR ont vu leur indice de retrait augmenter de 7 à 26%.

La stabilisation des sols argileux par ajout de chaux est utilisée aussi pour limiter la variation de volume ou modifier les caractéristiques de la variation de volume de ces sols (Figure III.6).

L'indice de plasticité et la limite de retrait sont de très bons indicateurs du potentiel de gonflement d'un sol.

5.1.2 Texture

La texture subit une modification rapide, elle devient grenue. Ce phénomène est le résultat de la floculation des particules fines qui s'agglomèrent suite à l'altération des couches d'eau adsorbée par la présence des ions de calcium. Choquette et al (1987) ont traité des échantillons de sols naturels à une teneur en eau proche de la limite de liquidité, par ajout de 4% de chaux vive. Ils ont testé les caractéristiques de porosité de ces matériaux, la taille et la distribution des pores. Les résultats ont montré qu'au départ, il y avait deux types de pores ; intra-agrégat et inter-agrégat. Après trois jours, les pores inter-agrégat ont disparu et le nombre des pores intra-agrégat a augmenté. Ils ont conclu que la stabilisation à la chaux affecte la taille et la distribution des pores des argiles expansives. Le volume des pores varie peu et de façon irrégulière. Ce phénomène peut être justifié par la formation de micropores, par la division de gros pores dues à la formation de nouveaux minéraux et de leur cristallisation, ceci sans modifier le volume total des pores.

5.1.3 Compactage

La relation entre la densité sèche et la teneur en eau du sol traité est modifiée, comme effet de l'ajout de chaux. Le changement reflète la nouvelle nature du sol qui est marquée par une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche maximale. La figure III.7 illustre bien ce phénomène pour un sol argileux type glaise (Little, 1995).

Bien qu'avant l'application de la chaux, un sol dans un assez bon état de saturation ne peut pas atteindre une densité maximum, ce même sol avec la chaux exigera plus d'eau pour réaliser une nouvelle densité sèche maximale. L'excès d'eau est dépensé dans la réaction sol – chaux, ce qui assèche le sol des plateformes (sols argileux, humides).

$CaO + H_2O = Ca(OH)_2$ + chaleur. (Réaction exothermique qui entraîne une évaporation d'eau).

Le compactage des sols stabilisés à la chaux est plus facile que celui des sols stabilisés au ciment. Le retard est moins critique (Bell, 1988). Le traitement à la chaux aplatit la courbe de compactage ce qui offre un large intervalle pour le choix des teneurs en eau optimales pour une densité donnée. La qualité est mieux assurée par le contrôle de la teneur en eau que par la densité sèche. La teneur en eau atteint des valeurs plus grandes, permettant aux sols se trouvant dans des conditions plus humides que d'origine, d'être compactés de manière satisfaisante.

La conception des sols stabilisés à la chaux doit tenir compte des changements dans les optima de compactage. Ces changements sont en fait, proportionnels aux quantités de chaux et sont largement compensés par le gain en résistance

Andrews et O' Flaherty (1968) affirment que la réduction de la densité dépend non seulement du pourcentage de chaux mais aussi de la quantité des minéraux d'argile présents. Par exemple, la teneur en eau optimale augmente avec la quantité de la fraction argileuse alors que la densité sèche maximale diminue.

Lees et all (1982) ont montré que pour 30 à 50% de teneur en argile, l'ajout de chaux entraîne une baisse de 5% de la valeur de la densité sèche maximale. De plus, à des

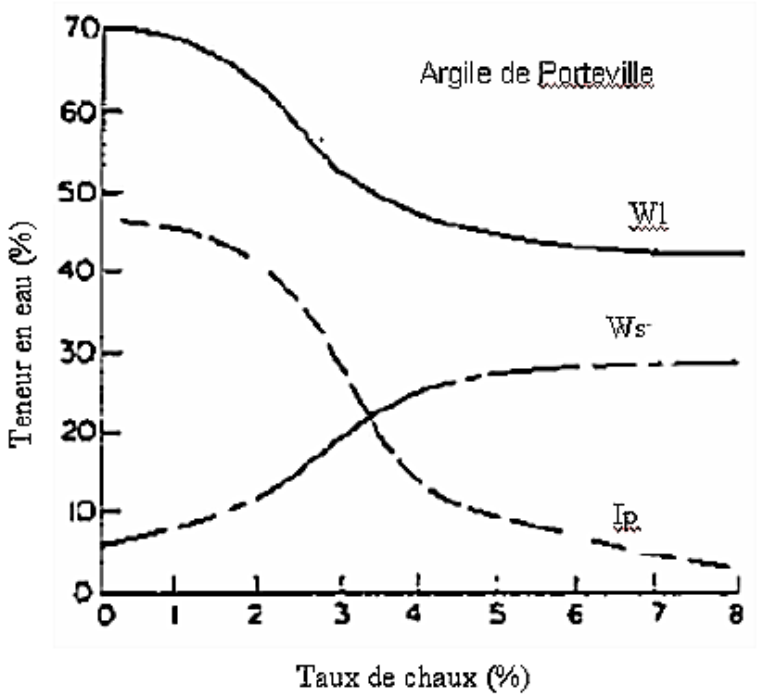


Figure III.6 : Variation des limites de consistance du sol traité avec le taux de chaux (TRB, 1987)

teneurs en eau élevées, les mélanges sols chaux montrent une meilleure compactabilité que celle des sols non traités.

Croft (1964) a trouvé que les densités de compactage obtenues sont plus élevées dans les argiles kaolinitiques traitées à la chaux que dans les sols à minéraux argileux gonflants prédominants. Dans les sols à grande teneur en montmorillonite, l'ajout de chaux peut déformer la courbe de compactage et alors une densité sèche maximale bien définie n'est pas montrée. La teneur en eau optimum de compactage pour de tels sols argileux devrait être celle qui produit la résistance maximum.

Thompson et Harty (1973) ont confirmé que l'effet de la chaux diminue lorsque le temps d'attente entre l'opération du mélange et celle du compactage augmente. Un processus de carbonatation prend place et les particules cimentées se comporteront comme des grains de sable. La montmorillonite et la kaolinite donnent une plus haute résistance avec la chaux que l'illite, la chlorite ou la halloysite. Les argiles expansives répondent plus rapidement à l'augmentation de la résistance, quoique la résistance finale réalisée

est plus grande dans les argiles kaolinitiques. La situation est plus compliquée par le fait que Lees et al (1982) ont montré qu'à 8% de teneur en chaux, la résistance à 28 jours des échantillons de sols kaolinitiques décroît progressivement avec l'augmentation de la teneur en argile alors que l'inverse se produit avec les échantillons des sols montmorillonitiques.

Les sols mélangés à de faibles teneurs en chaux atteignent plus rapidement la résistance maximale que ceux avec une plus grande teneur en chaux. La résistance n'augmente pas linéairement avec la teneur en chaux et en fait, un ajout excessif de chaux provoque une baisse dans la résistance. Par exemple, au-delà de la teneur en chaux optimum, la résistance en compression simple peut baisser considérablement et par moments cette baisse peut atteindre 30% (Al Rawi, 1981). La teneur en chaux optimum s'étend entre 4,5 et 8 % et dans les sols à plus grande fraction argileuses ces valeurs sont plus grandes. Cette réduction est due au fait que la chaux elle-même n'a ni une friction appréciable ni une cohésion. La cure est l'un des facteurs principaux qui

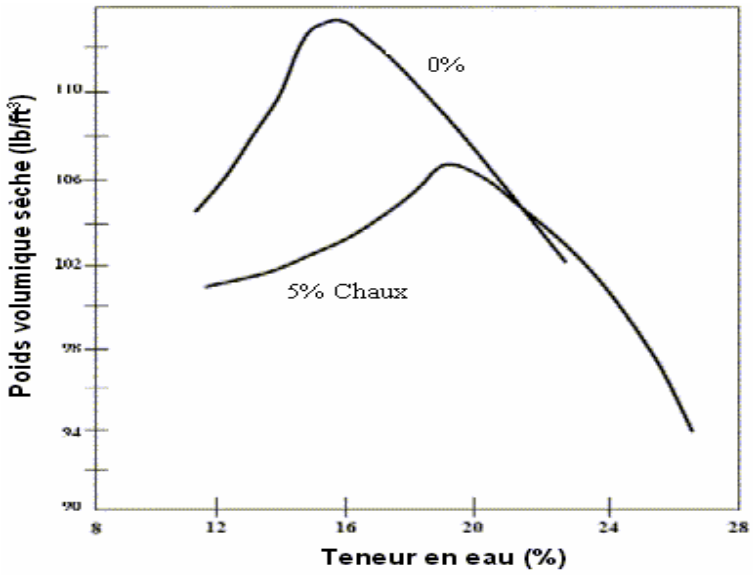


Figure III.7 : Caractéristiques du compactage d'un sol traité à la chaux (Little, 1995)

affectent la résistance des sols stabilisés à la chaux. Son effet sur la résistance est fonction du temps, de la température et de l'humidité relative.

5.1.4. Résistance des sols

L'effet de l'ajout de chaux aux sols argileux se manifeste par des améliorations dans les propriétés de déformation et de résistance. Ces améliorations, qui sont en grande partie, le résultat de la floculation des particules, facilitent la circulation des engins et offrent une plate forme stable de travail pour tous les équipements de la construction.

Dans de nombreux cas, une petite quantité d'argile est suffisante pour que le sol réagisse avec la chaux. Ce point de vue est soutenu par Thompson et Harty (1973), qui par des études de la réactivité de la chaux ont conclu que la teneur en argile n'est pas corrélée avec la réactivité de la chaux. Il est apparent alors que la quantité absolue d'alumine et de silice exigée pour assurer les réactions pouzzolaniques dans le sol est relativement faible.

La résistance des mélanges sol chaux, est influencée par plusieurs facteurs tels que le type de sol, le type de chaux et la quantité utilisée, le temps de cure et la méthode (température et eau), la teneur en eau, le poids unitaire, le temps écoulé entre le malaxage et le compactage. Ceci a été illustré par Ingles et Metcalf (1972) qui ont noté que les argiles montmorillonitiques donnent de plus faibles résistances avec la chaux dolomitiques qu'avec des chaux semi hydrauliques ou à haute teneur en calcium. D'un autre côté, l'argile kaolinitique produit de plus hautes résistances avec les mélanges à la chaux semi hydraulique et de plus faibles résistances sont obtenues avec la chaux à haute teneur en calcium.

La modification de la résistance est affectée par le taux de chaux et le temps. Les performances à long terme des chaussées stabilisées à la chaux ont aussi été validées (Kentucky Transportation Center, 2002).

La figure III.8 montre l'augmentation de la résistance du sol traité à la chaux avec le temps. (Lazzali, 1997) a montré l'effet de l'ajout de chaux sur la résistance en compression simple et a noté l'effet du temps sur l'évolution de cette caractéristique. La résistance de la bentonite non traitée est passée de 4,248 bars à 5 bars avec 2% de chaux et continue d'augmenter jusqu'à atteindre 11,8 bars au bout de 45 jours. Pour un dosage de 8% de chaux, elle est de 7,78 bars initialement et atteint 90,96 bars à 45 jours de cure.

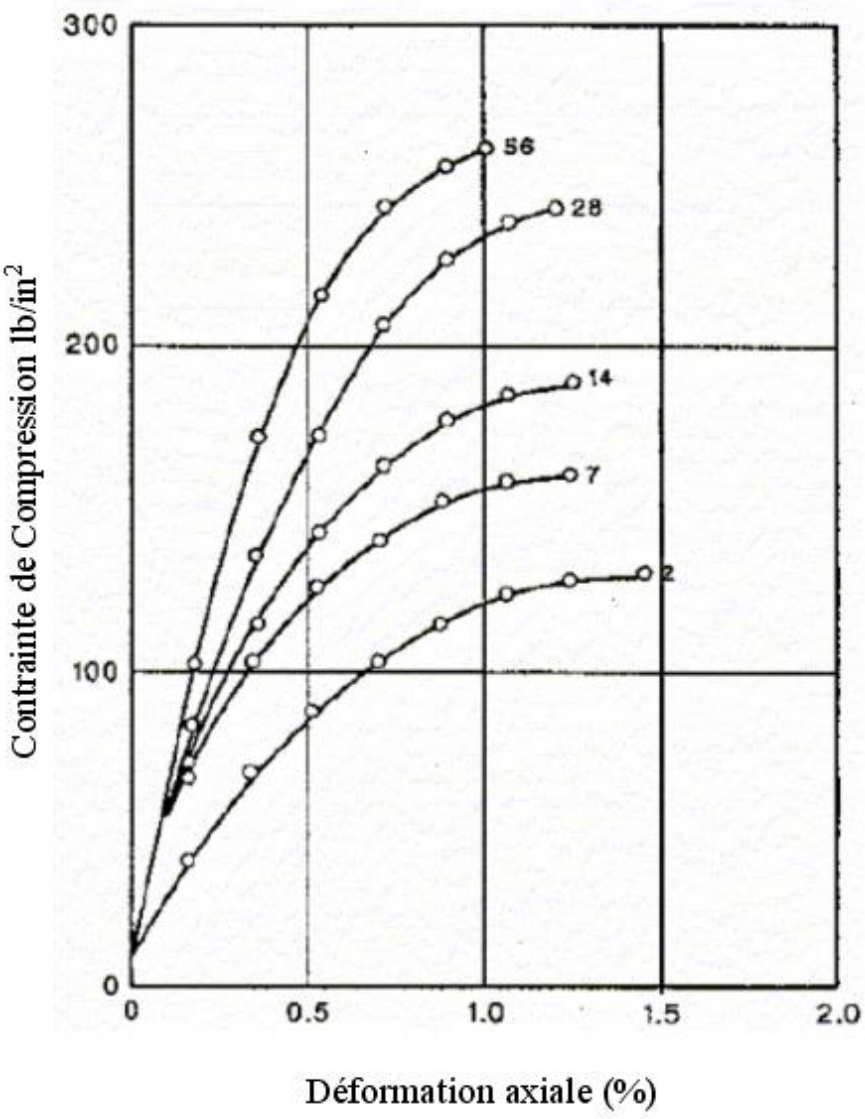


Figure III.8 : Courbe contrainte - déformation d'un sol stabilisé à la chaux pour différents temps de cure (en jours) (Little, 1995)

5.1.5. Gonflement

Le potentiel et la pression de gonflement du sol traité à la chaux subissent une forte réduction (Little, 1995). En effet la réduction de l'indice de plasticité dans pratiquement tous les sols fins stabilisés à la chaux est un bon indicateur de la réduction du potentiel de gonflement. La relation entre l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement est illustrée dans la figure III.9 (empruntée à Little, 1995). Dans cette figure, le pourcentage du gonflement est défini comme le changement de volume subi par le sol quand la teneur en eau augmente jusqu'à la saturation.

La figure III.10 montre la variation de la pression de gonflement en fonction de la

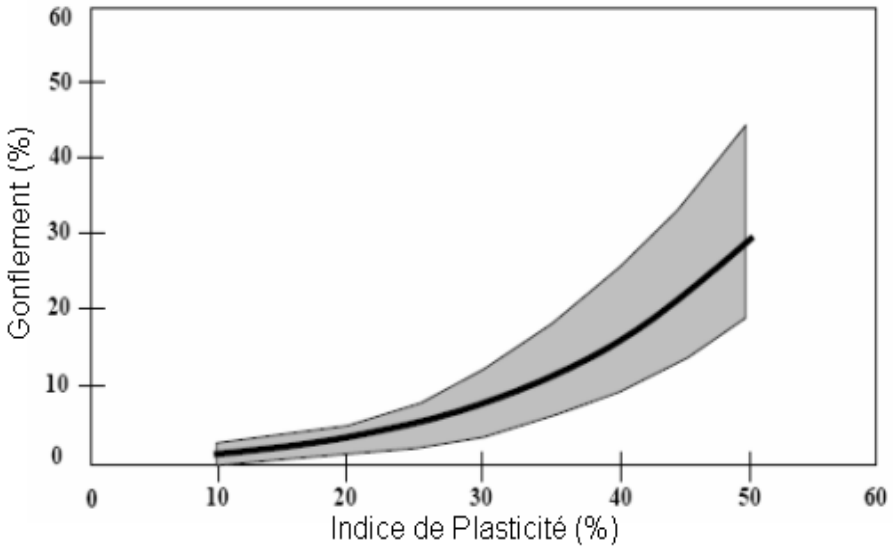


Figure III.9 : Relation gonflement - indice de plasticité
(d'après Little, 1995)

densité sèche du matériau pour différents dosages en chaux. Tel que rapporté par Holtz (1969), des recherches sur la stabilisation des sols par l'U.S. Bureau of reclamation ont montré que l'ajout de 2 % de chaux a réduit le gonflement du sol humide de California

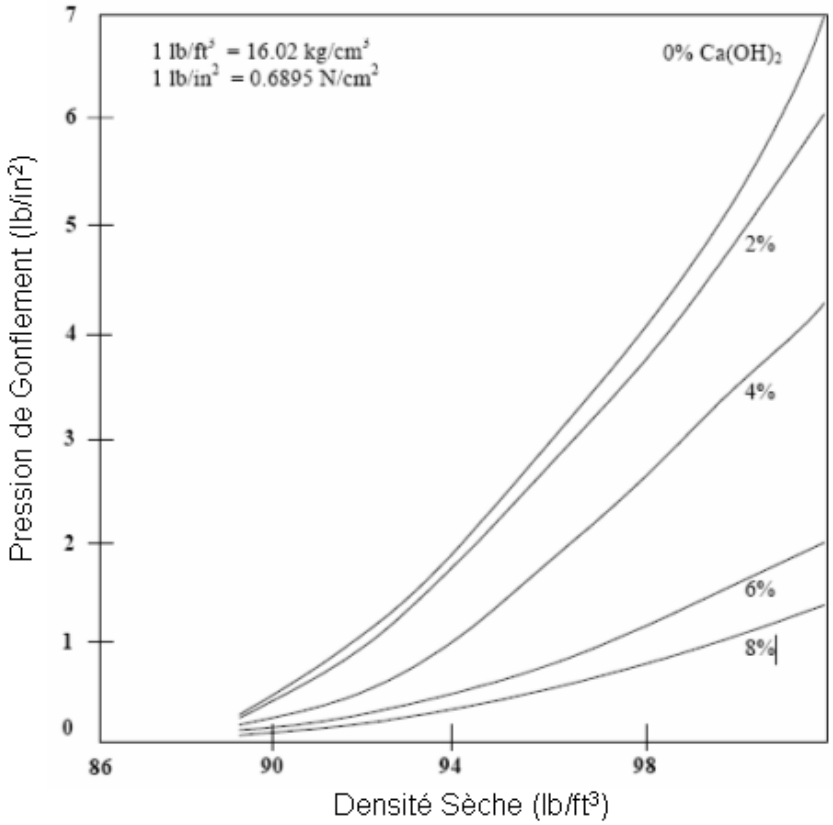


Figure III.10 : Pression de Gonflement – Ajout chaux
(d'après TRB, 1987)

Porteville de 11 à 0 % quant au retrait, de l'état initial humide à l'état sec, a été réduit de 26 % à 15% par addition de 6% de chaux.

Au Dakota du sud, un schiste très expansif a été traité à la chaux, son potentiel de gonflement est passé de 41% à 3,5% après un traitement du sol avec 3% de chaux.

Dans son travail sur le traitement de la bentonite à la chaux, Lazzali, (1997) a trouvé que 2% de chaux fait chuter le potentiel de gonflement de 79% à 22%. Le taux de 8% considéré comme optimal donne une valeur de 7,83%. La pression de gonflement passe de 6,5 bars à 1 bar à partir de 6% de chaux.

5.1.6 C.B.R. (Californian Bearing Ratio)

Le CBR (Californian Bearing Ratio) des sols argileux est amélioré par l'ajout de chaux, En effet, le CBR est amélioré immédiatement après l'addition de chaux et continue à augmenter dans le temps.

Cette augmentation est possible avec l'excès de chaux présent dans le sol, au delà du point de fixation de chaux (Mateous, 1964). Un exemple illustrant ce résultat est donné dans la figure III.11.

6. Observations sur le développement de la résistance

Laguros et al (1956) ont montré que la résistance d'un sol stabilisé croît rapidement notamment les 7 premiers jours de cure, ensuite elle augmente plus lentement à un taux plus ou moins constant pendant 15 semaines environ. Ceci soutient l'idée que des produits de cimentation dus à la réaction entre la chaux et l'argile sont formés dans un premier temps dès que la floculation est terminée (Lees et al. 1982).

Certes, un gain lent et constant dans la résistance après des mois est une caractéristique des sols stabilisés à la chaux. Brandl (1981) a observé que l'augmentation de la résistance a diminué en une année ou deux et que des changements n'ont pas eu lieu même dans les argiles actives après sept ans. Il soutient en plus que l'augmentation de la résistance en fonction du temps est approximativement linéaire avec le logarithme du temps.

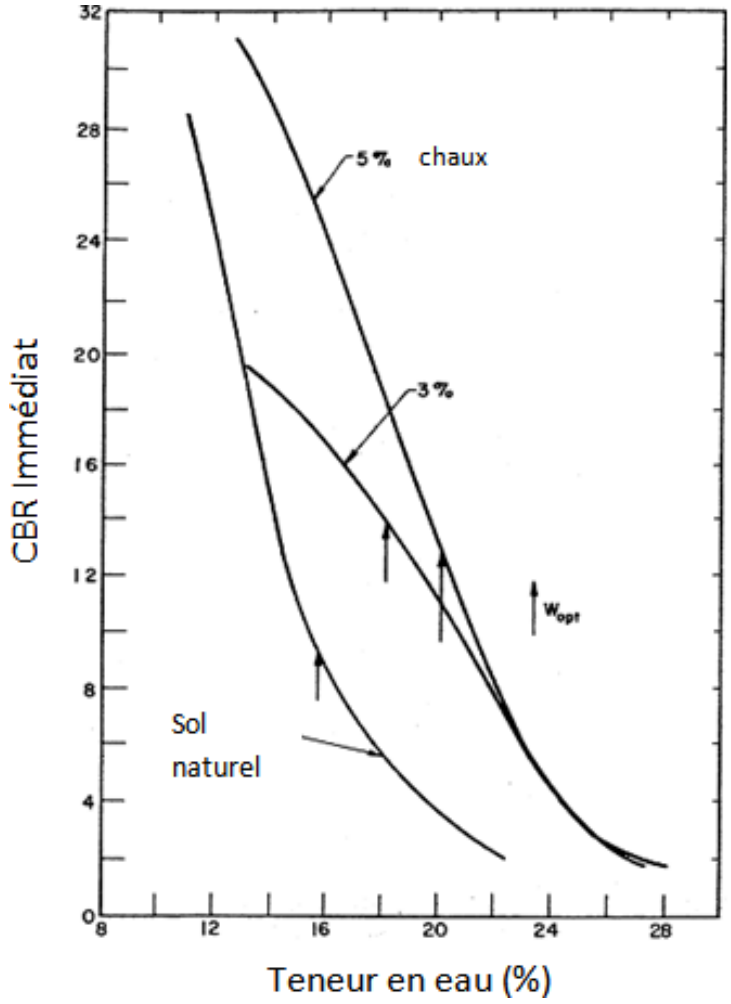


Figure III.11 : Augmentation du CBR immédiat avec le taux de chaux (Litte, 1995)

Ce gain lent et uniforme dans la résistance fournit un facteur de sécurité considérable pour les conceptions basées sur les résistances à 7, 14 ou 28 jours (Bell, 1988).

Laguros et al (1956) ont trouvé que 90% d'humidité relative donne la plus grande résistance finale en comparaison à des conditions de cure différentes et ont rapporté également que de plus hautes températures accélèrent le traitement et donnent de plus grandes résistances. Ceci a été confirmé par Mateous (1964) et Marks et Haliburton (1972). Par exemple, Mateous (1964) a trouvé que les échantillons traités à 35° ont développé deux fois ou plus de résistance que ceux traités à 25°. Le même constat a été fait par Rivière et Leroux (1969).

6.1. La rigidité

Les augmentations de la résistance dans le temps sont suivies par des changements dans la relation contrainte-déformation du matériau (Little, 1999).

L'effort de rupture du sol stabilisé est beaucoup plus grand que celui du sol non stabilisé. Alors que la déformation de rupture est plus faible dans le sol stabilisé (généralement, une déformation de 1% dans le sol stabilisé contre 3% dans le sol non stabilisé). Les essais de laboratoire (chargement triaxial répété, test de traction indirecte) et sur chantier (essai de vibration) ont confirmé les augmentations dans le temps des propriétés de résilience des matériaux stabilisés à la chaux. La figure III.8 montre qu'avec le temps, pour une argile stabilisée à la chaux, la contrainte de rupture augmente et la déformation correspondante diminue.

6.2. La fatigue

La résistance à la fatigue est liée au nombre de charges qui peuvent être portés par un matériau à une contrainte donnée. Elle représente une considération importante dans l'évaluation du mélange sol chaux ou agrégat chaux. Les effets du gain en résistance produits par les réactions pouzzolaniques sont souvent substantiels pour les sols réactifs. Les courbes de réponse obtenues pour différents mélanges sol-chaux (Swanson & Thompson, 1967) sont analogues à ceux obtenus pour quelques agrégats traités au ciment.

6.3. La durabilité

L'aptitude des sols stabilisés à la chaux à résister aux effets préjudiciables de l'humidité et des cycles gel-dégel dans le temps a été évaluée de plusieurs manières ; sur chantier et au laboratoire (par exemple, le trempage conjointement avec l'essai résistance/rigidité, essais cyclique gel-dégel). Les résultats de ces évaluations ont souvent montré des effets préjudiciables insignifiants de l'environnement sur le niveau résistance/rigidité produit par l'addition de chaux. Comme exemple, une étude Illinoise a trouvé que le rapport des résistances en compression du sol trempé et non trempé stabilisé à la chaux est assez élevé, il varie entre 0,7 à 0,85 (Thompson, 1970). Les spécimens trempés n'atteignent que rarement la saturation complète et, dans la plupart des cas, le degré de saturation est de 90 à 95%.

La résistance au gel des sols traités à la chaux augmente rapidement avec le temps de cure et pour une quantité de plus de 2% chaux. Elle est suffisamment élevée après 3 mois (Brandl, 1981). De plus, le taux et la profondeur de la pénétration du gel, est réduite par le traitement à la chaux à cause de la floculation qui augmente l'indice des vides et en retour crée une plus pauvre conductivité de la chaleur.

6.4. Le module de Young ou module d'élasticité

Des essais réalisés par Holm (1979), ont montré que la stabilisation des sols à la chaux augmente la valeur du module de Young. Ce module a augmenté de 15 fois après trois semaines de traitement et autour de 35 fois après 16 mois. Le module de Young est passé de 300 kN/m², après traitement à la chaux et après les périodes mentionnées, respectivement à 4,4 MN/m² et 10,8 MN/m². Plus encore, l'accroissement de ce module augmente avec la température de cure (Al Rawi, 1981). Selon Brandl (1981), un petit ajout de chaux seulement est suffisant pour rendre le comportement du sol friable.

La montmorillonite subit une augmentation du module de Young avec seulement 2% d'ajout de chaux. La valeur optimale est obtenue à 2 à 3% d'ajout.

Bell et Tyrer (1987), ont noté que la kaolinite a enregistré un accroissement rapide du module de Young avec un petit supplément de chaux (entre 2 et 4%) après lesquels, l'accroissement a diminué même avec une grande quantité de chaux.

6.5. La perméabilité

Al Rawi et Awad (1981) ont indiqué que la perméabilité des sols argileux est augmentée avec le traitement à la chaux comme effet de la floculation du sol. Plus la fraction argileuse du sol est élevée plus la perméabilité du mélange sol chaux augmente. Ils ont trouvé que ces sols compactés dans le versant sec de l'optimum Proctor, ont développé une perméabilité plus élevée que ceux compactés dans le versant mouillé. De plus, ils ont identifié des teneurs en eau de confection particulières qui ont donné des perméabilités minima pour tous les mélanges sol chaux indépendamment de la quantité de chaux ajoutée. En plus, avec le temps, la perméabilité décroît avec toutes les teneurs en eau des échantillons testés. Comme l'a expliqué Brandl (1981) cette perméabilité est due à la production des agents cimentants gélatineux dans le temps

qui occupent une quantité croissante des vides et qui durcissent éventuellement. Il faudra garder à l'esprit que les particules stabilisées sont entourées de plus larges films d'eau liée qui réduit l'espace des vides.

Chapitre IV

Matériaux et méthodes

1. Rappel des objectifs de l'étude

Le premier problème à résoudre dans la conception de la stabilisation d'un sol avec un ajout, la chaux dans le cas présent, c'est de connaître le taux optimal d'ajout à adopter pour un projet de stabilisation.

Les exigences de performance peuvent varier d'un projet à un autre en fonction du sol à traiter et des résultats attendus des couches de chaussées, ou des sols à traiter. Elles peuvent dépendre également du coût à mettre dans la construction projetée. Rationnellement parlant, l'approche la plus judicieuse pour la conception d'une stabilisation est la détermination, par le verdict de l'expérience, du taux de chaux optimum qui fournit une résistance maximale répondant aux exigences de durabilité.

Dans la pratique, cette approche est fastidieuse, coûteuse et ne peut être considérée pour des ouvrages linéaires importants, ce qui est encore plus vrai au stade de faisabilité du projet. La recherche propose comme alternatives plusieurs méthodes indirectes pour arrêter approximativement ce taux par des essais de laboratoire simples à réaliser. Chou (1987) a explicité outre la méthode performantielle de Thompson, la méthode de Eades et Grim (1960) et la méthode de Texas. Ces méthodes sont analysées dans ce travail sur la base d'un exemple et les résultats donnés par l'une et l'autre des deux méthodes sont comparés et discutés et des perspectives pour l'amélioration de l'apport de ces méthodes sont proposées.

On présente dans ce chapitre, la consistance du programme expérimental articulé autour les objectifs de l'étude, c'est à dire le matériau objet de ce programme et les méthodes et procédures utilisées pour le réaliser.

2. Programme expérimental

Il comporte les étapes suivantes :

- **Etude des caractéristiques du sol à traiter par :**
  - L'identification des matériaux utilisés dans l'étude à l'aide de l'analyse granulométrique, l'analyse chimique et les essais de plasticité,
- **Détermination du taux de chaux à retenir dans la stabilisation du sol à la chaux, défini par :**
  - La méthode de la plasticité,
  - La méthode du pH-mètre ,
  - La méthode basée sur la mesure de la performance mécanique des mélanges (pour évaluation).
- **Mise en évidence du degré de pérennité des effets immédiats de la stabilisation à la chaux par abordée sur la base de :**
  - L'analyse granulométrique sur les sols traités à différents taux de chaux,
  - La détermination de la cinétique et du taux de gonflement libre en solution (GLS) des mélanges sol – chaux.
- **Analyse de l'effet du temps d'attente sur l'état du sol stabilisé, sous l'angle de**
  - L'étude des caractéristiques du compactage du sol stabilisé
  - La détermination des limites de consistance du sol traité à la chaux.

Pour répondre à ces objectifs du mémoire, le travail a été structuré en 3 parties :

- La détermination du taux de chaux optimal par les méthodes indirectes précitées et par l'expérimentation.
- La mise en évidence des effets immédiats enregistrés dans la structure des sols

stabilisés à la chaux observés sous l'angle de la distribution granulométrique.

- L'Analyse de l'effet du temps d'attente sur l'état du sol stabilisé étudié sur la base :

  ✓ des caractéristiques du compactage du sol stabilisé à la chaux et

  ✓ des limites de consistance du sol stabilisé.

3. Matériaux utilisés

Pour obtenir un sol argileux de moyenne portance, on a constitué un sol par mélange d'un sol naturel à (80%) et de bentonite à (20 %) pour y constituer la fraction argileuse. Ce sol reconstitué est noté SNB dans cette étude. On a procédé ensuite à sa stabilisation par la chaux. On commence le travail par identifier les caractéristiques de ces matériaux. Ces caractéristiques sont déterminées par analyse granulométrique et par détermination des limites de consistance selon les procédures en vigueur.

3.1. Sol naturel

Le sol naturel provient du terrain de l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics. Il a été récupéré par creusement manuel à une profondeur de 40 cm. Il est de couleur ocre, sa teneur en eau naturelle est de 5%. Sa composition chimique est donnée dans le tableau 1.

Tableau IV.1. : Composition chimique du sol naturel (SN)

SiO_4^- %	**SiO_2** %	**CaO** %	**Fe_2O_3** %	**Al_2O_3** %	**Insolubles** %	**PF (à 1000°C)** %
traces	46,38	16,80 %	7,20	9,28	80,91 %	18,36

On note la présence d'un pourcentage d'oxyde de calcium non négligeable et aussi l'absence de sulfates, ce qui prédispose le sol au traitement par la chaux (Habib, 1988). Sa courbe granulométrique représentée sur la figure IV.1 montre qu'il est constitué de 80 % d'éléments inférieurs à 0,4 mm et de 51% d'éléments inférieurs à 0,02mm dont 27 % sont inférieurs à 0,002mm. Son argilosité est de 27 % et son activité est de 0,7.

Sa limite de liquidité est de 40%, sa limite de plasticité est de 20% avec un indice de

plasticité de 20%. L'abaque de Casagrande donnée sur la figure IV.2 permet de classer ce sol comme ayant une plasticité moyenne (SN).

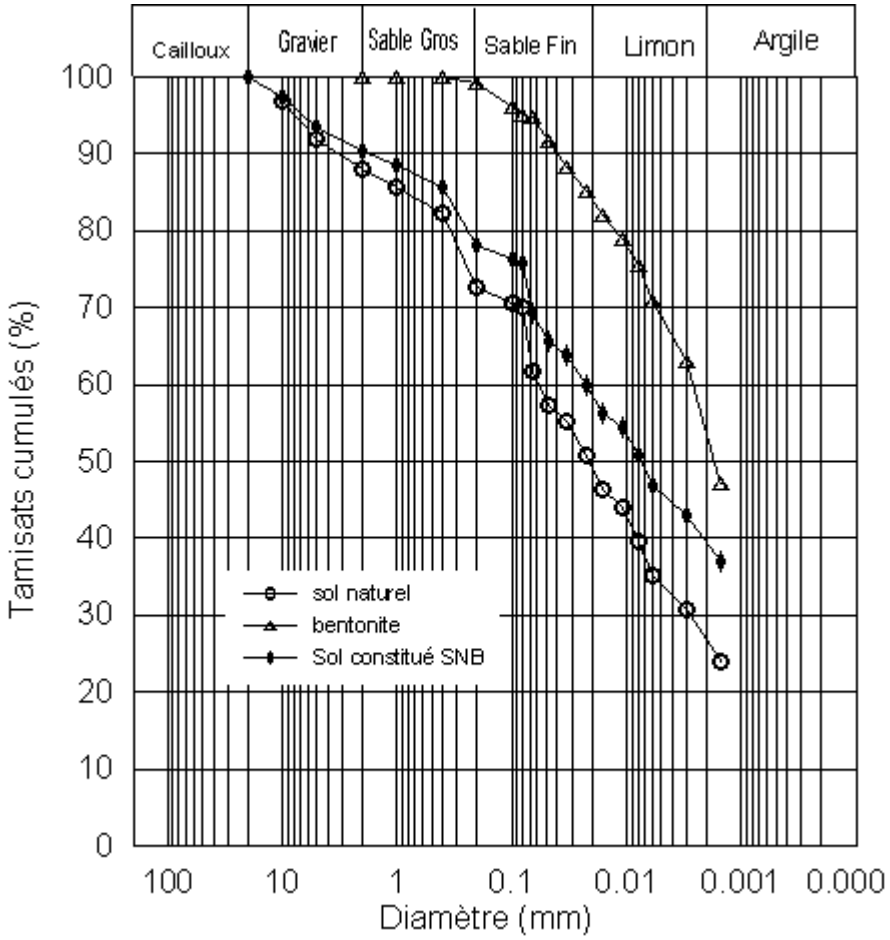


Figure IV.1 : Courbes granulométriques des matériaux utilisés

3.2. La bentonite

La bentonite utilisée, provient de la région de M'zila à Mostaghanem. Elle a été gracieusement fournie par l'entreprise BENTAL. Elle est de couleur grise et se présente sous forme de poudre finement broyée. Sa composition chimique est donnée dans le tableau IV.2. Sa teneur en eau naturelle est de 9%. La courbe granulométrique représentée sur la figure IV.1 montre qu'elle est constituée de 95% d'éléments fins. Elle est très plastique. Sa limite de liquidité est de 181%, sa limite de plasticité est de 30% et son indice de plasticité est de 151%. Sa situation sur l'abaque de Casagrande, montre que cette bentonite est très plastique.

Tableau IV.2. : Composition chimique de la bentonite

SiO_2(%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3(%)	MgO_3(%)	CaO_2(%)	Na_2O(%)	**PF** (%)
58	19	3	1	2	4	13

3.3. La chaux

Les propriétés de la chaux utilisée dans la présente étude sont fournies dans la fiche technique du matériau et présentées dans le tableau IV.3. Les limites de consistance sont déterminées au laboratoire selon la norme standard.

Tableau IV.3 : Propriétés de la chaux

Densité en vrac	0,8 - 1,2	**Résistance mécanique à 28j (bars)**	0,5 – 1
Surface spécifique (cm^2/g)	3000 – 10000	**Limite de liquidité (%)**	65
Passants au tamis 200µ (%)	> 90	**Limite de plasticité (%)**	41
Passants au tamis 80µ (%)	> 50	**Indice de plasticité (%)**	24

3.4. Le sol reconstitué

La courbe granulométrique du sol reconstitué (figure IV.1) montre qu'il compte 76% d'éléments fins (inférieurs à 0,08 mm) dont 40% sont inférieurs à 0,002 mm. On peut classer SNB comme un sol fin. Le coefficient d'uniformité est élevé. La granulométrie est étalée.

La limite de liquidité du sol reconstitué est de 70%, sa limite de plasticité est de 20%, son indice de plasticité est de 50%. Son argilosité est de 37 % et son activité est de 1,35 >1,25, il est donc gonflant d'après la classification de Skempton (1953). Sur l'abaque de Casagrande (figure IV.2), il est classé comme une argile inorganique très plastique (SNB). Sa courbe de compactage représentée sur la figure V.8 donne une densité sèche maximale de 1,69 et une teneur en eau optimale de 16,8 %.

Le sol étant plastique et gonflant, il peut donc prétendre répondre au traitement. L'absence de sulfates de sa composition chimique et la valeur de son indice de plasticité supérieure à 30, sont des éléments qui militent pour son traitement à la chaux

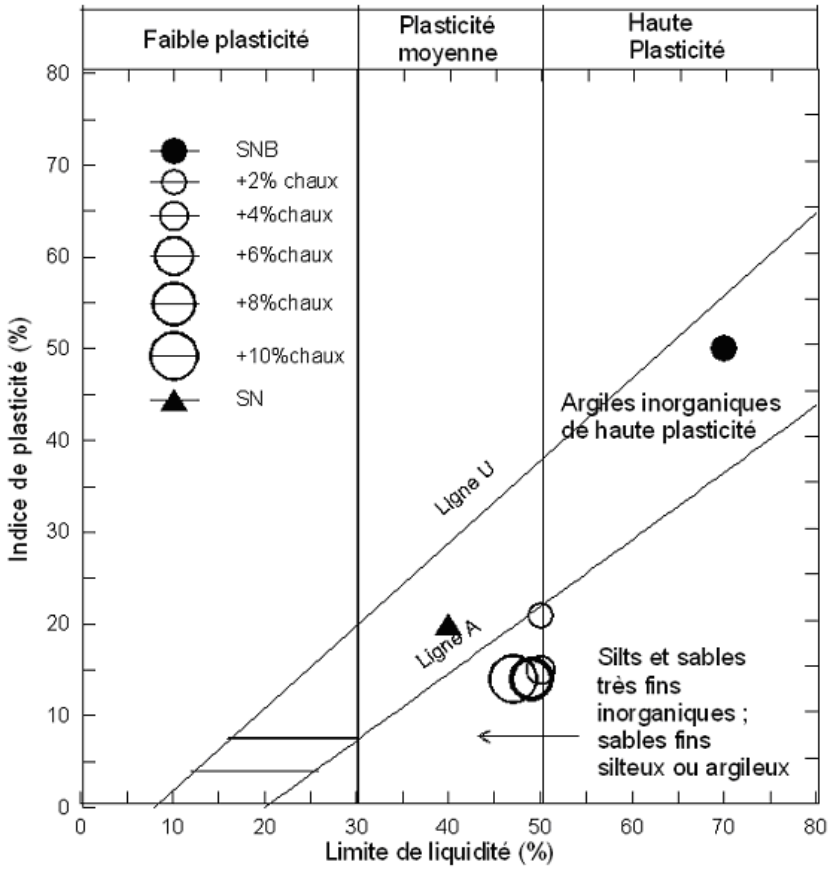


Figure IV.2 : Classification des matériaux, abaque de Casagrande

afin qu'il soit utilisé dans le sol support de chaussées.

4. Procédures et essais

Comme rappelé ci-dessus, le sol reconstitué SNB, a été soumis à une série d'essais dans le but d'arrêter le taux de chaux optimum à retenir pour la stabilisation. Ce taux sera déterminé par la méthode classique de la plasticité, par la méthode dite du pH et par la méthode de la résistance à la compression simple à 28 jours.

4.1 Détermination du taux de fixation de la chaux

✓ ***Plasticité***

On a déterminé les limites de plasticité et de liquidité selon les normes standards, pour des échantillons de SNB sans ajout et d'autres avec des différents dosages de chaux. Des échantillons de sol de 200g sont préparés avec 80 % de sol naturel et 20% de bentonite. Ces échantillons sont traités à des dosages de chaux différents variant de 2

à 10 % à pas de 2%. Ils sont malaxés à l'eau déminéralisée et gardés couverts pendant 24 heures avant de servir pour les essais des limites de plasticité et de liquidité. Le taux de chaux au-delà duquel aucune variation de la plasticité n'est enregistrée est appelé taux de fixation de chaux.

4.2 Détermination du taux de demande en chaux par la méthode du pH-mètre

✓ ***Détermination des pH des mélanges en solution***

Des quantités de sol SNB constitués des passants au tamis 4mm et de la bentonite (80% contre 20%) ont été utilisées dans la constitution de mélanges avec des taux de chaux différents de 0% à 10%, placées ensuite dans des flacons avec une quantité d'eau distillée suivant la méthode de Eades et Grim (1960) (figure IV. 3). Les pH des solutions sont déterminés à l'aide d'un pH mètre standard préalablement étalonné. Selon la méthode originale, le pourcentage de demande en chaux (lime demand) est arrêté par le taux de chaux du mélange correspondant à un pH de 12,4.
Dans le cas présent, on a préféré adopter comme limite à atteindre le pH de la chaux utilisée.

La procédure de l'essai désigné sous le nom de « l'essai de Eades et Grim » Annexe1



Figure IV.3 : Procédure de détermination du p H des solutions – méthode de Eades- Grim
(à gauche pH-mètre avec sonde – à droite flacons contenant solutions sol – %chaux)

ASTM C-977, est rappelée dans les étapes suivantes :

- Prendre des échantillons représentatifs séchés à l'étuve des passants du tamis 4 mm, peser 20 grammes de sol à 0,1 grammes de précision, les verser dans les bouteilles en plastique de 150 ml (ou plus grandes) avec des bouchons à visser.

- Puisque la plupart des sols exigent entre 2 et 5 % de chaux, il est recommandé de placer des bouteilles avec des pourcentages de chaux de 2, 3, 4, 5 et 6%. Ceci pour s'assurer dans la plupart des cas, que le pourcentage de chaux exigé peut être déterminé en 1 heure. Peser la chaux à 0,01 grammes près et l'ajouter au sol. Bien agiter pour mélanger le sol et la chaux secs.

- Ajouter 100 ml d'eau distillée aux mélanges.

- Agiter le mélange chaux-sol-eau jusqu' à ce qu il n y ait plus de traces du matériau sec sur le fond (pendant 30 secondes au minimum).

- Agiter la bouteille pendant 30 secondes toutes les 10 minutes.

- Après 1 heure, transférer une partie du mélange (boue) dans un bêcher en plastique et mesurer le pH.

  Le pH-mètre doit être équipé d'une électrode et doit être étalonné avec une solution tampon de pH 12 (10 dans cette étude).

- noter le pH pour chacun des mélanges de sol-chaux. Si les lectures de pH vont à 12,4, le plus faible pourcentage de chaux qui donne un pH de 12,4 est le pourcentage exigé pour stabiliser le sol (Figure IV.4).

Si le pH ne dépasse pas 12,3 et 2 taux de chaux donnent la même lecture, le plus bas pourcentage qui donne un pH de 12,3 est celui exigé pour stabiliser le sol.

Si le pH le plus élevé est 12,3 et seulement 1 taux de chaux donne un pH de 12,3, il faudra prévoir des bouteilles additionnelles d'essai avec un plus grand pourcentage de chaux.

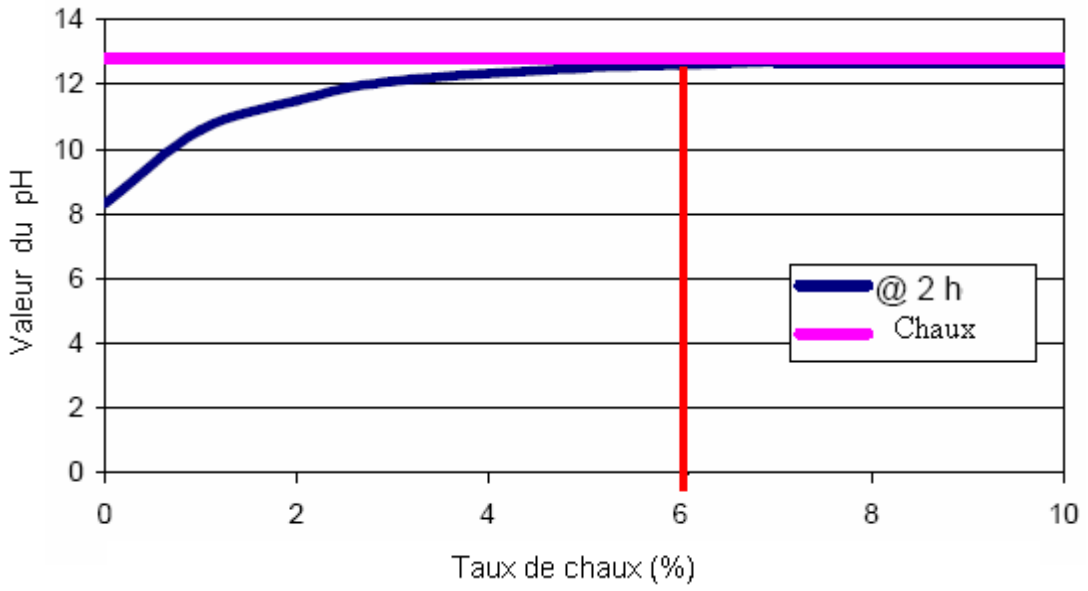


Figure IV.4: Détermination du pH des solutions de sol – chaux
selon la méthode de Eads & Grim (1966)

Les limitations principales de l'essai de pH est qu'il n'établit pas si le sol réagira avec la chaux pour produire une augmentation substantielle de résistance, et les données de résistance ne sont pas produites pour l'usage de l'évaluation de la qualité de mélange.

4.3 Détermination du taux de demande en chaux par la méthode de la résistance en compression simple à 28jours (RCS)

- ✓ ***Résistance à la compression simple***

Pour étudier l'effet de la chaux sur la résistance à la compression simple du sol testé et déterminer le taux de chaux optimum selon le critère de la résistance à 28 jours, des échantillons cylindriques (h = 70 mm, d = 35 mm) ont été fabriqués par compactage statique en trois couches à l'aide d'une presse à une teneur en eau de 18% et une densité sèche de 1,65. Les mélanges ont été préparés dans les mêmes conditions précédentes.

Les cylindres ainsi confectionnés ont été gardés pendant 28 jours dans des sacs étanches et soumis par la suite à des essais d'écrasement à l'aide d'une presse triaxiale (figure IV.5).

Pour apprécier l'effet du temps sur la résistance, l'écrasement s'est fait à 1, 7 et 28 et

60 jours après la confection des éprouvettes.

Les échantillons à 60 jours n'ont pas donné des résultats qui se prêtent à la comparaison à cause des changements des conditions atmosphériques et du matériel



a) Introduction sol de la 1ère couche dans le carottier

b) Compactage de la 3ème couche dans carottier plus rehausse



d) Récupération de l'éprouvette compactée du carottier fendu

Figure IV.5. Photos montrant détails préparation des éprouvettes pour l'essai compression simple

au laboratoire. Ils ont été écartés de l'analyse.

5. Mise en évidence des effets immédiats dans la structure

- ✓ ***Distribution granulométrique du sol stabilisé***

Le sol SNB ainsi que des mélanges SNB – chaux (à 4%, 6%, 8%, 10% de chaux) préalablement hydratés ont subi une analyse granulométrique selon la norme standard. Cet essai est intervenu après la préparation des mélanges à une même teneur en eau de 18% et une maturation dans des sacs étanches pendant 24 heures, suivie d'un compactage dans le moule Proctor normal. Les échantillons compactés ont été gardés 24 heures encore dans des sacs étanches, après quoi, une analyse granulométrique par voie humide (tamisage et sédimentométrie) a été effectuée. Des courbes granulométriques sont tracées pour montrer les changements subis par la texture du sol.

- ✓ ***Etude de la cinétique et du gonflement libre en solution***

On étudie le gonflement d'une petite quantité de sol dans une solution. Holtz et Gibbs (1954) présentent le gonflement libre en solution comme un moyen simple pour prédire le gonflement d'un sol. Ce paramètre peut s'avérer une indication précieuse au stade préliminaire des conceptions et sa vulgarisation est préconisée dans l'identification des sols.

Selon ces auteurs, si le G.L.S, explicité ci après, est de l'ordre de 100%, le sol pourrait être gonflant, pour des G.L.S. inférieurs ou égaux à 50% les sols ne posent pas de problèmes de gonflement.

Le coefficient du gonflement libre en solution est déterminé par :

$$G = (V_f - V_g)*100 \ / \ V_g$$

V_f volume final de la suspension (donné par la hauteur)

V_g volume initial des grains (donné par la hauteur)

Procédure de l'essai

Iltis (1979) a énoncé la procédure de l'essai du G.L.S. dans les étapes suivantes (Figure IV.6) :

- Mettre 25g de sol dans une éprouvette graduée (a), mesurer la hauteur Hg.
- Ajouter 100 cm^3 environ de solution (eau distillée dans cette étude) (b),
- Agiter de façon régulière pendant une minute pour mettre le sol en suspension (b).
- Remplir jusqu'à 250 cm^3 avec la solution.
- Agiter une nouvelle fois pendant une minute.
- Etape supplémentaire pour les besoins de la cinétique de la floculation, mesurer

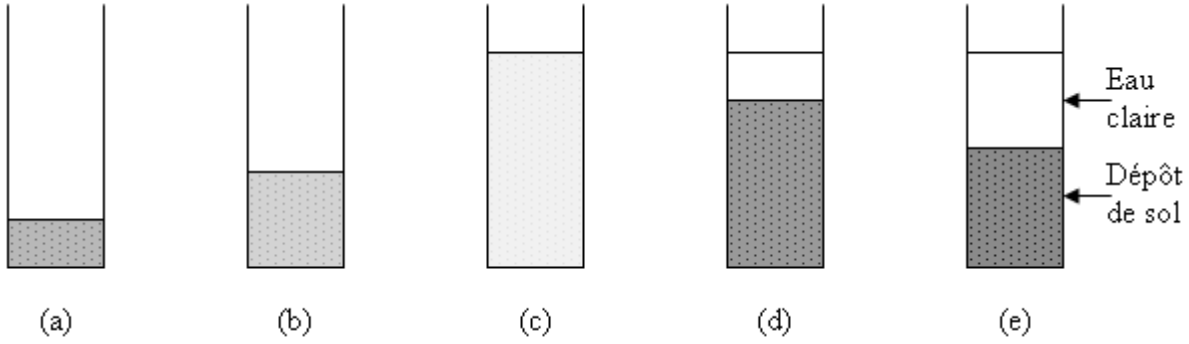


Figure IV.6 : Schématisation de la procédure de mesure du GLS

à des intervalles de temps réguliers la hauteur de dépôt jusqu'à stabilisation (d).

- Noter et reporter la hauteur finale de dépôt (e).

Les 25 g de sol étudié sont constitués du sol à traiter et des dosages de chaux de 2 à 10% avec un incrément de 2. On présente sur une courbe les différentes cinétiques en fonction du temps.

6. Etude de l'effet du temps d'attente sur l'état du sol stabilisé

✓ ***Sur les limites de consistance***

Pour vérifier l'effet du temps d'attente sur les caractéristiques de plasticité du sol stabilisé, on a procédé à la préparation des échantillons de sol constitués des passants du tamis 4mm, traités avec 6% de chaux à des teneurs en eau différentes (utilisées

dans le compactage du sol). Suivant le même principe, les échantillons sont préparés et stockés dans des sacs en plastique pendant des durées de 1 jour, 4 jours et 7jours. Ils sont soumis par la suite à des essais de détermination des limites de consistance.

- ✓ ***Sur Les caractéristiques du compactage***

Afin de vérifier l'effet du temps d'attente sur les caractéristiques du compactage, on a préparé les mélanges de sol traités à 6% de chaux et des teneurs en eau différentes. Ces échantillons ont été gardés dans des sacs étanches à des temps de maturation de 2 heures, de 24 heures et de 48 heures. Ils ont été compactés dans un moule Proctor normal.

7. Etude des effets de la chaux sur quelques caractéristiques du sol stabilisé

- ✓ ***Compactabilité***

Dans le but de déterminer les caractéristiques définissant la compactabilité du sol et l'influence de la chaux sur ces caractéristiques qui sont la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale, on fait soumettre le sol traité à différents dosages de chaux à l'essai Proctor normal.

Les échantillons de sol à compacter sont préparés la veille. Le sol non traité est mélangé à la chaux à différents taux et à des teneurs en eau différentes. Les échantillons sont placés dans des sacs en plastique et gardés pendant 24 heures.

A partir de l'essai Proctor normal suivant la norme standard on a déterminé les caractéristiques optimales du sol reconstitué traité à 2, 4, 6, 8 et 10% de chaux.

- ✓ ***Indice CBR immédiat***

Une fois les caractéristiques du compactage (Proctor modifié) tirées, on a procédé à la détermination de l'indice CBR immédiat. On a déterminé le CBR à la teneur en eau optimum et à d'autres teneurs en eau. Cette méthode permet d'avoir des CBR à la même teneur en eau pour le sol traité à différents taux de chaux. A cet effet, on a utilisé le moule et la presse CBR.

Cette partie du travail a été effectuée dans le cadre d'un thème de fin d'étude d'Ingéniorat soutenu à l'ENSTP et encadré par l'auteur de ce mémoire.

- ✓ ***Gonflement***

Afin d'étudier le gonflement des mélanges à différents taux de chaux et d'évaluer l'effet de l'ajout de chaux sur ce paramètre, une série d'essais à l'oedomètre a été réalisée sur des échantillons confectionnés par malaxage à une teneur en eau de 18% et une densité sèche de 1,65 et compactés statiquement, en trois couches, dans l'anneau de l'oedomètre (h =19 mm, d = 70mm) à l'aide d'une presse d'échantillonnage (Figure IV.5).

8. Synthèse du programme expérimental

Pour clarifier la consistance du programme expérimental, on synthétise dans le tableau IV.4, les différents essais effectués dans le cadre de cette étude.

Tableau IV.4 : Synthèse des essais effectués

Essais	**Matériaux & % chaux**	**Nombre d'essai**	**Total**
Essais chimiques	SN, Bentonite	2	2
Granulométrie Tamisage+Sédimentométrie	SN, Bentonite ,SNB,SNB+4% ,+6% ,%,+10%	7*2	14
Limites de liquidité & Limite de plasticité	SN ,Bentonite ,SNB,SNB+2%,4%,+6%,+8%,+10%, Chaux	9 + 9	18
GLS Taux et cinétique	SN,Bentonite,SNB ,SNB+1% ,+2% ,+3% ,+4% +5% ,+6%,+8%,+10% , Chaux	12*2	24
Compactage Proctor normal	SN, SNB, SNB+2%,+4%,+6%,+8% +10%	7	7
Teneurs en eau et contrôle d'humidité	SN, Bentonite, SNB, SNB+2%, +4%, +6%, +8% ,+10%	8	8
Proctor Normal	SNB+6%chaux imméd-24h, 48h	3	3
Limites temps attente	SNB+6% W= 12, 16, 18, 20%	8	8
PH	SNB,SNB+1,+2% +3%, +4%,+5%,+6% +8%,, +10%, Chaux	10	10
RCS : 28J 1J, 7J, 60J	SNB,SNB+2%,+4%+6%+8%,+10%, +12%	7 + 6*3	7 + 18
Gonflement libre 1j, 7j, 28J	SNB, SNB+2%,+4%,+6%, +8%	5*3	15
Proctor modifié & Indice CBR immédiat	SNB , +4%, +6%, +8%	4*2	8

Chapitre V

Présentation et Interprétation des résultats

On donne en premier lieu les résultats des taux optima déterminés par les méthodes analysées dans cette étude, suivis des effets réalisés sur les caractéristiques du sol traité à la chaux. On donne également les résultats de l'analyse de la durabilité de la réaction sol – chaux et de la mise en évidence des modifications produites. On présente les effets de quelques paramètres sur la réaction pour la discussion.

1. Détermination du taux de chaux optimal

1.1 Détermination du pourcentage de fixation de chaux (lime fixation percentage)

On rappelle que le taux de fixation de chaux est arrêté par le pourcentage de chaux à partir duquel l'indice de plasticité n'est plus affecté par la quantité de chaux rajoutée. La variation des limites de consistance du sol stabilisé avec la teneur en chaux est donnée dans la figure V.1. Les courbes montrent que la limite de liquidité des

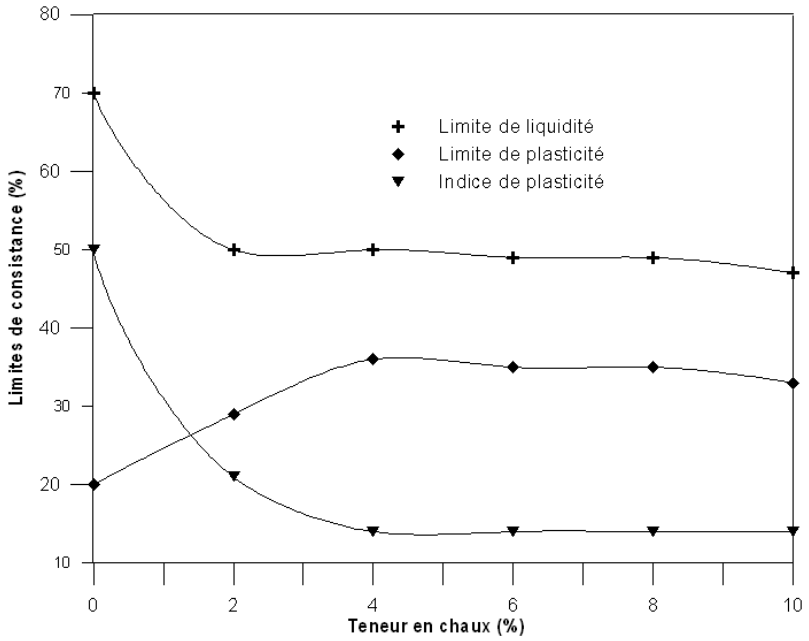


Figure V.1 : Variation des limites de consistance
en fonction du taux de chaux.

mélanges chute et se stabilise à partir de l'ajout de 2%. Ce résultat s'explique par le fait qu'avec l'ajout de chaux les particules fines du sol s'agglomèrent et deviennent plus grosses elles offrent donc une surface spécifique moindre et prennent de plus faibles couches d'eau d'où la diminution de la limite de liquidité.

La limite de plasticité par contre, augmente avec l'ajout de chaux et se stabilise à partir de 4% de chaux. Ce comportement s'explique 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 elles deviennent encore plus grandes rendant la quantité d'eau nécessaire pour envelopper un amas de particules, plus importante.

Sur la base des résultats de la plasticité, il ressort que le pourcentage de fixation de chaux se situe à 4%.

1.2 Détermination de la demande en chaux du sol (lime demand)

1.2 .1 Par la méthode du pH-mètre (Eades et Grim)

La courbe des pH en fonction des pourcentages de chaux est donnée dans la figure V.2. On remarque sur cette courbe que le pH de la solution augmente, donc l'alcalinité du milieu augmente avec le taux de chaux ajouté et cela jusqu'à une teneur de 6% à partir de laquelle il se stabilise à la valeur du pH de la solution de chaux. Ce taux est appelé la demande en chaux du sol.

Il est important de souligner que le sol objet de l'étude, présente déjà un pH de 10 qui est donc fortement alcalin.

Les gains en pH introduits sont tout de même importants avec seulement 2% et sont néanmoins moins prononcés (pente moindre) jusqu'à 6%. La demande en chaux du sol stabilisé est de 6%.

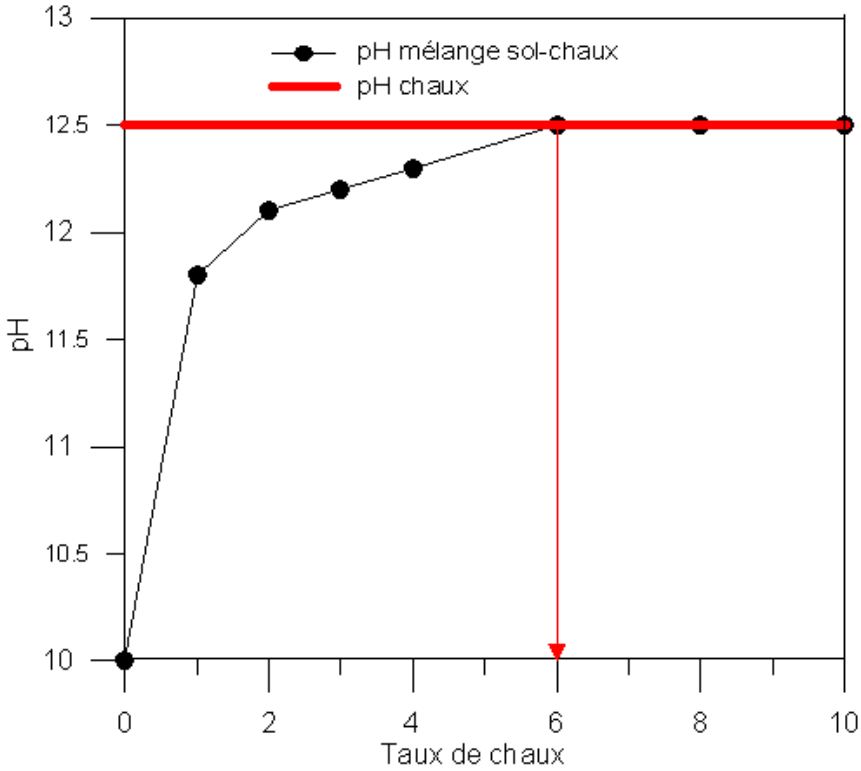


Figure V.2 : Variation du pH des mélanges en fonction du taux de chaux

1.2.2 Par la méthode basée sur la résistance en compression simple à 28 jours

Les courbes de la résistance à la compression simple obtenues à 1, 7 et 28 jours en fonction du dosage en chaux sont rassemblées dans la figure V.3. La courbe à 28 jours montre que la résistance du sol stabilisé augmente dans un premier temps presque proportionnellement avec le taux de chaux et cela jusqu'à un taux de 6%.

Au-delà de ce pourcentage, l'augmentation de la résistance est moins marquée et la courbe semble s'acheminer vers une direction asymptotique horizontale, bien que certains auteurs parlent de courbes avec un maximum (Little, 1995, Evans & al., 2004)

On remarque que pour les courbes de résistance à 7 et 28 jours de cure, l'augmentation est continue avec le taux de chaux. Pour la courbe de 1 jour, on ne constate aucun effet de l'ajout de chaux sur la résistance. L'augmentation de la résistance dans le temps est due à la formation d'agents de cimentation qui lient les particules argileuses et qui sont les silicates de calcium hydratés (CSH).

A un jour de cure, l'augmentation de la quantité de chaux se traduit par des variations insignifiantes sur la résistance car les agents de cimentation sont à l'état de gel et n'ont

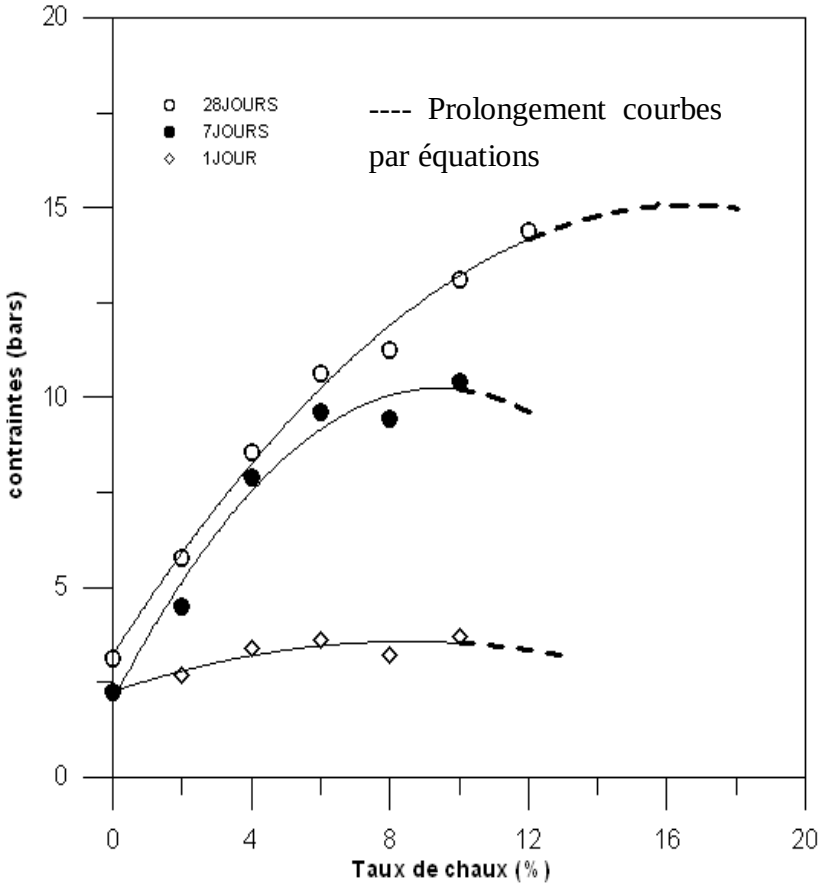


Figure V.3 : Variation de la résistance en fonction du taux de chaux et du temps

probablement pas encore enclenché la phase de durcissement. Cette phase est le résultat du processus de cristallisation de nouvelles espèces.

Il découle de ce qui précède que l'augmentation de la résistance mesurée à partir de 7 jours de cure est importante jusqu'à 6% de chaux (7 bars de gain) et semble s'infléchir pour des taux plus importants. Il n'en demeure pas moins, cependant que les courbes de résistance mesurée à 7 et à 28 jours de cure semblent confondues pour les teneurs en chaux inférieurs à 6%.

Elles s'éloignent pour des teneurs supérieures à ce taux suggérant, pour les taux inférieurs à 6% l'épuisement de la chaux et donc des réactions pouzzolaniques majeures, au bout de 7 jours. Il apparaît que les réactions pouzzolaniques, pour continuer au-delà de 7 jours, demandent plus de 6% de chaux.

Ce résultat confirme que le taux de chaux défini, doit fournir une quantité suffisante de

chaux ajoutée au sol à traiter pour maintenir un environnement à pH élevé afin de libérer les silicates et les aluminates solubles et fournir des calciums libres pour former des réactions pouzzolaniques (Little, 1995).

Le taux de chaux optimal qui dépend de plusieurs facteurs, pourrait être arrêté à 8% puisque Little (1995) préconise d'augmenter de 1 à 2% le taux déterminé par le pH. On peut l'arrêter également en fonction de la résistance à atteindre.

✓ ***Efforts – déformations***

L'essai de compression simple permet d'étudier également l'évolution de la déformation des échantillons avec le taux de chaux et dans le temps. On trace, pour les différentes doses de chaux, les courbes contraintes – déformations ainsi que les déformations

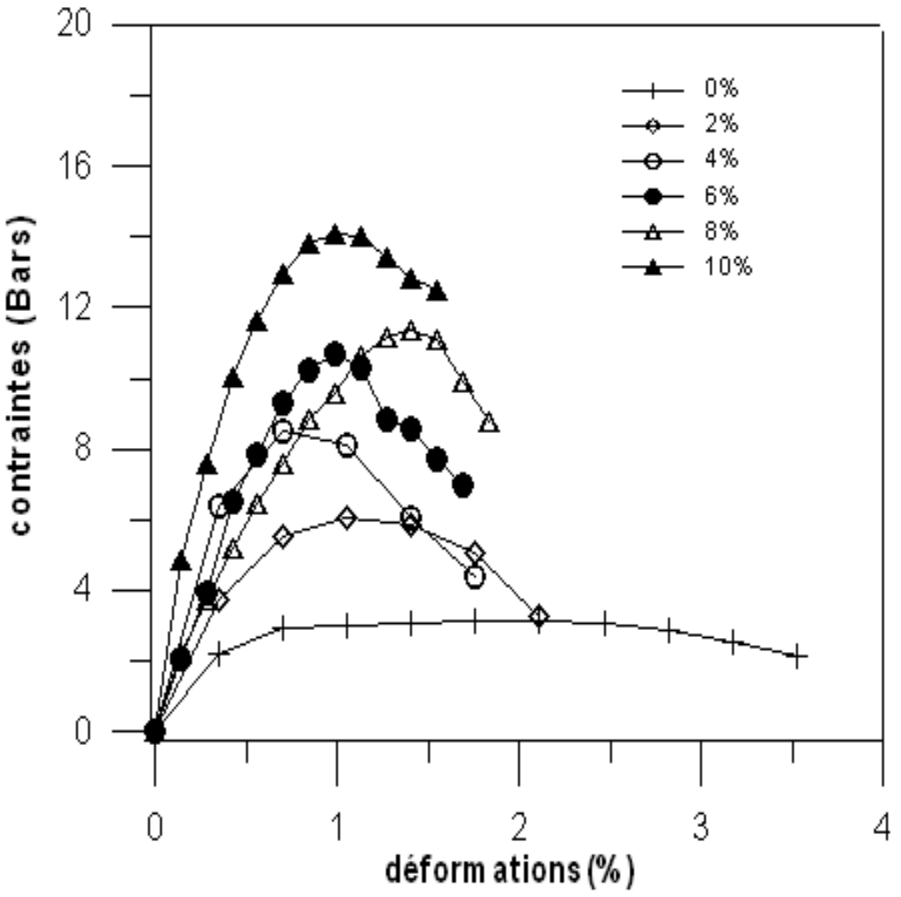


Figure V.4 : Courbes Contraintes – Déformations pour différents taux de chaux à 28j de cure

dans le temps (figure V.4).

Ces courbes nous montrent que l'échantillon de sol non traité présente un palier, ce qui indique que la rupture s'est faite progressivement entre 0,7 et 2,8% et en forme de tonneau ce qui confirme le caractère plastique du sol étudié. Il est à noter que pour une cure de 1jour la rupture est aussi en tonneau pour tous les échantillons. En 7 jours de cure, seul l'échantillon à 2% de chaux s'est rompu en tonneau.

A 4%, le tonneau est plus léger et les fissures sont un peu plus longues sur les faces.

Pour 6, 8, et 10 % les échantillons présentent des fissures le long des faces. A 28 jours, les fissures sont nettes.

A titre d'exemple, on présente les courbes de résistance – déformation des échantillons traités à 10% de chaux et à différents temps de cure pour montrer l'augmentation de la rigidité et la diminution de déformation avec le temps (figure V.5).

Ceci s'explique par le durcissement des agents de cimentation dans le temps.

La figure V. 6 montre l'évolution de la résistance en compression simple, dans le temps, pour des échantillons traités à différents taux de chaux. A un jour de cure, on

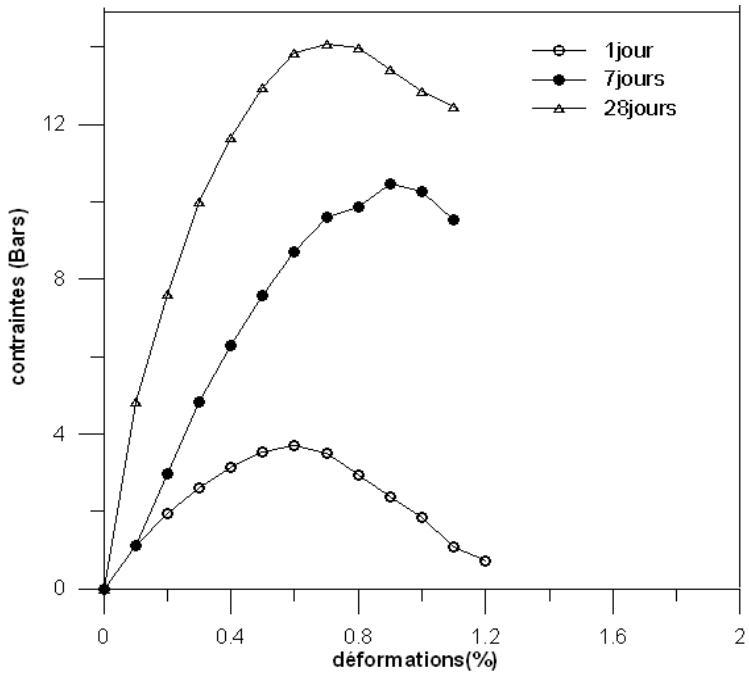


Figure V.5 : Variation contrainte-déformation avec le temps à 10% de chaux

n'enregistre pas de gain en résistance, dans le temps.

A 7 jours de cure, le gain est important jusqu'à 4%, à partir de 6%, il diminue. A 28

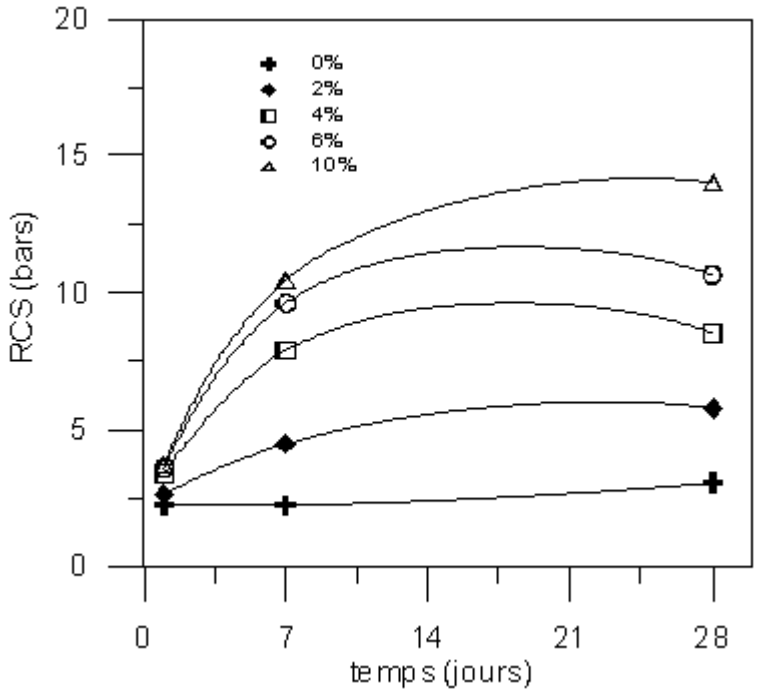


Figure V.6 : Variation de la résistance en compression des mélanges avec le temps de cure

jours de cure, le gain en résistance s'essouffle à partir de 6%.

Ce qui pourrait confirmer que le taux de 6% est un minimum pour assurer les réactions pouzzolaniques.

2. Effets de la stabilisation à la chaux sur d'autres caractéristiques du sol stabilisé

Sur les caractéristiques du compactage

A partir de l'essai Proctor normal réalisé suivant la norme standard, on a déterminé les caractéristiques optimales du sol constitué SNB traité avec 2, 4, 6, 8, 10% de chaux.
La texture du mélange change rapidement et le sol absorbe l'eau. Pour la même teneur en eau le sol est plus sec avec un taux de chaux plus élevé.
Une modification des caractéristiques de compactage du sol est enregistrée. Comme le montre la figure V.7, les courbes Proctor du sol traité s'inscrivent en dessous et à droite de celle du sol naturel constitué SNB.

Le traitement à la chaux réduit la valeur maximale de la densité sèche apparente pouvant être atteinte pour l'énergie de compactage considérée et augmente la valeur de la teneur en eau permettant de l'obtenir.

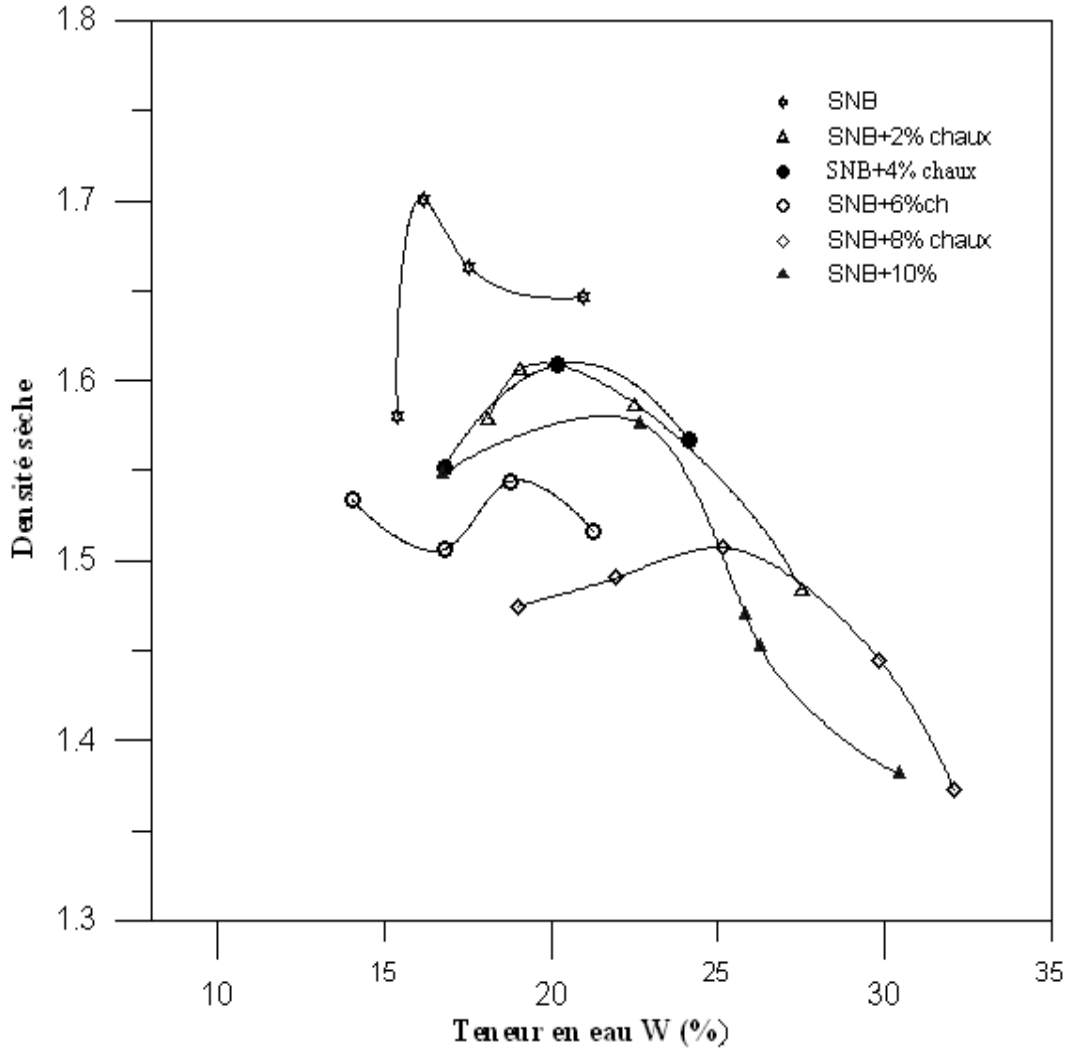


Figure V.7 : Courbes Proctor des mélanges à taux de chaux différents

On remarque néanmoins que la courbe du mélange à 10% de chaux n'a pas respecté ce constat et s'est placée plus haut que la courbe à 8%.

On remarque aussi l'obtention de courbes Proctor de forme non conventionnelle (à 6%) et des courbes pour lesquelles il est difficile de définir l'optimum.

Sur les caractéristiques du gonflement

✓ ***Le potentiel de gonflement***

La cinétique du gonflement libre est représentée dans la figure V.8. 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^{2+} et K^{+} sont échangés par Ca^{2+} qui sert à

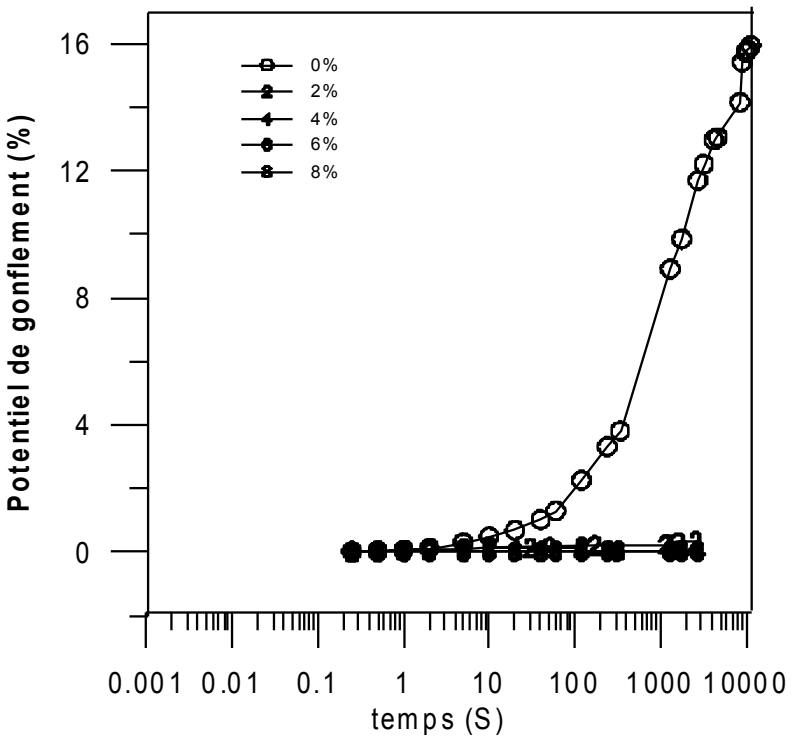


Figure V.8 : Variation du potentiel de gonflement avec le taux de chaux à 28 jours de cure

lier les particules du sol les unes aux autres, Bell, 1988).
Sur la figure V.9, on présente la variation du potentiel de gonflement en fonction du temps de cure.

A un jour et à 7 jours de cure et avec des taux de chaux de 2% et 4%, le gonflement est négligeable, il varie entre 0,4 et 0,7 %.

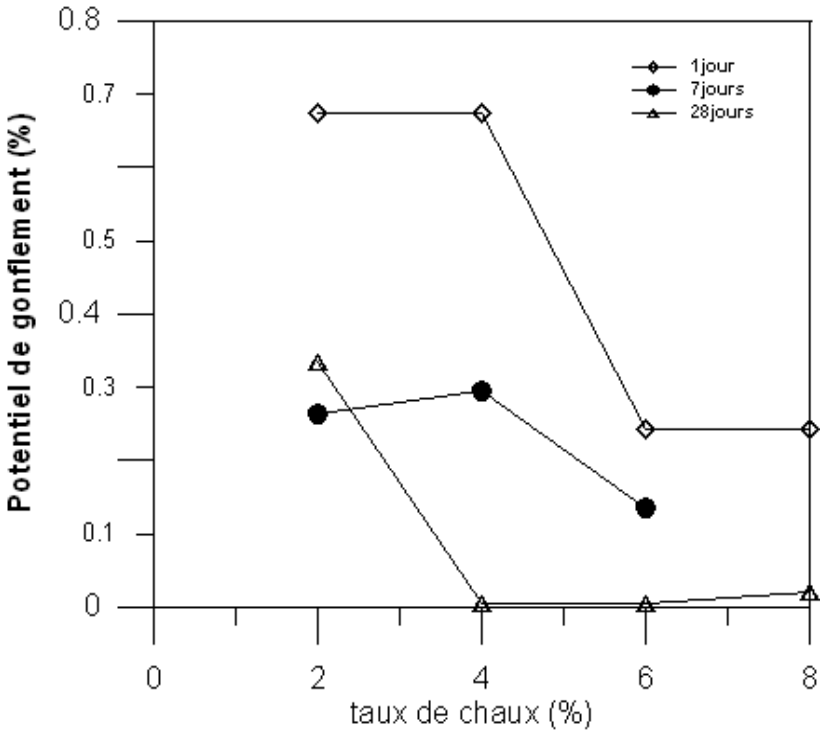


Figure V.9 : variation du potentiel de gonflement avec la chaux en fonction du temps de cure.

- ✓ ***Sur l'indice CBR***

La figure V.10 présente les courbes de compactage du sol non traité et traité à 4%, 6%, et 8% de chaux.

Les mélanges ont été soumis à un essai Proctor modifié. On relève le même constat que pour le compactage normal. Les densités sèches maximales diminuent et les teneurs en eau optima augmentent. Ces résultats sont utilisés pour étudier le CBR.

Les résultats de cet essai sont un moyen d'apprécier indirectement, la résistance au cisaillement du sol traité ainsi que sa rigidité comparé à celle d'un matériau de référence.

A partir des courbes présentées sur la figure V.11 on peut dire que pour une teneur en eau moyenne de 12%, l'indice CBR passe de 29,5% pour le sol non traité à 45% pour le sol traité à 4% de chaux, à 48% pour le sol traité à 6% de chaux et à 51% pour l42chqntillon de sol traité à 8% (Benlekhal, 2009).

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 (effet immédiat).

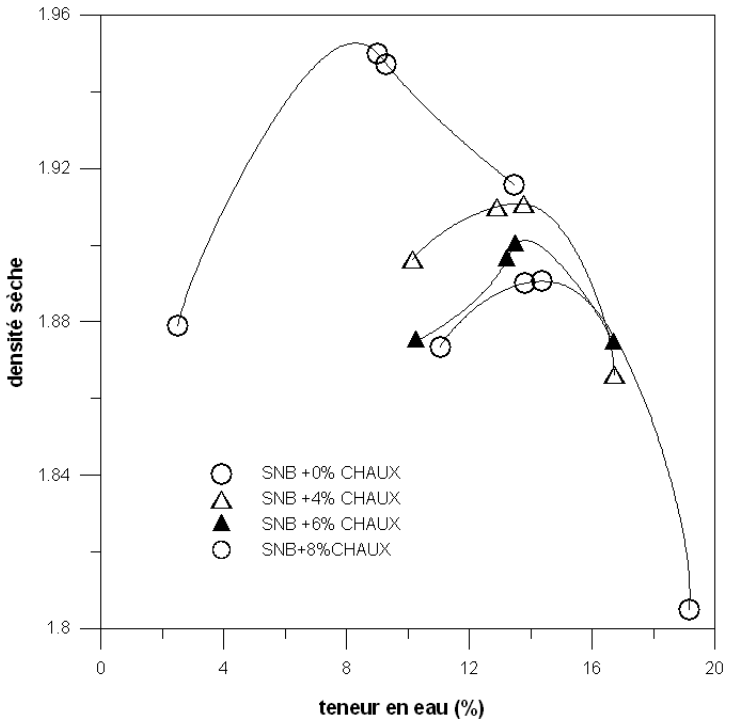


Figure V.10 : Courbes Proctor modifié à des taux de chaux différents

Selon la réactivité du sol à long terme et la qualité de la chaux utilisée, des gains allant jusqu'à 20 fois la résistance initiale du sol sont souvent réalisables sur le terrain.

Le gain substantiel de résistance est un des nombreux avantages que permet la stabilisation à la chaux des plates formes de chaussées (Little, 2007). Ceci se traduit dans la pratique par la conception de chaussées avec des couches de fondation et de base de moindre importance.

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.

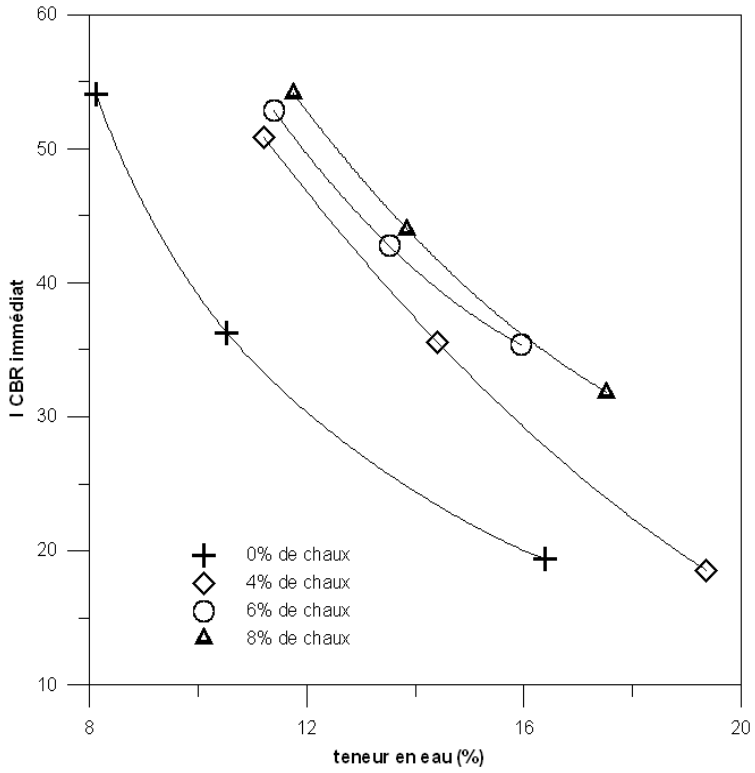


Figure V.11 : Variation de l'Indice CBR immédiat avec l'ajout de chaux

3. Mise en évidence des effets immédiats sur la qualité du sol

✓ ***Par la distribution des tailles***

Le changement de la texture du sol stabilisé a été mis en évidence par analyse granulométrique du sol – chaux à des taux de chaux de 4%, 6%, 8%, et 10%. On présente dans la figure V.12 les distributions granulométriques de ces sols.

On remarque tout d'abord le déplacement des courbes vers la gauche avec l'ajout de chaux. Ce déplacement indique une diminution du pourcentage d'éléments fins et par voie de conséquence une réduction de l'argilosité du sol traité par rapport à celui non traité. Le pourcentage des éléments fins diminue au profit d'une augmentation des plus gros éléments. Ces résultats confirment que les éléments fins s'agglomèrent pour former de plus gros éléments tels que montrés dans le tableau V.1.

Tableau V.1 : Distribution des tailles des particules pour des différents taux de chaux

Diamètres (mm)	<0,002	0,002-0,02	0,02-0,2	0,2-2	2-10
0%	40	19	20	12	8
4%	7	25	23	27	17
6%	7	26	23	24	18
8%	7	22	27	17	24
10%	2	23	27	19	26

On rappelle que les mélanges analysés ont été gardés pendant 24 heures dans l'eau et ont subi un lavage.

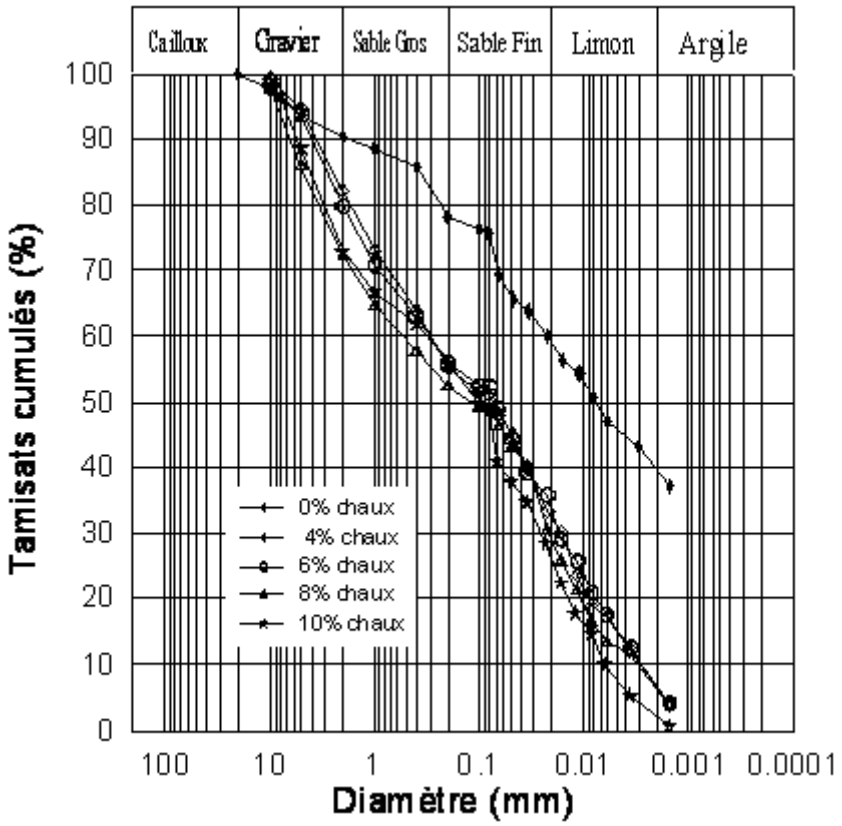


Figure V.12 : Distribution des tailles des particules en fonction du taux de chaux

La modification des tailles des particules mise en évidence par les courbes granulométriques démontre que les transformations introduites par la chaux ne sont

détruites ni par le séjour dans l'eau ni par le lavage de l'échantillon, ce qui plaide à priori pour l'irréversibilité de ces transformations. 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. Il semblerait aussi que la fraction 0,02 – 0,2 n'est pas très affectée par les transformations apportées par l'ajout de chaux.

- ✓ ***Par le taux de gonflement libre en solution***

L'essai de gonflement libre en solution, tel que décrit plus haut a été réalisé pour des mélanges sols chaux préparés à des doses de chaux différentes pour apprécier l'influence de l'ajout de chaux sur ce paramètre. Les résultats obtenus pour cet essai sont représentés dans les figures V.13 et V.14.

La figure V.13 montre que la cinétique de sédimentation du sol SNB est très lente car,

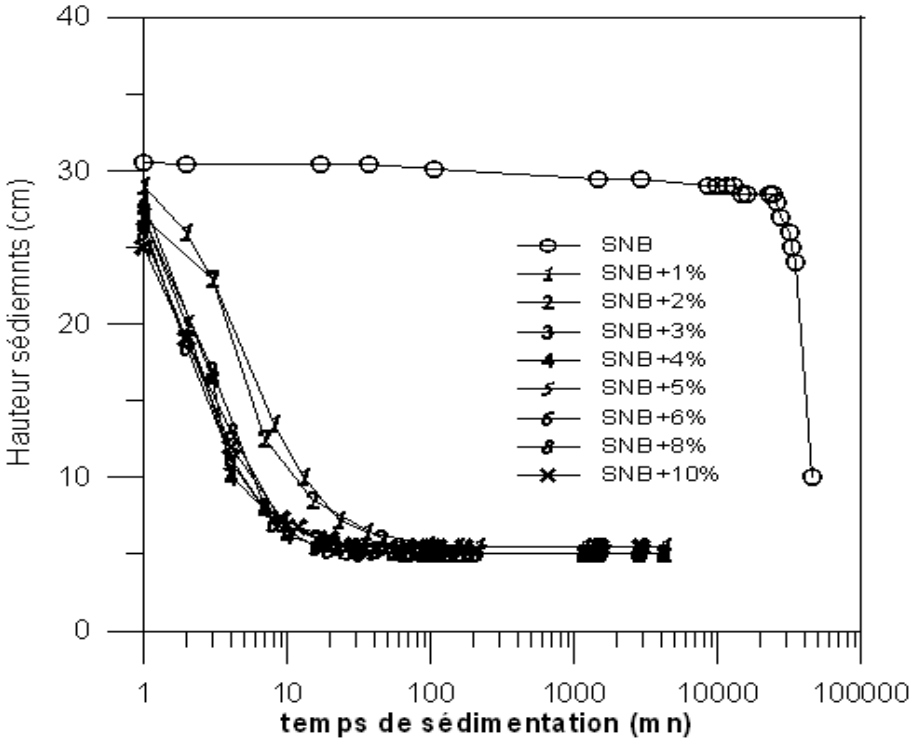


Figure V.13 : Cinétique de sédimentation du sol à différents taux de chaux

d'après la loi de Stokes, il doit contenir des particules fines légères qui prennent beaucoup de temps pour sédimenter. On a remarqué l'existence des matières non

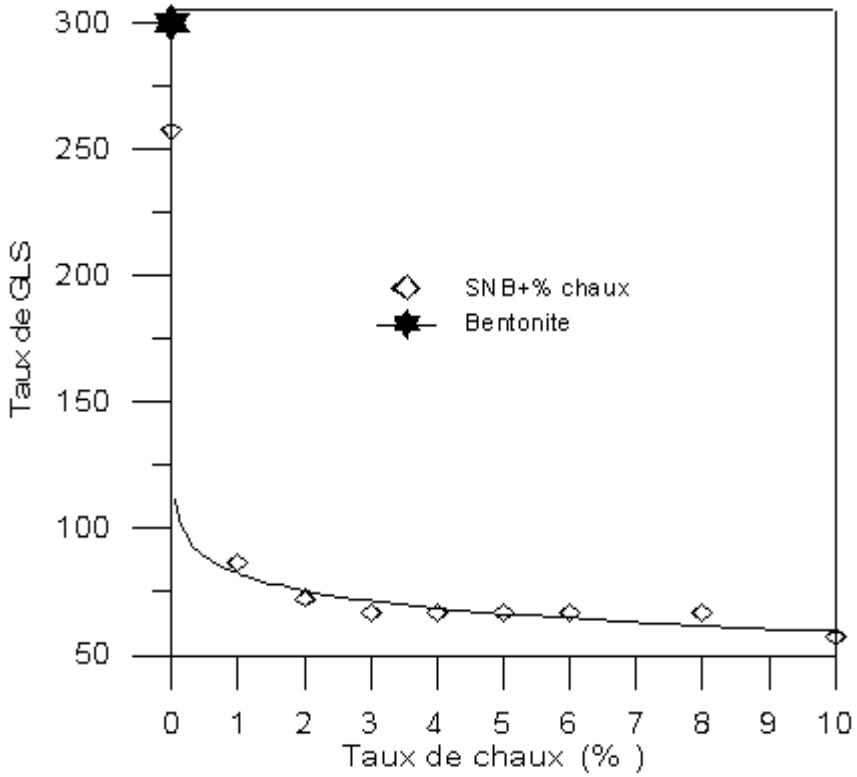


Figure V.14 : Taux de GLS du sol pour différents taux de chaux

propres à la surface de la suspension. La couleur de la suspension est très sombre, après 3 jours la partie supérieure s'est légèrement éclaircie. Le dépôt a été obtenu après plus de 15 jours d'attente. On remarque, tel que le suggère la loi de Stokes, que la température a une grande influence sur le temps de sédimentation.

Pour les mélanges sols chaux, à différentes doses de chaux, on a remarqué que les particules du mélange descendent très rapidement, le dépôt s'est constitué rapidement et la solution est devenue très claire en moins de 24 heures. Ceci s'explique par le fait que les particules se sont agglomérées, devenues plus lourdes et ont décanté rapidement.

Dans le premier intervalle de temps, les mélanges à 1% et 2% de chaux, ont décanté de manière plus faible, et sont suivis des mélanges à 3% et 4% de chaux, les mélanges à 6%, 8% et 10% ont décanté très rapidement.

Tous ces mélanges se stabilisent après un certains temps à la même hauteur.

Les valeurs des taux de GLS des différentes solutions représentées sur la figure V.14 montrent qu'à partir de 2%, le taux de GLS baisse et se stabilise à 3%.

Le taux de GLS du sol est supérieur à 100 ce qui prédit et confirme que c'est un sol gonflant. On note également que le taux de GLS de la bentonite est supérieur à 300 alors que le taux de GLS de la chaux est de 11% seulement.

4. Etude de l'effet du temps d'attente sur l'état du sol stabilisé

✓ ***Sur les limites de consistance du sol stabilisé***

Il est important de souligner que lors de la détermination des limites de SNB+6% de chaux après 4 et 7 jours d'attente, la pâte est très difficile à travailler. Elle a l'aspect d'un sable qui se détache au moment de son étalement sur la coupelle. Avec une grande quantité d'eau le nombre de coups pour rencontrer les deux lèvres est très faible et avec une petite quantité d'eau, la pâte se casse et se détache comme un sable argileux et le nombre de coups reste faible.

La limite de liquidité est faible et le sol parait déjà à la limite de la plasticité. Sa mise en œuvre est très délicate et on entend les crissements des grains sur la coupelle.

La limite de plasticité a été également difficile à obtenir, la pâte se fissure rapidement malgré la présence de l'eau qui laisse des traces sur la paillasse. On rappelle que les limites de consistance du sol traité à 6% de chaux mesurées immédiatement sont :

Wl = 49%, Wp = 35%, Ip = 14%.

Malgré la difficulté dans la réalisation de ces limites, on a pu constater quelques changements dans les valeurs également, l'indice de plasticité continue à diminuer avec le temps. Il a atteint 8% à 7 jours. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau V.2 :

Tableau V.2 : Effet du temps d'attente sur les limites de consistance du sol stabilisé

	SNB + 6% de chaux											
temps (jours)	W = 12 %			W = 16 %			W = 18 %			W = 20 %		
	WL	WP	IP	WL	WP	IP	WL	WP	IP	WL	WP	IP
2	40,60	30,13	10,47	46,00	29,69	16,31	44,00	35,97	8,03	45,00	31,34	13,66
4	40,00	32,00	8,00	46,00	35,53	10,47	45,70	35,77	9,93	45,70	37,00	8,70
7	40,00	32,00	8,00	44	35,00	9,00	45	34,60	10,40	46,5	34,89	11,61

✓ ***Sur les caractéristiques du compactage du sol stabilisé***

Dans la pratique, l'opération de mise en place des sols à compacter sur les couches de chaussées est souvent confrontée à des contraintes qui lui infligent un retard, c'est-à-dire un temps d'attente entre le malaxage et le compactage. Afin d'étudier l'apport des 6% de chaux aux sols traités et de vérifier l'effet du temps d'attente, on a préparé les mélanges à des temps de maturation de 2 heures, de 24 heures et de 48 heures.

Les valeurs des caractéristiques du compactage sont données dans le tableau V.3 :

Tableau V.3 : Caractéristiques du compactage en fonction du temps d'attente

Temps	**Densité sèche**	**Teneur en eau optimale**
immédiatement	1.65	16 %
24 h	1.54	18.5
48 h	1.54	21-22

Le compactage immédiat a donné une densité sèche maximale plus importante que les deux autres compactages.

Après un temps de maturation de 24 heures, la courbe présente une plus faible densité sèche à l'optimum. Apres 48 heures de maturation, la courbe présente une allure aplatie avec une plus faible sensibilité à l'eau, c'est une caractéristique des sols grenus (figure V.15). Dès que la chaux est mélangée à l'eau des réactions chimiques s'enclenchent. Des agents de cimentation se forment en créant des liens entre les particules des mélanges sol chaux.

On remarque qu'avec l'augmentation du temps d'attente entre le malaxage et le compactage final, les densités et les résistances des sols stabilisés diminuent.

Cette situation s'explique par le fait qu'une partie de l'énergie de compactage est employée pour casser ces liaisons et parce qu'une partie du potentiel de cimentation est perdue.

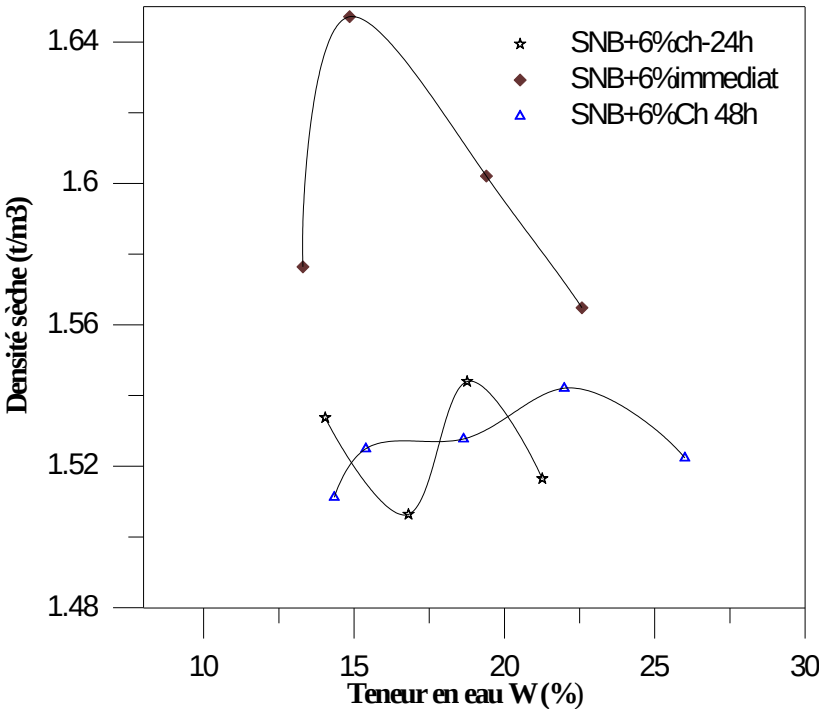


Figure V.15 : Influence du temps d'attente sur les caractéristiques du compactage

Il faut noter alors que la résistance maximum dans des mélanges de sol-chaux est atteinte sans attente. D'après certains auteurs, un retard de compactage de quelques heures seulement est permis pour la construction

.

Chapitre VI

Discussion et Conclusion

1. Discussion

Le traitement à la chaux a, sans aucun doute, des effets positifs sur toutes les caractéristiques du sol. Ces effets se réalisent en deux phases. La première phase introduit des changements immédiats dans les caractéristiques du sol traité. Elle assèche le sol, réduit la plasticité et le gonflement et offre une meilleure maniabilité du matériau. Cette phase est appelée modification. Dans la deuxième phase (appelée stabilisation), les améliorations des caractéristiques mécaniques s'enclenchent et continuent à s'opérer dans le temps en enregistrant des gains significatifs. Ce qui permet d'assurer la stabilité des sols traités. Malheureusement, des constats de dégâts notés dans certains sols stabilisés à la chaux, rapportés dans plusieurs pays dont les Etats Unis, ont mis en avant un problème de durabilité du traitement à la chaux. Le choix du taux de chaux optimal adopté a été remis en question.

Différentes méthodes sont alors proposées pour déterminer un taux de chaux optimal à même d'assurer la durabilité des performances acquises par la stabilisation des sols des assises de chaussées. On a analysé dans ce travail trois procédures largement utilisées dans la pratique et supposées permettre d'arrêter le taux optimal pour la stabilisation d'un sol à la chaux.

On présente dans ce chapitre, une discussion approfondie des résultats obtenus et exposés dans le chapitre précédent.

1.1 Taux de fixation de chaux (lime fixation percentage)

La détermination de ce taux est basée sur le critère de la plasticité du matériau. Ce taux permet une réduction maximale de la plasticité du sol traité. Ce qui se traduit par des modifications immédiates dans les caractéristiques de ce sol. Ces modifications offrent de meilleures conditions de travail sur le site, Le sol acquiert une résistance qui lui permet de supporter les charges et les contraintes imposées par le site de construction.

Sur la base des résultats obtenus dans ce travail, il a été observé qu'un taux de 4% de chaux permet d'introduire la réduction la plus importante de la plasticité du sol testé. L'indice de plasticité du sol stabilisé a chuté de 50% à 14 %. La réduction de l'indice de plasticité est l'expression du changement de la texture du sol et son comportement vis-à-vis de l'eau. Les cations Ca^{2+} apportés par la chaux développent des forces électriques conduisant à l'agglomération des fines particules argileuses en particules grossières et friables.

Le potentiel de gonflement a disparu, la densité sèche a diminué et la teneur en eau optimum a augmenté. D'un autre côté le sol a enregistré une faible augmentation de la résistance à la compression simple.

Certains chercheurs rapportent que les modifications apportées aux sols par de faibles ajouts aux alentours du taux de fixation sont réversibles ; elles peuvent être attaquées par exemple, par une exposition prolongée du sol à l'eau et disparaître avec le temps.

Afin de vérifier l'irréversibilité des modifications intervenues dans le sol stabilisé, une analyse granulométrique a été réalisée dans cette étude pour des mélanges de sol à 4%, 6%, 8% et 10% de chaux compactés. Cette analyse a permis premièrement de faire apparaître que la distribution des tailles des particules change. Le pourcentage des fines diminue au profit de l'augmentation de celui des plus grandes particules. Ceci prouve que les fines particules grossissent en s'agglomérant en mettant leur couche d'eau en commun. Ce qui prouve encore que l'action de la chaux sur le sol dépend entre autres de la finesse du sol qui augmente la surface de contact et de la teneur en chaux libre (réactifs).

Cet essai a permis surtout de confirmer que les changements de la texture du sol traité sont conservés malgré la manipulation du sol et sa soumission à un lavage et une opération minutieuse de séparation de grains et de matières organiques. Les courbes granulométriques de la figure V.1 le montrent bien.

La figure VI. 1 montre le changement de la distribution des tailles des particules du sol traité à la chaux constaté sur une plate forme de chaussée autoroutière après plusieurs années d'exploitation (Beegly H., 2003). Ce résultat est en accord avec les résultats de cette étude.

En outre, un autre essai confirme bien l'irréversibilité des modifications ou une partie de ces modifications, c'est l'essai de GLS des sols stabilisés à différents taux de chaux.

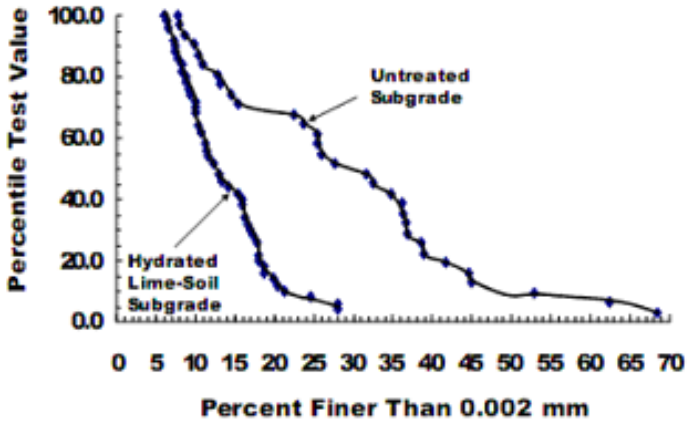


Figure VI.1 : Exemple de changement de distribution
de tailles des particules (Hopkins & al., 2002)

On remarque que malgré que le sol soit resté dans l'eau pendant plusieurs jours pour la cinétique de sédimentation et après des mois pour la vérification, son séjour dans l'eau n'a pas altéré sa texture grenue acquise par la floculation.

Khattab et Al Mukhtar (2003), ont effectué des essais de lessivage sur des échantillons compactés traités à 4% de chaux et non traités. Le lessivage à l'eau distillée a été poursuivi pendant 60 jours et accompagné par des mesures de la quantité de Ca^{++} lixiviée et du débit d'eau ayant traversé l'échantillon. La quantité de chaux lessivée après plus de 60 jours de percolation de l'eau sous un gradient hydraulique de 10 est très faible. Ce résultat plaide pour la durabilité des liaisons crées grâce à la réaction chaux – argile dans la gamme du taux de fixation de la modification.

Au vu de ces résultats, on peut conclure que les modifications immédiates ou une partie de ces modifications sont irréversibles.

A la question si les modifications observées immédiatement continuent dans le temps, on a tenté de montrer cette continuité.

On a alors mesuré des limites de consistance des échantillons préparés à des teneurs en eau différentes et conservés à des temps de cure différents. On a bien observé que le changement de la texture est manifeste. Le sol acquiert la texture d'un sable mais on n'est pas parvenu à mettre en avant des variations remarquables.

Lasledj et Al-Mukhtar (2008), ont présenté les effets de la chaux sur les limites de consistance d'un sol français hautement plastique, ils ont conclu que le temps n'a pas d'effet sur la variation de ces paramètres (figure VI.2). Ils ont montré dans le même traitement à l'aide de l'essai du bleu de méthylène, sur le sol traité à différents taux de chaux et à des temps de cure différents, qu'à de faibles taux de chaux 2%, le temps n'a

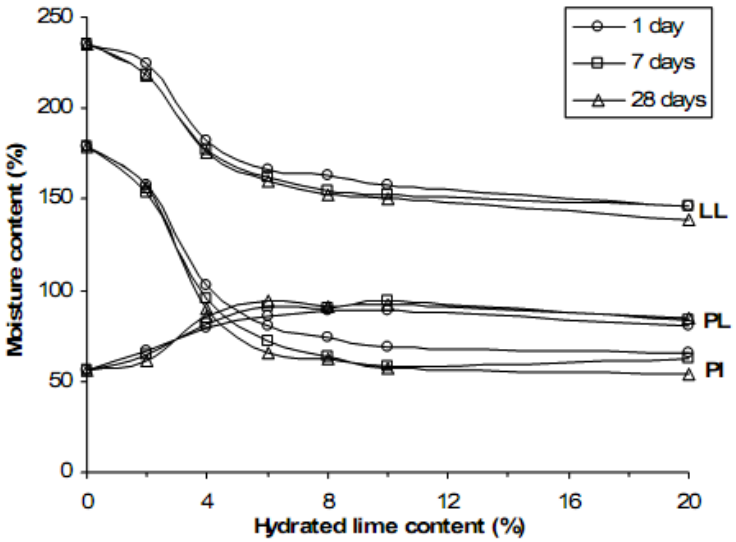


Figure VI.2 : Variation de la plasticité dans le temps
(Lasledj& Al Mukhtar, 2008)

pas d'effet sur la surface spécifique du sol mais qu'au-delà de ce taux, la surface spécifique du sol diminue dans le temps (figure VI.3).

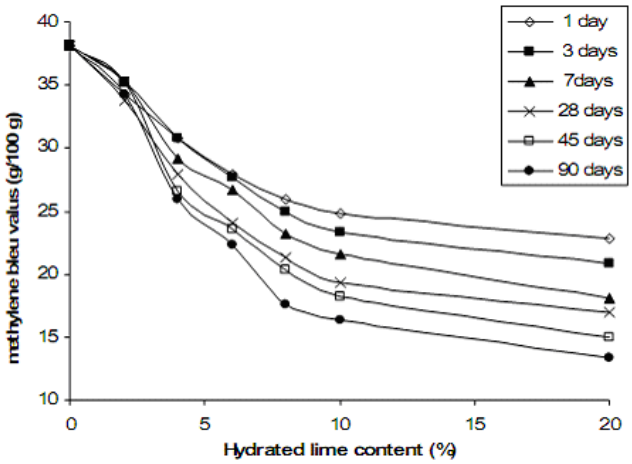


Figure VI.3 : Variation de la surface spécifique avec le temps
(Lasledj& Al Mukhtar, 2008)

Par ailleurs, Leroux et Rivière (1969) ont montré que la plasticité continue à diminuer dans le temps. L'indice de plasticité de certains sols passe de 16% à 24 heures à 8 % à 90 jours de cure.

López-Tara et al (2005) ont montré à leur tour que les caractéristiques de la plasticité continuent à diminuer avec le temps. Les résultats de leurs travaux sont donnés dans le tableau VI.1.

Tableau VI.I : Limites de consistance d'un sol traité à la chaux à différents temps de cure

Temps de cure	**Limite liquidité (%)**	**Limite plasticité (%)**	**Indice plasticité (%)**	**Limite retrait (%)**	**Retrait linéaire (%)**
Argile naturelle	79	25	54	16,2	19,2
1h	173	37	136	26,3	30,5
24h (1 jour)	158	38	120,4	24,5	31,8
100h (4 jours)	148	39	108,3	24	29,9
150h (6 jours)	146	42	104,6	21,7	28,7
240h (10 jours)	132	43	88,4	22,9	28,3
480h (20 jours)	122	41	81,9	23,7	27,4

D'un autre côté, Khattab et Al Mukhtar (2003), ont montré à l'aide des essais de cycles répétés de séchage-saturation sur une argile plastique à des conditions climatiques extrêmes que si le premier cycle subi par le matériau est une saturation, la réduction du gonflement par ajout de chaux reste intéressante. En revanche, l'efficacité du traitement diminue fortement si le premier cycle correspond au séchage, Le séchage prématuré interrompt le mécanisme de réaction chaux - argile et mène semble t'il à la destruction des liaisons fragiles naissantes issues de la réaction pouzzolanique dans le sol traité.

En ce qui concerne la résistance, dans la présente étude, un gain de 5.5 bars est enregistré à 28 jours de cure pour le sol traité à 4% de chaux. Ceci prouve que le taux de fixation permet quand même quelques réactions pouzzolaniques. On souligne également que le pH à 4% est déjà élevé.

Dans le même sens, le potentiel de gonflement du sol stabilisé chute jusqu'à la disparition à partir de 2% de chaux à 7jours et 28 jours de cure.

On note que la résistance est plus importante pour des taux de chaux plus grands, ce qui amène à conclure que le taux de fixation ne peut pas constituer le taux de chaux optimal recherché en terme de performance mécanique.

1.2 Taux de demande en chaux (lime demand percentage)

Ce taux est défini par la méthode de Eades et Grim, qui consiste à déterminer le pH des mélanges à différents taux de chaux et fixer le taux qui correspond au pH de 12,4 comme taux de demande en chaux. Durant les dernières années, cette méthode, très utilisée est reconnue comme celle donnant le taux de chaux minimum pour assurer la durabilité de la stabilisation du matériau (Austroads, 2002).
Pour le sol objet de cette étude, l'essai de Eades et Grim fixe le taux de 6% comme suffisant pour assurer un milieu alcalin riche permettant la durabilité des améliorations enregistrées. On note que le pH des mélanges est élevé, ce qui a permis d'avoir des augmentations importantes de la résistance à partir de 4%. Ce résultat confirme l'efficacité de l'introduction de ce paramètre dans la définition du taux de chaux à utiliser. Le mélange à 6% a atteint le pH de la chaux, ce qui le présente comme le taux de demande en chaux du sol.

Avec 6% de chaux, les modifications immédiates sur la plasticité, le gonflement, la floculation obtenues à 4% sont maintenues. L'essai de GLS, et l'analyse granulométrique des échantillons traités montrent l'irréversibilité d'au moins une partie de ces modifications.

Cependant le gain immédiat en résistance est faible. Il semble que c'est à partir de 7jours de cure que le gain en résistance est substantiel (figure V.3). On remarque sur la courbe de la résistance en compression à 28 jours (figure V.3), qu'à partir de 6% la résistance n'est plus linéaire avec le taux de chaux. Elle marque un ralentissement dans le gain de résistance. Ce qui pourrait s'expliquer par le fait qu'une partie de la chaux n'est pas engagée dans la réaction sol chaux.

A titre de comparaison des résultats de cette étude avec ceux du projet de Killarney road Queensland (Mains Roads, 1999), cet essai a permis de fixer le taux de demande en chaux à 6%. Et pour assurer une stabilité durable, la méthode basée sur la résistance maximale à 28 jours pour des mélanges à différents taux de chaux a été utilisée. Un taux de chaux supérieur est arrêté et a donné des valeurs plus

intéressantes en terme de résistance, indice CBR et module de résilience. Des différences entre 3% et 6% ont été soulignées.

1.3 Taux optimal de chaux – par la méthode de la résistance à la compression simple à 28 jours.

Ce taux est déterminé en se basant sur une performance du sol, la résistance à 28 jours dans cette étude. Le taux qui donne la résistance en compression simple maximale après 28 jours de cure est défini comme taux optimal capable d'assurer la durabilité des performances acquises avec le traitement à la chaux.

Little (1995) pense que la conception basée sur la méthode du pH doit être considérée avec prudence.

Il explique qu'à des concentrations plus élevées en chaux qu'il recommande, le pH est suffisamment élevé pour permettre la dissolution du silicium et de l'aluminium dans l'argile.

Ces derniers peuvent former alors des composés stables dans la réaction pouzzolanique similaire à celle qui se produit avec le ciment Portland. En se basant sur des données US de contrôle de chaussées sur de longues durées, ils ont noté que les gains en résistance sont permanents et continus (Austroads, 2002).

A partir des courbes des résistances de la présente étude, on remarque que les valeurs de la résistance à 28 jours, augmentent presque linéairement avec les premiers ajouts de chaux. Mais cette augmentation marque la valeur la plus importante à 6 % et continue d'augmenter mais plus faiblement avec le taux de chaux. Entre 10% et 12%, elle semble se stabiliser.

Dans les travaux d'Al Mukhtar et al. (2008), l'analyse aux rayons X d'un sol argileux non traité et traité à des taux de chaux de 2%, 6%, 8%, 10% et 20% à 28 jours de cure à 20°C révèle dans le diffractogramme que l'ajout de 2% de chaux n'affecte pas la structure minérale de l'argile, aucun composant n'est apparu après 28 jours. A 6% (taux défini comme taux de fixation pour l'étude d'Al Mukhtar et al (2008)), le diffractogramme ne montre pas la formation de nouveaux composants. Alors qu à 8%, 10% et 20% apparaissent les CAH et leur quantité augmente avec le taux de chaux. A 20% par

exemple, il y a un excédent de chaux qui apparaît avec des raies correspondantes (figure VI.4).

Lazzali (1997) a montré également dans une analyse diffractométrique, qu'avec le temps, la quantité de la montmorillonite diminue.

A la lumière de ces observations, et comme le préconise Little (1995) on peut arrêter le taux de chaux optimal à 8%. C'est-à-dire en augmentant de 1 à 2% le taux défini par la méthode du pH-mètre.

On remarque également qu'avec l'ajout de chaux, le sol stabilisé devient plus rigide, les courbes de résistance se déplacent vers la gauche, la déformation à la rupture diminue ce qui favorise la rupture fragile du matériau. Ce fait se traduit en pratique par le risque d'apparition des fissures dans les chaussées traitées à la chaux. On rappelle que les échantillons sont préparés à la même teneur en eau. Les teneurs en eau finales des sols traités sont réduites après la réaction. .

Ceci s'explique par le fait que la chaux vive demande de l'eau pour hydrater les CaO et aussi pour fournir un milieu pour augmenter le pH du sol afin de libérer les silicates et aluminates des particules d'argile pour former les CSH (les silicates de calcium hydratés) et les CAH (les aluminates de calcium hydratés). L'eau doit être entièrement mélangée sur toute la couche stabilisée et laissée hydrater.

Il est important de permettre l'homogénéisation de l'hydratation initiale avant le compactage, quand l'hydratation se produit à l'état compacté, le taux d'hydratation ralentit, créant une augmentation temporaire de la teneur en eau qui retarde les résultats du compactage (CSSA, 2006).

A partir des résultats de cette étude et en se basant sur de nombreux rapports de recherche établis ces dernières années et sur des études rapportant des résultats et expériences, on relève l'inadéquation de l'approche qui vise la détermination du taux optimal de chaux c'est-à-dire celui qui correspond au meilleur rendement de la réaction chimique de la stabilisation, sans tenir compte de tous les paramètres qui participent ou influencent cette réaction.

A Cet effet, (Sha, 1997) explique que les éléments dominants dans la réaction pouzzolanique sol – chaux est le système $CaO\text{-}SiO_2\text{-}H_2O$. Pour cela, la conception du

taux de chaux optimal pour la stabilisation, doit tenir compte des trois composants qui entrent en réaction. La quantité de chaux exigée augmente avec la solubilité des silicates dans le système dans le but de conserver le rapport optimum CaO / SiO_2. Pour cette raison, il existe un taux de chaux optimum pour lequel la résistance maximale peut être obtenue à un certain temps de cure et le taux de chaux optimum doit croitre avec le temps de cure.

A la lumière de toutes ces analyses et observations, il apparaît que la conception du taux de chaux optimal doit prendre en considération tous les éléments qui participent dans la réaction pouzzolanique notamment le sol, en identifiant ces composants réactifs, la chaux, en estimant sa réactivité et l'eau, en déterminant la teneur en eau optimale nécessaire pour l'hydratation et pour le compactage sur le terrain et la température en évaluant son effet. Ainsi, des mesures particulières dans la mise en œuvre de la technique de stabilisation doivent être prises pour s'assurer que les conditions du laboratoire sont plus ou moins respectées sur le chantier de construction.

1.4. Influence du temps d'attente sur les caractéristiques du compactage

Sur les chantiers, on est souvent confronté au temps d'attente entre le malaxage du sol avec la chaux et le compactage final. Des phénomènes climatiques peuvent alors intervenir pour modifier les caractéristiques des mélanges. Le sol peut subir un assèchement s'il est exposé à l'ensoleillement, une saturation s'il est exposé à la pluie ou l'humidité, comme il peut faire des réactions chimiques en créant plus de liaisons entre les particules. Tout cela dépend du temps d'attente aussi. Ce qui a été montré avec l'essai Proctor pour des échantillons traités à 6% de chaux avec une teneur en eau de 18%. Les densités sèches ont diminué et la teneur en eau optimum a augmenté car une partie de l'énergie de compactage est utilisée pour casser ces liaisons.

Dans leurs travaux, Lopez et al. (2003), ont étudié le compactage du sol traité à 6% de chaux à des temps d'attente différents (1h, 24h, 100h, 150h) et ont conclu à la diminution de la densité sèche avec l'augmentation de ce temps. Ce paramètre passe de 1,32 à 11,83. Ils ont remarqué que le compactage devient plus difficile avec le temps et ont justifié cette situation par la formation des grumeaux dans le mélange sol-chaux qui nécessitent une énergie de compactage plus élevée. Ils ont recommandé un temps

minimum de cure de 1 jour pour une meilleure résistance.

On a souligné que le temps et les précautions des cures des sols traités sont des facteurs majeurs dans la fissuration de retrait. Si pendant la cure, le sol traité subit un assèchement rapide, le retrait se produit rapidement. En même temps, l'application d'une humidité insuffisante durant le traitement, ne permettra pas une hydratation correcte de la chaux et donc ne réalise pas la performance de résistance attendue. Comme résultat, une fissuration précoce et intense du sol traité se produira aussi. (CSSA, 2006)

Dans les pays froids, se pose le problème du gel-dégel et dans les pays à climat aride et semi-aride se pose le problème de l'assèchement prématuré. Ce phénomène empêche les réactions sol – chaux et limite ou annule l'effet du traitement.

On voit bien que l'eau est un facteur incontournable dans le processus de la stabilisation. Des données de teneurs en eau de terrain des sols traités à la chaux, avancent que les changements d'humidité dans les matériaux stabilisés ne sont pas importants quand la teneur en eau et la teneur du stabilisant sont approximativement des optima pour chacune des deux valeurs (Little et al, 1987).

Il faut donc noter l'importance de l'eau dans la stabilisation des sols. Elle enclenche l'hydratation des matériaux en permettant la réaction entre les sols argileux et la chaux pour former le gel pouzzolanique. L'eau joue un rôle vital dans l'étape finale du processus de stabilisation quand la couche traitée est protégée pendant la période de cure.

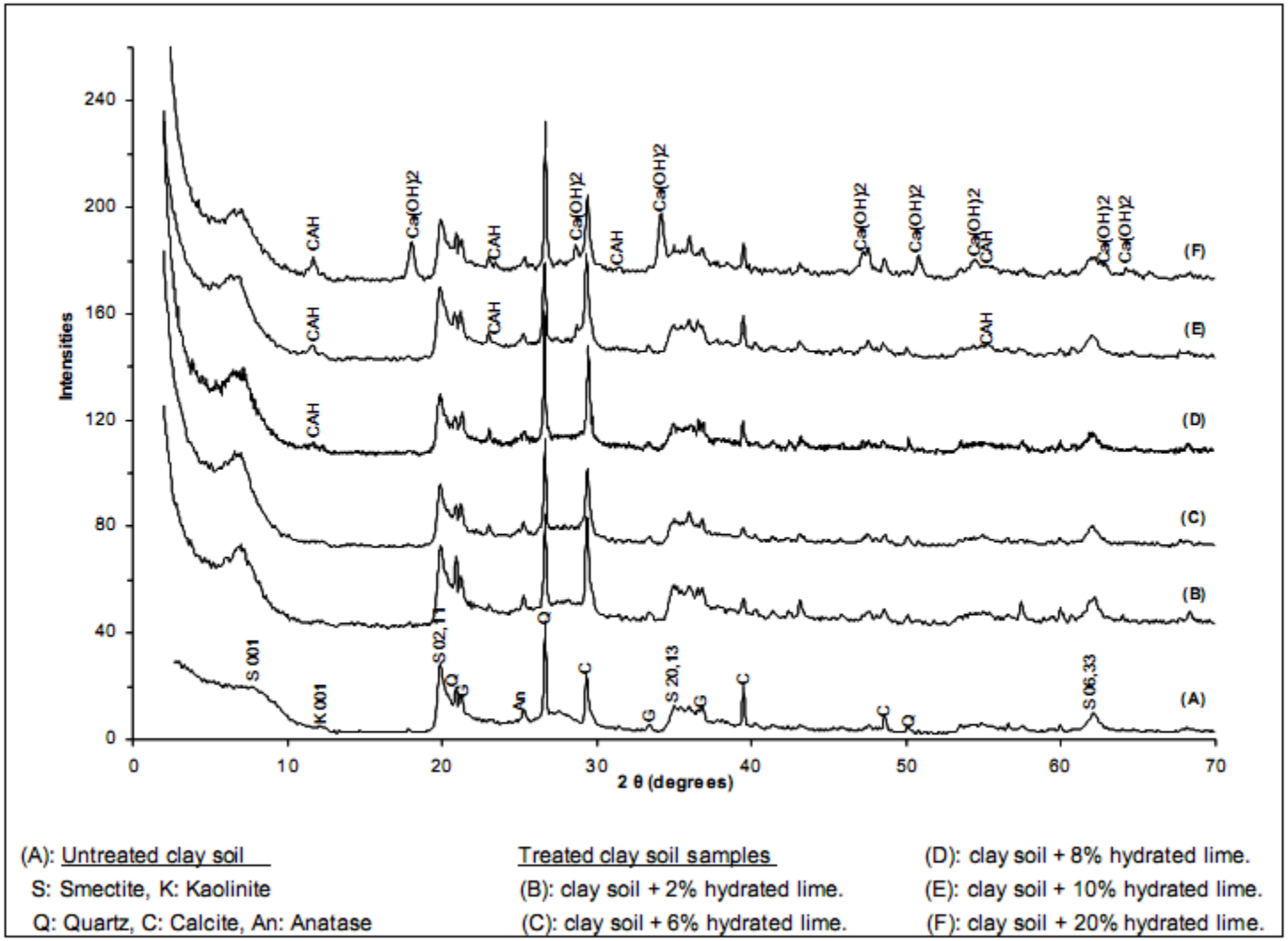


Figure VI.4. : Résultats de diffractométrie aux rayons X (Al-Mukhtar et al., 2008)

2. Conclusion générale

Il ne fait aucun doute que le traitement des sols à la chaux, utilisé depuis très longtemps, produit des effets remarquables sur les sols traités.

Néanmoins, les expériences ont montré que ces effets posent le problème de la durabilité. Les dégâts qui apparaissent dans les chaussées traitées à la chaux ont poussé les chercheurs à penser la conception d'un taux optimal capable d'assurer la pérennité de ces effets. Cette préoccupation a toujours été au centre d'intérêt de la recherche sur la stabilisation des sols.

Plusieurs expériences de différents pays du monde, ont proposé des méthodes pour arrêter le taux optimal qui assure la modification des caractéristiques mécaniques des sols traités et leur durabilité.

Les deux méthodes évaluées dans cette étude font partie des procédures proposées à cet effet.

Le taux basé sur la réduction de la plasticité, largement utilisé et appelé taux de fixation de chaux, s'est avéré suffisant pour assurer la modification du sol en produisant des effets immédiats, sans pour autant être capable de fournir des performances mécaniques optimum recherchées. On peut, tout de même l'arrêter comme taux optimal pour la modification du sol.

Les effets immédiats du traitement à la chaux ont été clairement mis en évidence dans cette étude par l'analyse de la texture du sol. On a démontré les changements notamment

- ✓ Par la distribution granulométrique des sols traités,
- ✓ Par la sédimentation du sol traité dans un liquide

Les procédures utilisées pour faire apparaître ces modifications ont permis de démontrer par ricoché, l'irréversibilité de ces modifications. Ni le lavage ni la trituration des échantillons n'ont eu raison de ces modifications.

La méthode de Eades et Grim se basant sur la qualité du milieu alcalin, propose le taux de chaux donnant une solution à pH de 12,4 comme taux de demande en chaux. Ce

taux fournit un pH élevé permettant la solubilisation des aluminates et des silicates qui se lient avec les Ca^{++} pour réaliser la réaction pouzzolanique dans le temps.

Dans cette étude, il est égal à 6%. On a bien montré qu'autour de ce taux, se réalise l'augmentation la plus importante en terme de résistance. Au-delà de ce taux, le gain en résistance continue mais avec une moindre importance.

En fait, la réaction pouzzolanique peut continuer pour une longue durée et on a montré qu'il est possible d'arrêter un dosage optimal, pour chaque période de cure du sol stabilisé et pour chaque teneur en eau utilisée

Plusieurs auteurs ont noté l'efficacité de ce paramètre et l'ont considéré comme un pseudo optimum à adopter pour la stabilisation des sols à la chaux. Et pour prendre en considération, les gains en résistance enregistrés au-delà de ce taux, ils préconisent de l'augmenter de 1 à 2%.

La méthode indirecte de détermination du taux optimal de chaux doit être à chaque fois validée par la mesure de la performance mécanique du sol traité. Il s'agit par exemple, de la résistance à la compression à 28 jours, du CBR, du module de résilience, de l'optimum Proctor, … Ces méthodes donnent souvent un taux de chaux légèrement supérieur aux taux cité plus haut.

Il demeure néanmoins important de souligner que la détermination du taux de chaux optimal pour une application, est une opération fort complexe. Elle doit impérativement tenir compte de tous les éléments qui participent et influencent la réaction chimique de la stabilisation à savoir le sol, la chaux, l'eau la température et les conditions climatiques des sites de construction.

Arrivé au terme de cette étude et en se basant sur les résultats obtenus, il semble justifié d'admettre que le taux de chaux (liant) optimal recherché, devrait être considéré en association avec la quantité d'eau de '' gâchage'' du mélange. Un paramètre semblable au rapport E/C utilisé dans la formulation des bétons devrait être proposé pour la stabilisation à la chaux. .

La recherche du taux de chaux optimum est toujours d'actualité et appelle plus d'efforts de recherche eu égard au regain d'intérêt de la valorisation des matériaux par la stabilisation à la chaux.

Une fois, les conditions optimales de la stabilisation à la chaux d'un matériaux, bien définies au laboratoire, il faudra s'assurer de leur pleine réalisation sur le chantier de construction. Les précautions de stockage de la chaux doivent être observées pour maintenir le niveau de réactivité de projet de la chaux. Une perte de réactivité par carbonatation peut être préjudiciable pour la pérennité de la stabilisation. Par ailleurs, un intérêt particulier doit être apporté pour garantir une mise en œuvre qui respecte les conditions d'humidité, de malaxage … pour permettre à la réaction sol – chaux – eau de se produire dans les conditions optimales arrêtées.

Enfin et en attendant la mise en place d'une méthode de formulation pour la stabilisation du sol à la chaux, le taux de demande en chaux déterminé par le pH et augmenté de 1% à 2% (comme le stipulent certains chercheurs) restera un moyen efficace pour la détermination du taux de chaux le plus approprié pour assurer la durabilité de la stabilisation du sol à la chaux, sous réserve de le valider par quelques essais.

Références Bibliographiques

Al Rawi, N. M. 1981. *The effect of curing temperature of lime stabilisation, Proc. 2nd Conf. of Engineering materials*, Sidney, 611-662.

Arman A. et Munfakh, G. A. 1970. *Stabilization of organic soil with lime*, Engineering Research Bulletin n° 103, Division of Eng. Research, Louisiana State University, Baton rouge.

Andrews D. C. et O' Flaherty, C. A. 1968, *Lime type and quality in relation to the stabilization of soils with different gradations and clay mineral*. Proc. Aust. Road. Vol. 4, 1285-1306.

Austroads, 2002. Mix design for pavement materials stabilised in situ. Flow charts A PT 16, Sidney.

Beegly J.l H., 2003. *Recent Experiences With Lime – Fly Ash Stabilization Of Pavement Subgrade Soils, Base, and Recycled Asphalt*. International Ash Utilization Symposium, Univ. of Kentucky, Center for Applied Energy Research, Lexington, KY, 20-22,

Bell, F.G., 1988. *Stabilisation and treatment of clay soils with lime*, Ground engineering, 10-29,

Bengraa, H., 2004. *Contribution à l'étude de la stabilisation du gonflement par ajout de sable*, Thèse de magister, université de Mohamed Boudiaf, USTO, Oran

Benlekhal A., 2009, *Etude de l'effet de l'ajout de chaux sur la résistance au poinçonnement des sols supports de chaussées*, T.F.E., ENSTP.

Bouzerara. M. A. 1998. *Route Transsaharienne : Utilisation des matériaux locaux en construction routière*. Séminaire Int. Tamanrasset.

Brandl, H., 1981. *Alteration of soil parameters by stabilisation with lime*, Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Stockholm, Vol. 3, 587- 594.

Broms B. et Browen F; 1979, *Lime columns – a new foundation method*, Proc. ASCE, jour. Geeotech. Eng. Div. 105, 539-556. .

Chen (1988) *Foundations on Expansive Soils*, Elsevier Ed.

Choquette, M. et al.,1987. *Mineralogical and microtextural changes associated with lime stabilization of marine of estern Canada*. Groupe de recherche en Geo. de l'Ing. Dept. de Geo. Canada.

Chou, L. Lime stabilization : Reactions, properties, design and construction. State of the art, report 5, Transportation research board, Washington, DC, 1987.

CNES, 2003. *Développement du réseau routier en Algérie*, Rapport.

Croft, J. B., 1964. *The process involved in the lime stabilisation of clay soils*, Proc. Aust. Road Reas. Board, Vol. 2, Par. 2, 1169-1203.

CSSA, 2006, *Chemical stabilization shrinkage and reflective cracking*.

Currin, D.D., Allen., JJ. And Little, D.N. 1976. Validation of soil stabilization Index system with manual development, Report n° FJSRL-TR-76-0006, Frank J. Seiler Research Laboratory, US Air Force Academy, Colorado.

Davidson, D.T. et Handy, R. l. 1960. *Lime and lime pouzzolane*. High way Engineering Handbook, Ed. New York, 23-98.

Domec R. Alloul, B. 1980. *Construction des chaussées au Sahara*. LNTPB

Eades, J. L & Grim, R. E. 1960, *Reaction of hydrated lime with pure mineral stabilisation*, Highway Research Board Bull, 262 : 51- 63,

Esteoule, J., Perret, P. 1999. *Etude expérimentale des phénomènes de stabilisation des sols fins par la chaux*. Bull. Liaison Labo. P et Ch.

Evans, P., Smith, W., Vorobieff, G., 1997 *Rethink of the design philosophy of lime stabilisati*.

Evans, P.1997. *Update on Lime Stabilisation* QMR Technology Transfer Seminar, Brisbane.

Fenzy, 1965. *Etat actuel de la technique routière au Sahara*. SCET – coopération.

Geiman C. M. 2005. *Stabilization of soft clay subgrades in Virginia Phase I Laboratory study*. These de Master, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute.

Habib, P., 1988. *Gonflement d'un sol contenant des sulfates et traité à la chaux et au ciment*, Revue française de géotechnique n° 42.

Haofeng, X. et al. 2009. Strength *characteristics and mechanisms of salt-rich soil-cement.* Engineering Geology, Vol. 103, pp. 33-38.

Head, K. H. 1986. *Manual of soil laboratory testing*. ELE International Limited

Holm, G., 1979. *Lime columns stabilisation experience concerning strength and deformation properties*. Van-Och, 25, 7-8, 45-49.

Holtz, W. G. 1969. *Volume change in expansive clay soils and control by lime treatment*, Proc. 2nd Int. Res. and eng.Conf. on expansive soils, Texas, 157-173.

Hopkins et al. 2002 . *Long term of benefits of stabilizing soil subgrades.* Kentucky Transportation Center;

Ingles, O. G. et Metcalf, J.B. 1972. *Soil stabilization principles and practice*. Butterworths, Sidney.

Jagannath, M. et al. 2004. Consideration *of lime stabilized layers in mechanisic - empirical pavement design.* NLA.

Khattab, S.A., & Al Mukhtar, M., 2003. *Durabilité du traitement à la chaux d'un sol argileux plastique*. XXIemes Rencontres Universitaires de Génie Civil.

Kezdi, A. 1979. Stabilized earth roads. Elsevier, Amsterdam.

Laguros et al, 1956. Evaluation of lime stabilization of loess. Proc. ASTM, 56, 1301-1319, 1956

Lasledj, A., Al Mukhtar, M ; 2008. *Effect of hydrated lime on the engineering behaviour and the microstructure of highly expansive clay*. The 12th Int. Conf. Of Int. Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMA). Goa India.

Lazzali, F., 1997. *Contribution à l'étude de la stabilisation d'un sol gonflant (bentonite) par apport de chaux*, Thèse de magister, USTHB.

Lees et al, 1982. *The effect of the clay fraction on some mechanical properties of lime – soil mixtures*. Jl. Inst. Highway Engineers, 29 n° 11. pp. 3-9. 1982.

Leroux, A., Rivière, A., sep-oct 1969. *Traitement des sols argileux par la chaux*, Bulletin de liaison LPC n° 40.

Little, D.N., 1987. *Fundamentals of the Stabilization of Soil with Lime*. Bulletin 332, National Lime Association.

Litte, D.N, 1995. *Stabilization of Pavement Subgrades & Base Courses with Lime*.

Little, D, N. 1999. *Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates,* rapport de recherche. Vol1, NLA report.(http://www.lime.org)

Little, D.N. 2007. *Assessment of in situ structural properties of lime stabilized clay subgrades*. Journal of the transportation research board, vol. 1546/1996, pp.13–23.

López-Tara, J. B. et al. 2005; . *Study of Curing Time Of Stabilized Soils*.

Louafi B., 1997. *Stabilisation d'un sol gonflant par ajout de sable*. Thèse de magister, USTHB.

Mateous, M. 1964. *Soil lime research at Ioa state university*, Proc. ASCE, Journal Soil Mech. Found. Div. 90, SM2, 27-153.

Miller, M. M., 2004. *Lime – 2003.* US Geological survey minerals Yearbook, USGS.

Nalbantoglu, Z. & Gucbilmez, E., 2002, *Utilization of an industrial waste in calcareous expansive clay stabilization*, Geotechnical Testing Journal, Vol. 25, pp. 78-84.

NLA, 1988. *Chemical lime facts*, (Bull. 214), 5th Edition, Arlington VA, www.lime.org/publications.htm

NLA, 2004. *Lime – treated soil construction manual lime stabilization & lime modification*, rapport de recherche,

Ola, S.A., 1975. *Stabilisation of Nigerian lateritic soils with cement, bitumen and lime*, 6th Reg. Conf. on soil mech. Found. Eng. South Africa.

Paige-Green, P. and Coester, K. 1996. Towards successful SPP treatment of local materials of road building. Pretoria : Dept. of Transport. (Research Report RR 93/286).

Paige-Green, P. 1999. Some properties of various proprietary soil stabilisers. Pretoria : Div. Of Roads and Transport Technology, CSIR. (Contrat Report CR-9ç/020).

Peltier, R. 1959. *Le rôle du laboratoire dans la construction routière*. Revue générale des routes et aérodromes, N° 329.

Recommandations du SETRA et du LCPC pour le traitement des sols fins à la chaux, 1972. Bulletin de liaison Labo. Ponts et Chaussées, 61.

Russell L. Buhler Cerato Amy B., 2007. *Stabilization of Oklahoma expansive soils using lime and class C Fly Ash*. GeoDenver: New Peaks in Geotechnics. GSP 162: Problematic Soils and Rocks and In Situ Characterization. Denver, CO, Feb. 18-21,

SCET – Coopération, *Rapport prélimiaire sur les resources en matériaux du premier tronçon Roude El Baguel - El Borma*.

Sha, A . 1997. *Strength and deformation principles of stabilized soils.* Int. Conf. On Ground Improvement Techniques, Macau.

Sherwood, P.T., 1967. *Views of the road Research Laboratory and soil stabilisation in the UK*, *Cement, lime and gravel.*, 42, n°9, 277-280.

Skempton A. W., 1953. The colloidal activity of clays, Proc. 3rd ICMS, Suisse, vol.1, 57-61.

Steyn, WJ vdM. 1993. The use of sulphonated petroleum product in the construction of a township road. Proceedings 2nd South African Young Geotechnical Engineers Conferece, Stellenbosch.

Terrel, R.L., J. A. Epps, E. J. Barenberg, J. K. Mitchell,1979. *Soil stabilization in pavement structures : A user's manual*, Vol. I & II. FHWA.

Thomas M Petry, PE., Glazier J., 2004, *The effect of organic content on lime treatment of highly expansive clay*. Project report.

Thomas, M. & al. 2002, *Review of stabilisation of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures – History, practice and future*. Journal of materials in Civil Engineering, pp. 447- 460.

Thompson, M. R. et Harty, J. R. 1973. *Lime reactivity of tropical and subtropical soils*. High Research record 442. Washington, DC, 105-112.

USBR (US Bureau of Reclamation), 1975. *Lime Stabilization - Reactions, Properties, Design, and Construction. State of the Art Report 5*, Transportation.