

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de Génie Civile

Mémoire

Présentée en vue de l'obtention du Diplôme de Master

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : **Génie Civile**

Spécialité : **Géotechnique**

Par

Bakhouche mohammed

Benmerouche hakima

THÈME

**Comportement mécanique des sols traités aux liants
hydrauliques à court et à moyen terme**

DEVANT LE JURY :

LOUMACHI Lazher

Université de BBA

Président

BELKADI A.Abderraouf

Université de BBA

Examineur

MAZOUZ Badis

Université de BBA

Examineur

KESSAL oussama

Université de BBA

Encadreur

Année Universitaire 2019/2020

Remerciements

Je remercie en premier lieu ALLAH qui m'a donné le courage et la volonté afin de poursuivre des études en Post-graduation.

Je remercie chaleureusement, l'encadreur de ce mémoire Dr : **Kessal Oussama**, j'ai beaucoup apprécié sa méthode de travail, la liberté qu'il m'a laissée dans l'organisation de cette recherche et ses nombreux encouragements.

Mes remerciements les plus sincères vont également aux membres du jury, qui ont accepté d'examiner ce mémoire.

Je tiens à remercier profondément mes parents et mes amis pour leur soutien et leurs encouragements incessants, et toute personne ayant collaboré ce travail.

Je tiens à remercier chaleureusement Dr : **Nabil Maafi** son aide et son encadrement, ses encouragements et surtout sa compréhension durant toute la période de préparation de ce travail.

Je tiens à remercier tous mes Professeurs de géotechnique et toute personne du corps enseignant ou administratif de Génie civil, ayant contribué de près ou de loin à ma formation surtout aux ingénieurs au laboratoire de GC

Ma gratitude aux membres de jury qui me font l'honneur de juger mon travail de fin d'étude.

Table des matières

Résumé.....	1
المخلص	2
Abstract	3
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	4
Chapitre I : Étude bibliographique sur les sols traités.....	7
I.1. Introduction.....	7
I.2. Les liants hydrauliques	8
I.2.1. Le ciment	8
I.2.2. Les liants hydrauliques routiers (LHR).....	9
I.3. Effets des liants sur les sols	10
I.3.1. Effet régulateur de l'état hydrique	10
I.3.2. Flocculation et capacité d'échange cationique <i>CEC</i>	10
I.4. Réaction pouzzolanique	12
I.5. Stabilisation à long terme.....	15
I.6. Résistance à la compression.....	16
Chapitre II : Matériaux, matériels et essais	18
II.1. Introduction	18
II.2. Préparation des sols	18
II.2.1. Ajustement de la teneur en eau pour la confection des échantillons	18
II.2.2. La confection de l'échantillon de sol traité.....	19
II.3. Essais de caractérisations.....	20
II.3.1. Essais de caractérisation géotechnique et chimique	20
II.3.2. Détermination des dosages en chaux/ciment.....	21
II.3.2.1. Résumé de la méthode d'essai	21
II.3.2.2. Préparation de l'échantillon	21
II.3.2.3 Proportion sol -chaux et relation de pH.....	23

II.3.2.4 Calcule	24
II.3.2.5 Étalonnage et normalisation	24
II.4. Détermination des performances mécaniques	25
II.4.1. Confection des éprouvettes.....	25
II.4.2 Essai de compression simple	26
II.5. Caractérisation des sols non traités.....	27
II.5.1. Étude aux diffractogrammes des sols non traités	27
II.5.2. Détermination de la nature du sol.....	28
II.5.3. Composition chimique des sols	29
III.6. Caractéristiques de ciment :	29
III.6.1. Caractéristiques chimiques :.....	29
III.6.2. Caractéristiques physiques :	30
III.6.3. Caractéristiques mécaniques :	30
Chapitre III : Les résultats expérimentaux.	31
III.1. Introduction	31
III. 2. Programme d'essais de la résistance à la compression simple (Rc)	31
III. 3. Evolution de la résistance à la compression simple (Rc).....	31
III.4. Effet de ciment et Porosité sur la résistance à la compression	32
III.5. Effet de ciment et poids volumique sur la résistance à la compression	33
III.6. Conclusion.....	33
Conclusion Générale et Perspectives	32
Perspectives.....	32

Liste des figures

Figure I. 1: Structure microscopique d'une argile non traitée et traitée (Little 1987).....	10
Figure I. 2: Réactions chimiques entre les liants et le sol (Ahnberg et Johanson 2005).....	12
Figure I. 3: Hydrates calciques développés par réaction pouzzolanique à partir d'argiles (Locat 1990)	13
Figure I. 4: Solubilité des aluminates et des silicates en fonction du pH (Little 1987)	14
Figure I. 5: Réaction pouzzolaniques (Marrot 2010)	15
Figure I. 6: Schémas du mécanisme de stabilisation des sols traités (Locat 1990).....	15
Figure I. 7: Influence du type de ciment sur la résistance en fonction du sol rencontré (Kawasaki et al. 1981).....	17
Figure I. 8: Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage en ciment à différentes durées de cure (Haofeng 2009)	17
Figure II. 1: Préparation du sol traité	20
Figure II. 2: Détermination du PFC (Marrot, 2010).....	23
Figure II. 3: Vue d'ensemble de pH-mètre	25
Figure II. 4: Types d'éprouvettes confectionnés pour la mesure de résistance à la compression simple	26
Figure II. 5: Vue d'ensemble de dispositif de mesure la résistance à la compression simple .	26
Figure II. 6: Diffractogramme de rayons X du sol A1	28
Figure II. 7: Analyse granulométrique des sols non traités	28
Figure III. 1: Evolution de la résistance à la compression simple du sol non traité et traité à différents dosages en ciment	31
Figure III. 2: Variation de la résistance à la compression avec la porosité.....	32
Figure III. 3: Variation de la résistance à la compression avec le poids volumique	33

Liste des tableaux

Tableau II. 1: Les essais de caractérisation géotechnique du sol	20
Tableau II. 2: Valeur de bleu de méthylène et des limites d'Atterberg des sols	29
Tableau II. 3: Composition chimique des sols	29
Tableau II. 4: Analyse chimique du ciment.	29
Tableau II. 5: Composition minéralogique du clinker.	29
Tableau II. 6: Propriétés physiques du ciment.	30
Tableau II. 7: Propriétés mécaniques du ciment.	30

LISTE DES NOTATIONS

CEC : Capacité d'échange cationique.

DRX : Diffraction du rayon X.

Ip : Indice de plasticité (%).

ρ_d : Teneur en eau à l'optimum de Proctor (%).

RC : Résistance à la compression simple (MPa).

VBS : Valeur de bleu de méthylène.

WL : Limite de liquidité (%).

Wp : Limite de plasticité (%).

XRF : fluorescence du rayon X.

Résumé

Ce travail traite des résultats antérieurs d'une étude expérimentale sur le comportement de sol couramment rencontrés sur les chantiers de terrassement a été traité par le ciment (sa teneur varie 2. 3. 5 et 7%). Une méthodologie de dosage pour les sols traités au ciment a été établie sur la base de critères rationnels dans lesquels le dosage en ciment joue un rôle fondamental dans l'évaluation de la résistance à la compression. La présente recherche quantifiant l'influence de la quantité de liant et la porosité dans l'évaluation de la résistance à la compression. Les résultats ont indiqué que la résistance à la compression augmente proportionnellement avec l'augmentation de la quantité de ciment. Le sol qui contient plus de 5% de ciment montre un bon comportement mécanique et physique. Une fonction puissance s'adapte mieux à la relation résistance à la compression-porosité (η) pour le sol traité par le ciment.

Mots clés : sol, ciment, résistance à la compression, porosité, traitement.

الملخص

يتناول هذا العمل النتائج السابقة لدراسة تجريبية حول سلوك التربة التي وجدت بشكل شائع في أعمال الحفر والتي تم معالجتها بالأسمنت (بالنسب 2. 3. 5 و7%). إن منهجية إضافة الجرعات للتربة المعالجة بالأسمنت قد وضعت على أساس المعايير المنطقية التي تلعب فيها جرعة الأسمنت دورًا أساسيًا في تقييم مقاومة الضغط. يحدد البحث الحالي تأثير كمية الإسمنت والمسامية في تقييم مقاومة الضغط. أشارت النتائج إلى أن مقاومة الانضغاط تزداد بشكل متناسب مع زيادة كمية الأسمنت. إن التربة التي تحتوي على أكثر من 5% من الإسمنت تظهر سلوكًا ميكانيكيًا وفيزيائيًا جيدًا. كما أن وظيفة الطاقة تتكيف بشكل أفضل مع علاقة قوة الضغط والمسامية للتربة المعالجة بالأسمنت.

الكلمات المفتاحية: التربة ، الإسمنت ، مقاومة الضغط ، المسامية ، المعالجة

Abstract

This work presents previous results of an experimental study on the behavior of soil commonly encountered on earthworks has been treated with cement (its content varies 2. 3. 5 and 7%). A dosage methodology for treated soils with cement has been established on the basis of rational criteria in which the cement dosage plays a fundamental role in the assessment of compressive strength. The present research quantifying the influence of cement quantity and porosity in the evaluation of compressive strength. The results indicated that the compressive strength increases proportionally with the increase in the amount of cement. Soil which contains more than 5% cement shows good mechanical and physical behavior. A power function adapts better to the compressive strength-porosity (η) relationship for soil treated with cement.

Key words: soil, cement, compressive strength, porosity, treatment.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La technique de traitement des sols par liant hydraulique (ciment) est connue dans le domaine des travaux de terrassement, construction de remblais et des routes (autoroutes, voies ferrées, routes, aéroports, etc.). Le traitement par le ciment est une méthode économique (mise en œuvre rapide, moins de moyens nécessaires), écologique (peu de matériau mis en décharge) et durable. Actuellement elle est considérée comme une méthode importante de réutilisation des sols inutilisables pour améliorer ses propriétés physiques et mécaniques par l'augmentation de la résistance, rigidité, homogénéité, durabilité et la diminution de perméabilité.

L'ajout de ciment à un sol provoque deux ensembles de réactions de base, l'un étant une réaction à court terme et le second, une réaction à long terme. L'effet immédiat de l'addition de ciment est de provoquer une floculation et une agglomération des particules d'argile causées par un échange de cations à la surface des particules de sol. Le résultat de cette réaction à court terme est principalement d'améliorer la maniabilité et la plasticité, ce qui améliore sa manipulation et sa mise en œuvre par compactage des sols. Les réactions à long terme peuvent nécessiter des semaines, des mois voire des années, en fonction de la vitesse de réaction chimique et de l'hydratation des silicates et des aluminates (C-S-H, C-A-H et C-S-A-H). Il en résulte la formation de matériaux cimentaires, qui lient les particules du sol et améliorent les propriétés mécaniques du sol traité. Donc la quantité de ciment dans un sol pour toutes les applications géotechniques est nécessaire.

L'essai de compression est l'un des paramètres les plus importants pour la détermination du comportement sol-liant, et passer aux méthodes de dosage. Une méthodologie rationnelle de dosage de ciment Portland-sol a été appliquée. La qualité des matériaux, les technologies et les conditions de mise en place ont directement influencé les propriétés mécaniques du sol traité telles que la résistance. La méthode la plus utilisée pour caractériser cette résistance est le test de résistance à la compression.

Certaines recherches encouragent l'utilisation de nouvelles méthodes et corrélations tenant compte de la disponibilité, du prix et du coût du transport lors de la caractérisation et contrôlent la résistance des propriétés des sols traités. Ces méthodes et ces relations permettent de choisir l'effort de compactage et la quantité de ciment pour obtenir un mélange répondant à l'objectif recherché au meilleur moment et au meilleur coût.

Le principal objectif de la présente recherche est le suivant:

- Analyser les performances des sols contenant des différents pourcentages de ciment, qui est affecté par de multiples facteurs, tels que les propriétés physico-chimiques du sol, la porosité et le compactage

Ce travail est structuré en quatre grands chapitres ;

Chapitre I : étude bibliographique

Ce chapitre est une revue de la littérature des travaux de recherches sur le comportement des sols traités, il sera consacré à une étude bibliographique sur l'application du traitement des sols à la chaux, leur processus physico-chimique, les modifications induites par le ciment à court terme et à long terme (concentrera sur l'effet de la stabilisation sur la microstructure, et les propriétés mécaniques).

Chapitre II (matériaux matériels et essais) présentent les différents matériaux, matériels et méthodes d'essais utilisés, tels que les essais de détermination des performances mécaniques (résistance à la compression simple (R_c)). Analyses de la microstructure et de la minéralogie : la diffraction aux rayons X (DRX) et l'analyse chimique par fluorescence X (XRF). Selon la classification des sols (NF P11-300), type de sol ont été sélectionné pour cette étude c'est A1.

Chapitre III : Les résultats expérimentaux.

Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés et discutés dans la troisième partie. Nous avons abordé l'étude de l'influence de la : dosage du ciment sur le comportement de sol traité précisément sur la résistance à la compression.

Une dernière partie vient apporter des conclusions générales et quelques perspectives de travail

Chapitre I : Étude bibliographique sur les sols traités

I.1. Introduction

La technique des sols traités est connue dans le domaine des terrassements, dans la construction de remblais et de voirie (autoroutes, voies ferrées, route, aéroports ... etc.). L'utilisation du ciment comme stabilisateur du sol a été développé au cours de la deuxième guerre mondiale. Les ciments en effet d'utilisé pour stabiliser les pistes d'aérodromes. Depuis les années 80, l'emploi des liants à base de ciment sa connu un développement important dans les domaines routiers, notamment en présence de sol fin (**Mouroux et al, 1988**).

Le traitement du sol au liant hydraulique est communément appelé Soil-Mixing et consiste à mélanger mécaniquement et en place le sol avec un liant (Ciment) pour améliorer ses propriétés mécaniques. Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques présentant une faible adaptation à la chaux. Le ciment rigidifie mieux et plus rapidement les sols comparativement à la chaux.

Le traitement des sols par le ciment est une méthode écologique et durable, actuellement considérée comme une méthode importante pour la réutilisation et la valorisation des sols inutilisables, couramment utilisé afin d'éviter le transport et implique une stabilisation des sols à des coûts très intéressants.

Le traitement de sol par le ciment a un double effet, le premier est d'améliorer les caractéristiques du sol à court terme, le second est de stabiliser le sol traité (à moyen et à long terme) (**Paige Green., (2008); Lemaire et al., (2013); Elkady et al., (2016)**). L'ajout de ciment a pour effet immédiat la floculation et l'agglomération, du fait de l'échange de cations à la surface des particules d'argile. Le résultat de cette réaction à court terme est principalement d'améliorer l'ouvrabilité et la plasticité du sol ce qui améliore sa maniabilité et sa mise en œuvre par compactage pour compléter la capacité requise des sols (**Alrubaye et al., (2016, 2017)**).

À long terme; les réactions peuvent nécessiter une semaine à un mois, voire un an, selon la vitesse de décomposition chimique et d'hydratation des aluminates et des silicates. Il en résulte la formation de matériaux à base de ciment (C-S-H et C-S-A-H), qui lient les particules du sol et améliorent le comportement mécanique du sol traité. La stabilisation est un processus de changement (généralement à moyen ou long terme), les caractéristiques du sol pour l'amener à l'état final de stabilité, notamment contre l'action de l'eau, et a donné un sol avec une capacité

portante acceptée. Il conserve sa forme originale, sa stabilité, sa qualité et maintient une résistance résiduelle adéquate à long terme.

I.2. Les liants hydrauliques

Ce sont des produits d'origine minérale qui par réaction avec l'eau donnent des réseaux cristallins enchevêtrés ayant une bonne cohésion et pouvant aboutir à des jonctions avec le squelette minéral. Ils sont tous à base de la chaux qui va réagir avec l'argile par échange cationique, floculation et agglomération, carbonatation et par réaction pouzzolanique. Ces réactions se traduisent par une amélioration immédiate des propriétés mécaniques du sol et une diminution de la sensibilité à l'eau par floculation et échange cationique.

Les liants hydrauliques les plus utilisés pour stabiliser les sols ou renforcer les matériaux sont, le ciment, la chaux, liants hydrauliques routiers (LHR) et les cendres volantes. Leur action résulte essentiellement de l'effet de prise et de la cristallisation de leurs constituants par hydratation. 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.

I.2.1. Le ciment

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. 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.

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. 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.

(**Mitchell (1992)**) remarquent qu'appliqués à des argiles très plastiques, les ciments portlands sont, moins efficaces comparativement à la chaux. En effet, les argiles gonflantes ont une affinité à l'eau tellement grande que le ciment ne peut pas s'hydrater suffisamment au point que les réactions pouzzolaniques s'achèvent complètement. Généralement, le ciment est avantageux d'être utilisé lorsque les sols ne sont pas réactifs à la chaux (**Chen, 1988; Nelson et al, 1992**). Si la quantité d'eau est suffisante pour la réaction de prise de ciment, l'utilisation de ce dernier réduit la limite de liquidité, l'indice de plasticité et de potentiel de gonflement du sol. **Groft (1967)** rapporte que le ciment fait augmenter la limite de retrait et la résistance du sol au cisaillement de 25% à 5% fois mieux que la chaux.

I.2.2. Les liants hydrauliques routiers (LHR)

Des liants spéciaux routiers (LHR) ont été étudiés et mis au point depuis plusieurs années pour le traitement des sols en place ou en centrale et pour la fabrication de matériaux d'assises de chaussées, le LHR concerné présente, pour un type de sol et une nature d'ouvrage donnés, un comportement satisfaisant, mais toute extrapolation à d'autres paramètres de chantier comporte une part de risque qu'il convient d'évaluer pour chaque nouveau chantier.

Les principes d'action des LHR ne sont pas fondamentalement différents de ceux des ciments car on y retrouve, mais en proportion différentes, les mêmes constituants et donc des phénomènes de prise hydraulique de même nature, mais le plus souvent avec des cinétiques spécifiques.

Les LHR peuvent présenter certains avantages et notamment :

- leur coût de fabrication plus faible, car leur composition est en forte proportion à base de constituants ne nécessitant pas de cuisson spécifique (laitiers, cendres volantes, pouzzolanes, etc.),
- leur possibilité de mieux s'adapter à un cas de chantier particulier. En effet, leur fabrication pouvant être gérée de manière plus souple que celle des ciments, il peut être envisagé, si les enjeux du projet le justifient, de fabriquer un produit optimisé à un sol particulier et ayant une cinétique de prise ajustée à l'époque des travaux et/ou aux contraintes d'organisation du chantier. En contrepartie, l'absence, jusqu'à présent, de normalisation de procédure de certification gêne en partie le développement de ces produits (du fait, notamment, de la nécessité de pratiquer des études plus détaillées qu'avec des ciments).

I.3. Effets des liants sur les sols

I.3.1. Effet régulateur de l'état hydrique

L'ajout d'un liant au sein du sol provoque une modification de sa teneur en eau. Cet effet est plus sensible avec la chaux qu'avec les liants hydrauliques.

Il est admis que les liants hydrauliques réduisent la teneur en eau du sol dans la proportion $\frac{1}{3}$ à $\frac{1}{2}$ de la proportion de ciment introduit.

Les fortes interactions se développent entre les particules de sol. Le plus haut squelette continu des formes matérielles dure et fortes et enferme une matrice de sol inchangé, renforçant le matériel traité et en remplir des vides

I.3.2. Flocculation et capacité d'échange cationique CEC

L'action immédiate du ciment est limitée. Cependant lors de l'utilisation d'un liant hydraulique comportant une forte proportion de chaux, la flocculation des argiles peut se produire. Plus généralement, les liants hydrauliques sont considérés comme des correcteurs granulométriques améliorant les caractéristiques du sol lors du compactage et de l'essai de portance immédiat.

Pratiquement tous les sols traités par le ciment, font des réactions d'échange cationique et de flocculation – agglomération. Cette réaction produit des modifications immédiates dans les propriétés et la structure du sol par échange cationique et par flocculation (**Diamond et al. 1965** ; **Herzog et al.1963**) comme illustrée dans la figure I.1.

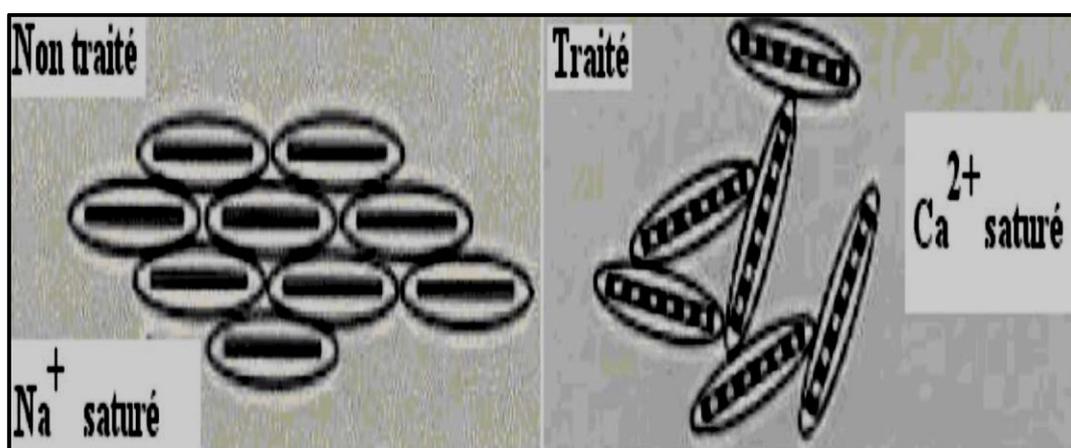


Figure I. 1: Structure microscopique d'une argile non traitée et traitée (Little 1987)

L'ajout d'un liant hydraulique tel que le ciment 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. Les ions de calcium non échangés seront adsorbés, ce qui conduit à augmenter la densité en ions. C'est à dire une baisse dans la capacité d'échange des particules. Les cations divalents Ca^{++} sont alors en mesure de placer les cations monovalents adsorbés à la surface des argiles, ainsi que ceux en plus faible concentration ou de plus petite taille. La hiérarchie est donnée par la série dite « lyotropique » dans laquelle les cations de droite remplacent ceux de gauche : Li Na H K NH_4 Mg Ca Al. 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, maniable, perd une partie de sa sensibilité à l'eau et améliorations immédiates dans la plasticité du sol, sa maniabilité, sa résistance et sa déformation.

En général, cette phase de floculation - agglomération, produit des sols faciles à malaxer, à travailler et à compacter. Ces réactions immédiates sont principalement responsables de la réduction du retrait et du gonflement du sol.

(Croft et al. 1962) ont rapporté que le ciment pouvait s'hydrater normalement dans les minéraux argileux, que la kaolinite et l'illite consommaient peu d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, CH) et que la résistance du sol stabilisé constitué du sol principalement composé était plus élevée. La montmorillonite consommait plus de CH et la résistance du sol stabilisé constitué du sol principalement composé était plus faible. **(Cui 2011)** a signalé que plus la teneur en montmorillonite de la bentonite était élevée, plus la capacité d'échange de cations du sol était élevée (*CEC*). Saitoh et al. **(Saitoh et al. 1986)** ont rapporté que l'hydratation du ciment produisait principalement du silicate de calcium hydraté C-S-H et du CH. Le sol pouvait absorber le CH jusqu'à ce qu'il atteigne le point de saturation. Ensuite, une réaction pouzzolanique s'est produite entre le CH restant et le sol pour générer des C-S-H supplémentaires, qui déterminent la différence de résistance entre les sols stabilisés au ciment et fabriqués à partir de sols différents.

(Nakatsukasa 1986) a signalé que d'autres cations adsorbés par le sol pouvaient échanger avec du Ca^{2+} et qu'il existait une certaine corrélation entre la (*CEC*) et la résistance du sol stabilisé par le ciment. Cette étude a révélé le phénomène expérimental, mais n'a pas expliqué le mécanisme. **(Kawamura et al. 1971)** ont étudié la relation entre la *CEC* dans le sol et la résistance des sols stabilisés, et ont proposé que le C-S-H présentant différents rapports chaux-silicate puisse être formé dans les sols stabilisés par la chaux.

Aucune preuve expérimentale, cependant, ne peut prouver que le C-S-H avec différents rapports calcaire-silicate peut conduire à une différence de résistance significative dans les sols. (Huang et al. 1994) ont proposé que, du fait que le CH dans les sols stabilisés puisse être sous-saturé, la consommation supplémentaire d'ions Ca^{2+} et OH dans le sol diminue la quantité de C-S-H générée par le ciment. Ceci explique pourquoi une quantité de ciment ne produirait pas une quantité égale d'hydrates dans les sols stabilisés.

I.4. Réaction pouzzolanique

Les réactions chimiques entre ces liants, l'eau et le sol ont été présentées en détails par (Porbaha et al. 2000; Bruce 2001; Axelsson et al. 2002; Ahnberg et Johanson 2005). La figure I.2 récapitule les réactions que nous allons décrire plus en détails.

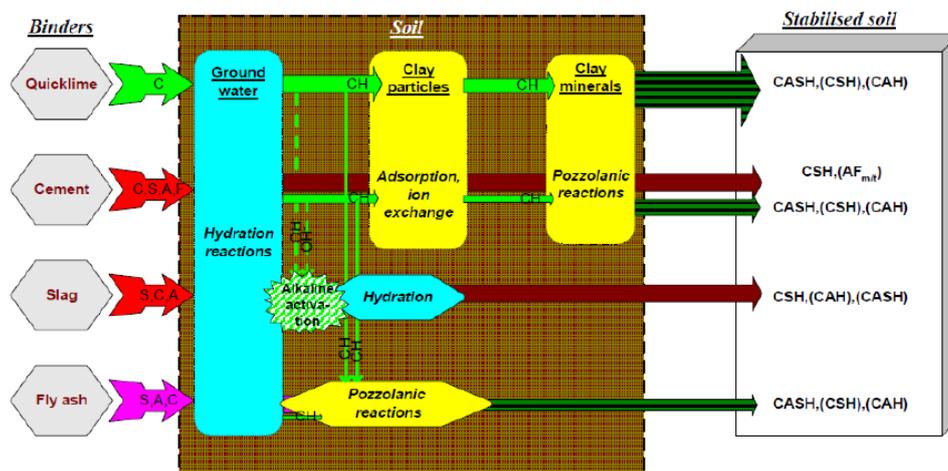


Figure I. 2: Réactions chimiques entre les liants et le sol (Ahnberg et Johanson 2005)

L'ajout des liants permet une amélioration à plus long terme des sols. L'utilisation d'un traitement aux liants hydrauliques aboutit à l'amélioration des caractéristiques mécaniques du matériau traité. Dans le cas du traitement à la chaux, la réaction pouzzolanique permet l'acquisition de caractéristiques mécaniques intéressantes et ces caractéristiques augmentent graduellement sur la durée de l'étude (un an). Dans le cas des ciments, les caractéristiques mécaniques sont acquises dans les premiers mois bien que des augmentations des caractéristiques mécaniques sur un an et plus soient observées. Dans le cas du ciment, il est admis qu'après 28 jours la quasi-totalité du ciment a réagi, c'est-à-dire que les caractéristiques sont presque définitives. Cet écart provient du fait que lors du traitement au ciment, les minéraux aux propriétés liantes se développent directement à partir du ciment.

Des C-S-H se forment à partir de l'alite (C_3S) et de la bélite (C_2S). L'hydratation de l'alite et de la bélite mais aussi des aluminates calciques provoque la libération d'un excès de chaux qui donne de la portlandite comme illustré dans la figure I.3. L'aluminate calcique permet la formation de différentes phases dont des aluminates calciques hydratés (C_4AH_{13} et C_3AH_6), de l'ettringite et du monosulfoaluminate en se combinant avec le soufre.

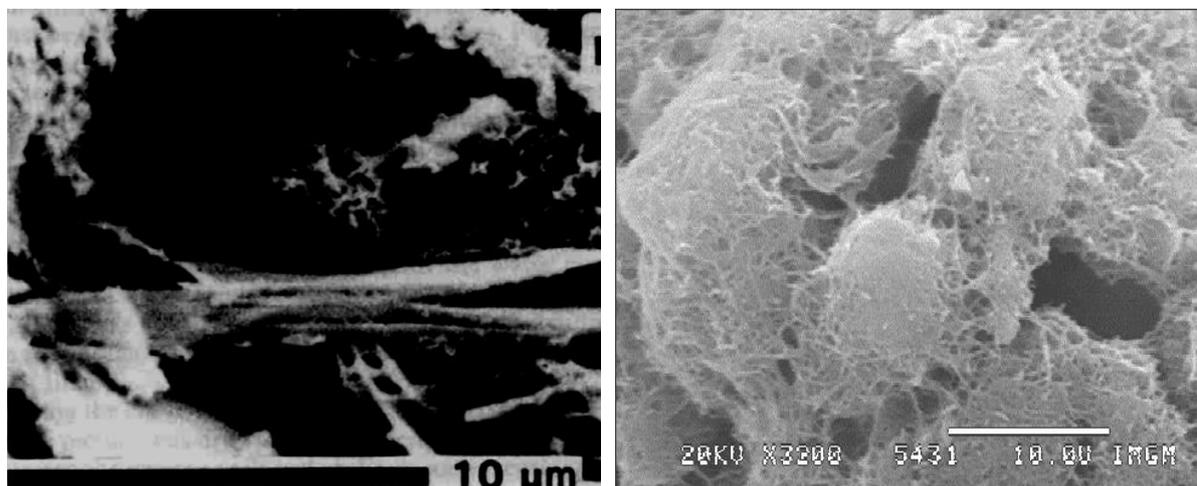


Figure I. 3: Hydrates calciques développés par réaction pouzzolanique à partir d'argiles (Locat 1990)

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. Cette réaction a lieu entre le ciment, l'eau et les silicates et/ou des aluminates des sols argileux pour donner dans le temps, des agents cimentant qui sont essentiellement les silicates de calcium hydratés (C-S-H) ou les aluminates de calcium hydratés (C-A-H), similaires à ceux produits durant l'hydratation de ciment (Eades et al. 1960 ; Bell, 1996 ; Rao et al. 2001 ; Locat et al. 1990 ; Perret, 1977; Estéoule et al. 1979 ; Choquette, 1988). 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 le ciment qui autorise la dissolution des aluminates et silicates comme illustré dans la figure I.4.

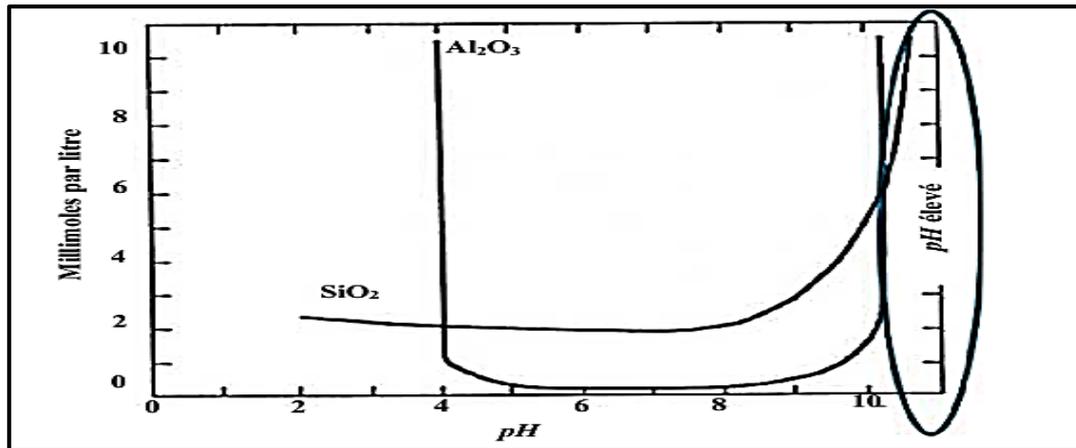


Figure I. 4: Solubilité des aluminates et des silicates en fonction du pH (Little 1987)

Quand une quantité suffisante de ciment 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 pour former des ciments qui se consolident dans un processus graduel qui peut durer plusieurs années. Ces réactions de cimentation provoquent les augmentations principales de la résistance dans le mélange sol-ciment due aux phénomènes de prise et de cristallisation (Bahar et al. 2018 ; Boardman et al. 2001). Il est important de rappeler que le gain en résistance dépend aussi de la quantité des silicates et des aluminates dans l'argile traitée. 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.

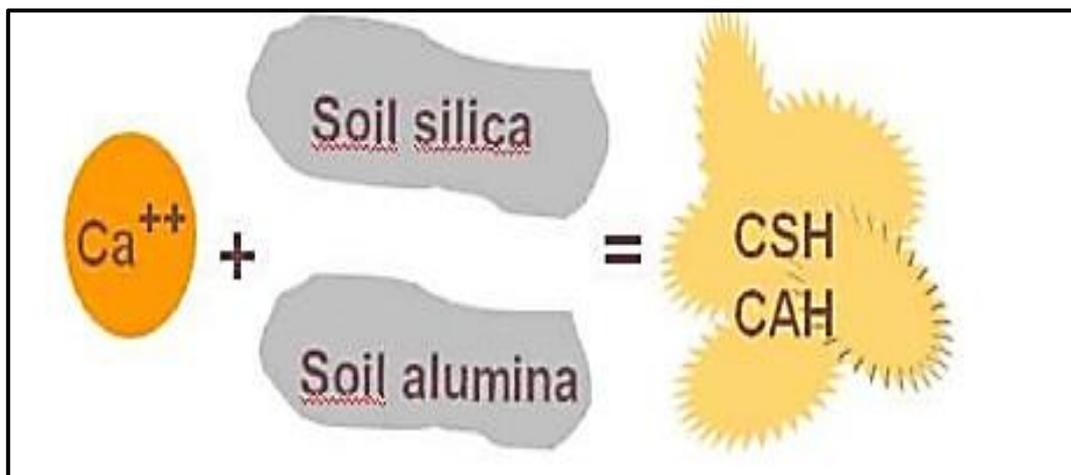


Figure I. 5: Réaction pouzzolaniques (Marrot 2010)

I.5. Stabilisation à long terme

Une fois que l'affinité de sol est satisfaite par les cations Ca^{2+} , une autre réaction, appelée réaction pouzzolanique, se déclenche entre le ciment et les couches tétraédrique et octaédrique des feuillettes argileux et le calcium, en particulier sur les bords des particules d'argile (Ingles et al. 1973 ; Choquette, 1988 ; Locat et al. 1990 ; Le Runigo, 2008). A noter que les cations de calcium fixés dans l'espace interfoliaires de la fraction argileuse ne participent pas à la réaction pouzzolanique comme illustré dans la figure I.6.

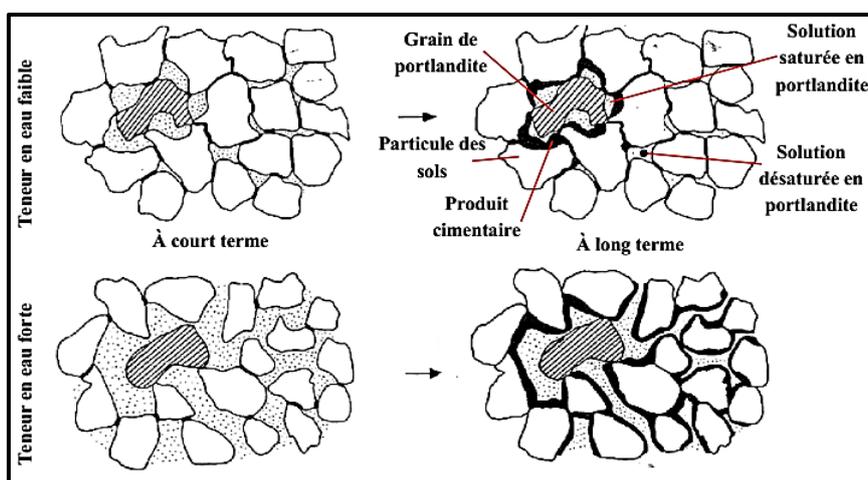


Figure I. 6: Schémas du mécanisme de stabilisation des sols traités (Locat 1990)

En effet, la dissolution de ciment dans l'eau du sol (libération des cations Ca^{2+} et anions OH^-) permet la saturation de la solution en calcium avec une élévation de pH. En milieu basique et saturé en cation de calcium, les argiles sont attaquées. En conséquence, elles libèrent l'alumine et la silice qui réagissent avec le calcium en présence d'eau et les hydroxyles provenant de la

chaux pour former des hydrates calciques similaires à ceux des ciments ; hydrate de silicate Calcique (C-S-H), hydrate d'aluminate calcique (C-A-H) et hydrate alumino-silicate calcique (C-A-S-H) . Ces hydrates tapissent la surface des particules du sol et en cristallisant, agissent comme des liens entre les particules du sol. Cette réaction consomme donc les argiles et aboutit à la formation de nouveaux minéraux aux propriétés liantes. Les différentes argiles (kaolinite, illite et smectite) ne réagissent ni avec la même cinétique ni de la même manière avec le ciment **(Eades et Grim : 1960, le Roux : 1969)**.

Cette réaction pouzzolanique a une cinétique lente qui nécessite, à température Ordinaire, plusieurs mois avant que ses effets puissent être appréciés. Cependant, la cinétique dépend de plusieurs facteurs dont la température de maturation et la teneur en eau des sols traités. En dessous de 5°C, la cinétique est ralentie alors qu'elle s'accélère avec l'augmentation de la température. Une humidité relativement importante favorise la réaction pouzzolanique par la mobilité des ions et la formation des minéraux uniforme dans une surface plus ou moins étendue autours des gains de chaux **(Locat et al : 1990, Bel : 1996)**.

I.6. Résistance à la compression

D'après la figure I.7a, on peut voir les résultats obtenus pour des mélanges réalisés avec un ciment Portland ordinaire et un ciment au laitier sur un sol japonais provenant de la baie de Tokyo, tandis que sur la figure I.7b on peut voir des résultats obtenus avec les mêmes ciments qui ont servi à traiter un sol provenant de l'île de Kyushu. On observe clairement que dans un cas c'est le ciment Portland ordinaire qui est le plus efficace, tandis que dans l'autre, c'est le ciment au laitier.

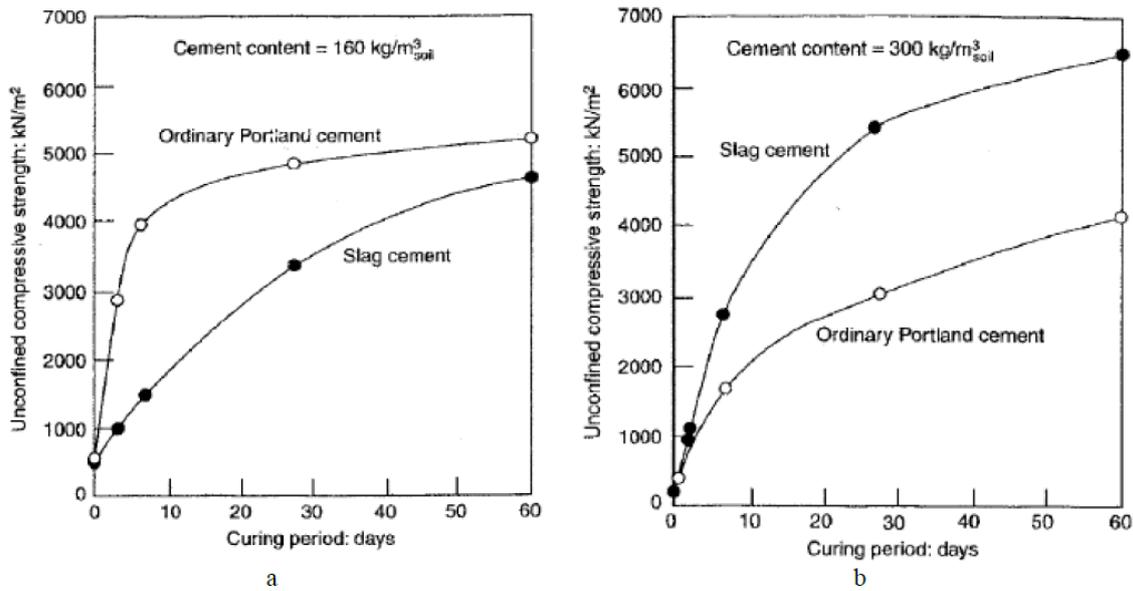


Figure I. 7: Influence du type de ciment sur la résistance en fonction du sol rencontré (Kawasaki et al. 1981)

D'Après (Haofeng 2009), la résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours, augmente au fur et à mesure que l'augmentation du pourcentage en ciment comme illustré dans la figure I.8

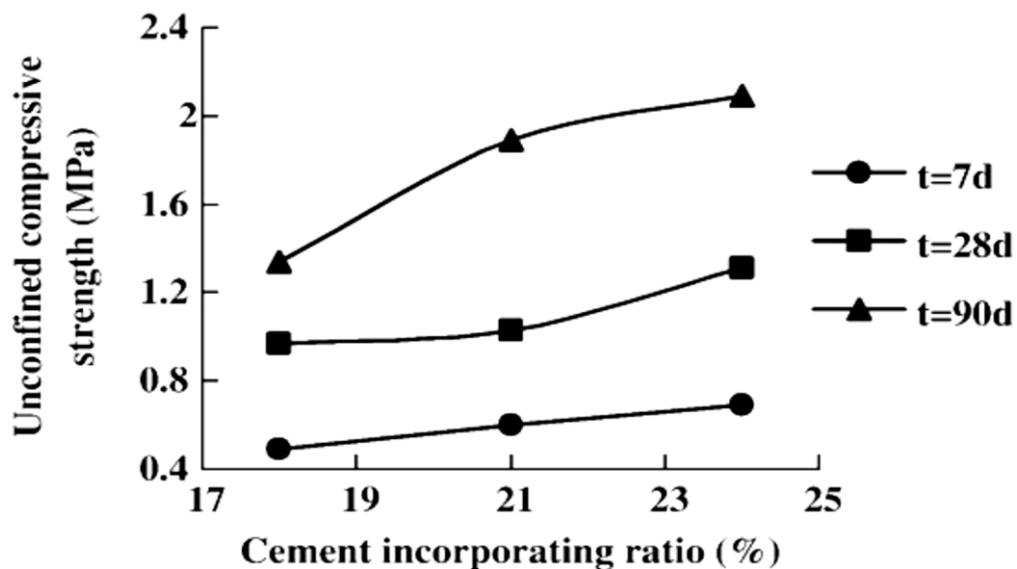


Figure I. 8: Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage en ciment à différentes durées de cure (Haofeng 2009)

CHAPITRE II

Techniques expérimentales

Chapitre II : Matériaux, matériels et essais

II.1. Introduction

Pour étudier la stabilisation des sols traités par le ciment et leur comportement, différents essais ont été effectués dans cette étude. Les essais réalisés sont :

- **Essais de caractérisation** : caractérisation géotechnique, caractérisation des éléments chimique et détermination des dosages en chaux utilisés.

Les essais de caractérisation géotechnique comportent l'essai de granulométrie, l'argilosité (valeur de bleu de méthylène), limites d'Atterberg. La diffraction aux rayons X est appliquée pour analyser des minéralogies du sol. La Fluorescence X est appliquée pour déterminer les éléments chimiques du sol.

- **Essais pour étudier la stabilisation à moyen et à long terme** : Les essais mécaniques ont été réalisés pour analyser l'évolution des performances mécaniques des sols traités à la chaux, tels que l'essai de compression simple (Rc)

La technique de préparation des sols non-traités et traités par le ciment pour ces essais est également détaillée dans ce chapitre.

II.2. Préparation des sols

II.2.1. Ajustement de la teneur en eau pour la confection des échantillons

L'ajustement de la teneur en eau à une valeur désirée est l'étape la plus importante dans la préparation des matériaux destinés à la confection des éprouvettes (w_1 (%) est la teneur en eau initiale, w_2 (%) est la teneur en eau visée).

On commence par un prélèvement d'une quantité « m » de l'échantillon du sol à traité et en l'introduit dans une boîte, en prenant soin de bien étaler la surface de l'échantillon du sol. On distingue deux cas d'ajustement par la comparaison entre les deux valeurs de teneur en eau :

- On veut obtenir une valeur de la teneur en eau supérieure à la valeur initiale lorsque $w_2 > w_1$ %. Afin de parvenir à la teneur en eau visée, on doit ajouter une quantité d'eau m_{eau} dans l'échantillon de sol dans ce cas :

$$m_{eau} = \left[\frac{w_2}{100} \cdot \left(\frac{m}{1 + \frac{w_1}{100}} \right) \right] - \left[\frac{w_1}{100} \cdot \left(\frac{m}{1 + \frac{w_1}{100}} \right) \right] \quad II.1$$

- Après l'ajustement pour parfaire l'homogénéité de la répartition d'eau et éviter la dessiccation, la boîte est fermée, le sol est conservé dans la condition hermétique durant un temps en fonction de l'argilosité du sol (NF P 94-093) : en général, la durée d'homogénéisation est égale à 12h ; dans le cas des matériaux plus argileux, elle dure 1 à 2 jours.

II.2.2. La confection de l'échantillon de sol traité

Dans le cas de confection de l'échantillon de sol traité, trois valeurs de teneur en eau sont à considérer (w_1 % est la teneur en eau au début du sol prélevé, w_2 % est la teneur en eau de préparation avant l'ajout de la chaux dans le sol, w_3 % est la teneur en eau visée après le traitement à la chaux et le malaxage).

On remarque que dans la condition de laboratoire, un traitement à x % de chaux vive provoque la réduction d'approximativement x % de la teneur en eau du sol (w_3 % = w_2 % - x %). Par exemple, dans le cas général d'un traitement à 3% de chaux vive, cela provoquera une réduction approximative de la teneur en eau du sol de l'ordre de 3%.

L'ajustement est effectué comme dans le cas du sol non traité pour la teneur en eau de l'échantillon du sol de w_1 % à w_2 %. La quantité de ciment ajoutée « m_{Ciment} » est déterminée selon l'équation (II.2) après une durée d'homogénéisation du sol dans la boîte hermétique :

$$m_{Ciment} = \left[\frac{C}{100} \cdot \left(\frac{m}{1 + \frac{w_1}{100}} \right) \right] \quad (II.2)$$

2)

Où :

C (%) : dosage en chaux,

m : masse initial du sol.

Après humidification du matériau à une teneur en eau de w_2 %, on saupoudre la chaux vive nécessaire au traitement sur le matériau. Le malaxage se déroule en deux phases : un malaxage à vitesse lente durant moins d'une minute, suivi d'un malaxage à vitesse rapide durant 2 minutes. On verse le sol traité dans le moule de compactage en le laisse se reposer durant une heure à une heure est demi avant le compactage. Les processus et les étapes de confection de l'échantillon de sol traité sont présenté est illustré dans la figure II.1 :



Figure II. 1: Préparation du sol traité

II.3. Essais de caractérisations

II.3.1. Essais de caractérisation géotechnique et chimique

Les essais de caractérisation géotechnique du sol et les Norme correspondantes sont regroupés dans le tableau II.1 suivant :

Tableau II. 1: Les essais de caractérisation géotechnique du sol

N°	Essai	Norme	
1	Granulométrie par la méthode de tamisage à sec après lavage pour les éléments supérieurs à 80 μm	NF P94-056	ASTM D 422
2	Granulométrie par sédimentation pour les éléments supérieurs à 80 μm	NF P94-057	ASTM D 422
3	Détermination la valeur de bleu de méthylène (VBS) pour évaluer l'argilosité	NF P 94-068	ASTM C 837

4	Détermination des limites d'Atterberg et de l'indice de plasticité	NF P 94-051	ASTM D 4318
5	Détermination de la courbe Proctor Normal	NF P 94-093	ASTM D 698
6	Détermination de pH	-	ASTM D 6276

II.3.2. Détermination des dosages en chaux/ciment

Cette méthode d'essai fournit un moyen d'estimer la proportion de sol-chaux requise pour la stabilisation d'un sol. Cette méthode d'essai est réalisée sur un sol passant au tamis de 425 μm . La proportion optimale sol-chaux/ciment pour la stabilisation du sol est déterminée par des essais de caractéristiques spécifiques du sol stabilisé, telles que la résistance à la compression ou l'indice de plasticité. Certains sous-produits fortement alcalins (poussières de four à chaux, à ciment, etc.) ont été utilisés avec succès pour stabiliser le sol. Cette méthode d'essai n'est pas destinée à ces matériaux et tout produit de ce type aurait besoin d'être testé pour ses caractéristiques spécifiques.

II.3.2.1. Résumé de la méthode d'essai

On prépare une série de spécimens contenant une gamme de pourcentages de teneur en chaux dans le sol. Des mesures de pH sont effectuées sur les suspensions des échantillons afin de déterminer la teneur minimale en chaux/ciment du mélange sol-chaux pour obtenir un pH d'au moins 12,4. Le pH d'au moins 12,4 obtenu dans cette méthode d'essai résulte de la présence de chaux libre dans le mélange sol-chaux. Normalement, le pH spécifique utilisé pour la stabilisation du sol devrait être déterminé et utilisé comme indicateur.

II.3.2.2. Préparation de l'échantillon

- En Prépare un échantillon représentatif de sol séché à l'air conformément à la norme ASTM D 421. Le sol peut être séché au four à une température de 60°C ;
- En Passe 350 g de matériau à travers le tamis de 425 μm pour la norme ASTM et 400 μm pour la norme française ;
- Bien mélanger le matériau en passant le tamis de 425 μm ;
- En procède à la détermination la teneur en eau, conformément à la méthode d'essai ASTM D 2216. Placez le reste du matériau dans un récipient hermétique afin de préserver la teneur en humidité ;

- À l'aide de l'échantillon séché, en procède à un échantillonnage (en cinq échantillons), chacun équivalant à 25,0 g de sol séché au four ;
- Détermination de la masse de chaque échantillon de sol séché à l'air, équivalente à 25,0 g de sol séché au four, comme suit :

$$Ma = 25 \times (1.0 + W/100) \quad (II. 1)$$

Où :

Ma : masse de spécimen de sol séché à l'air,

W : teneur en eau en %, de l'échantillon séché à l'air.

- Placez chaque échantillon dans des bouteilles en plastique sèches et fermez le capuchon ;
- Obtenez cinq spécimens représentatifs de la chaux. Quatre spécimens sont représentatifs de 2, 4, 6, et 8% de la masse équivalente de sol séché au four de 25 g. Le sixième échantillon de 2,0 g de chaux représente une solution de chaux saturée. Placez les 2,0 g de chaux dans une bouteille en plastique sèche et fermez le capuchon ;
- Ajouter l'un des quatre premiers échantillons de chaux à l'un des échantillons de sol dans des bouteilles en plastique, fermer hermétiquement, marquer le pourcentage sur la bouteille et bien mélanger en secouant. Répétez cette procédure pour les trois échantillons de chaux et de sol restants ;
- Ajoutez 100 ml d'eau à chacun des mélanges sol-chaux et à la bouteille contenant 2,0 g de chaux ;
- Boucher les bouteilles et agiter chacun des mélanges sol-chaux-eau et eau-chaux pendant au moins 30 secondes ou jusqu'à ce que les échantillons soient bien mélangés. Continuer à agiter les échantillons pendant 30 secondes toutes les 10 minutes pendant 1 heure ;
- Si nécessaire, chauffer ou refroidir l'éprouvette si nécessaire pour porter la température de l'éprouvette à $25 \pm 1^\circ\text{C}$;
- Dans les 15 minutes suivant la fin de la période d'agitation, déterminez le pH de chaque mélange sol-chaux-eau et le mélange chaux-eau de 0,01 unités de pH. Maintenir la température du mélange à $25 \pm 1^\circ\text{C}$ lors de la détermination du pH ;
- Noter la valeur du pH pour chaque mélange sol-chaux-eau et pour le mélange chaux-eau.

II.3.2.3 Proportion sol -chaux et relation de pH

Cette méthode d'essai est utilisée pour déterminer le pourcentage le plus faible de chaux ayant pour résultat un pH sol-chaux de 12,4, en l'appelle point de fixation de chaux (PFC). La chaux n'est pas un agent stabilisant efficace pour tous les sols. Certains composants du sol, tels que les sulfates, les phosphates, les composés organiques, etc., peuvent nuire aux réactions sol-chaux/ciment et peuvent produire des résultats erronés selon cette méthode.

Le pourcentage le plus bas de chaux dans le sol qui donne un pH de 12,4 est le pourcentage approximatif de chaux pour stabiliser le sol. Il peut y avoir des sols dans lesquels le pH est supérieur à 12,4. Si cela se produit, on sélectionne le pourcentage le plus faible de chaux pour lequel la valeur de pH est la plus élevée n'augmentant pas pour au moins deux échantillons de test successifs à des pourcentages croissants de chaux comme présenté dans la figure II.2.

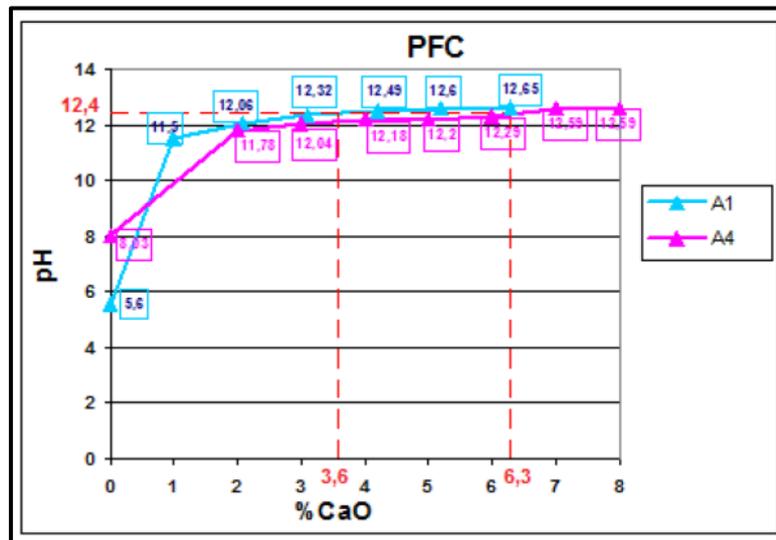


Figure II. 2: Détermination du PFC (Marrot, 2010)

Si le pH le plus élevé mesuré est de 12,3 ou moins, des échantillons supplémentaires contenant des pourcentages plus élevés de chaux doivent être préparés et testés. Si le pH le plus élevé mesuré est de 12,3 et qu'au moins deux échantillons successifs avec des pourcentages croissants de chaux donnent des valeurs de 12,3, le pourcentage le plus bas de chaux pour un pH de 12,3 est le pourcentage optimal approximatif de chaux pour la stabilisation du sol. Si le pH le plus élevé mesuré est inférieur à 12,3, l'essai est invalide en raison d'une erreur matérielle ou d'équipement ou en raison d'une quantité de chaux insuffisante. Vérifiez l'électrode de pH dans la solution tampon à pH 12 et la solution de chaux et d'eau pour rechercher une éventuelle erreur d'équipement ou répétez l'essai avec des pourcentages plus élevés de chaux, ou les deux.

II.3.2.4 Calcule

Convertir le pourcentage de chaux sous forme de chaux hydratée [Ca (OH) ₂] en pourcentage de chaux sous forme de chaux vive (CaO) comme suit :

$$LQ = LH \ 56/74$$

(II. 2)

Avec :

LQ : Pourcentage de chaux vive en %,

LH : Pourcentage de chaux hydratée en %,

56 : Poids moléculaire de CaO

74 : Poids moléculaire de Ca (OH) ₂.

Convertissez le pourcentage de chaux sous forme de chaux vive (CaO) en pourcentage de chaux sous forme de chaux hydratée [Ca (OH) ₂] comme suit :

$$LH = LQ \ 74/56$$

(II. 3)

II.3.2.5 Étalonnage et normalisation

Étalonnez le pH-mètre conformément aux instructions du fabricant en utilisant une solution tampon pH 12 à 25±1°C. La solution tampon d'hydroxyde de calcium peut également être utilisée comme étalon comme illustré dans la figure II.3.



Figure II. 3: Vue d'ensemble de pH-mètre

II.4. Détermination des performances mécaniques

II.4.1. Confection des éprouvettes

Les conditions de confection des éprouvettes respectent les préconisations citées dans la norme NF-P-98-234-2, appliquées pour les sols de couche de forme. Les éprouvettes de sol sont compactées dynamiquement par couches à l'énergie Proctor Normale selon la norme NF P94-093 pour les matériaux en couche de forme. Les caractéristiques de confection sont définies par une teneur en eau initiale supérieure à la teneur en eau de l'Optimum Proctor Normal (OPN).

L'éprouvette confectionnée a 50 ± 2 mm de diamètre et de 100 ± 2 mm de hauteur pour l'essai de compression simple au mode de cure normale, Un moule métallique cylindrique ayant une capacité de $(944 \pm 11 \text{ cm}^3)$ avec un diamètre interne de $(101,60 \pm 0,41 \text{ mm})$ pour l'essai de cycle séchage-humidification. La confection des éprouvettes est présentée au travers de la figure II.4.



Figure II. 4: Types d'éprouvettes confectionnés pour la mesure de résistance à la compression simple

II.4.2 Essai de compression simple

L'essai a pour but de connaître la contrainte ou la résistance à la compression d'une éprouvette soumise à une charge axiale croissante jusqu'à la rupture. L'essai de compression simple se fait selon la norme NF EN 13286-41. L'appareillage utilisé pour cet essai illustré dans la figure II.8 est une presse hydraulique qui répond aux critères de la norme NF EN 13286-41.



Figure II. 5: Vue d'ensemble de dispositif de mesure la résistance à la compression simple

Le protocole des étapes de cet essai est le suivant :

- L'éprouvette de sol naturel ou de sol traité, une fois rectifiée doit être placées et centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre.
- La mise en charge doit être effectuée à raison de (150 N/s).
- La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai soit atteinte dans un délai de 30 à 60 secondes après le début du chargement. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette

La résistance à la compression simple est calculée ensuite selon l'équation suivante :

$$R_c = \frac{F}{A_c} \quad (II. 10)$$

Où :

R_c (N/mm² ou MPa) : résistance à la compression simple,

F (N) : force maximale sur l'éprouvette,

A_c (mm²) : aire de la section transversale de l'éprouvette.

L'essai de compression simple est effectué sur trois éprouvettes au minimum. Donc la résistance à la compression simple est la moyenne arithmétique des valeurs obtenues.

II.5. Caractérisation des sols non traités

Dans le cadre du présent travail, un sol fin limono-argileux couramment rencontrés sur des chantiers de terrassement (selon la Norme Française NF P 11-300) seront utilisés. Le sol est limoneux de découverte du gisement de la région de la commune de Khelil Wilaya de Bordj Bou Arreridj (ci-après dénommer A1). Ce sol a transporté au laboratoire et stockés dans un grand bac plastique hermétique pour homogénéisation avant les essais de caractérisation. Les résultats des essais de caractérisation sont présentés dans ce chapitre.

II.5.1. Étude aux diffractogrammes des sols non traités

Les diffractogrammes de rayons X du sol non-traité a présentés sur la figures L'interprétation des résultats nous permet de caractériser les sols étudiés comme suite :

Le sol de Khelil (A1) est défini comme un mélange d'illite ouverte, de kaolinite et d'un chlorite contenant un peu de quartz et de feldspath.

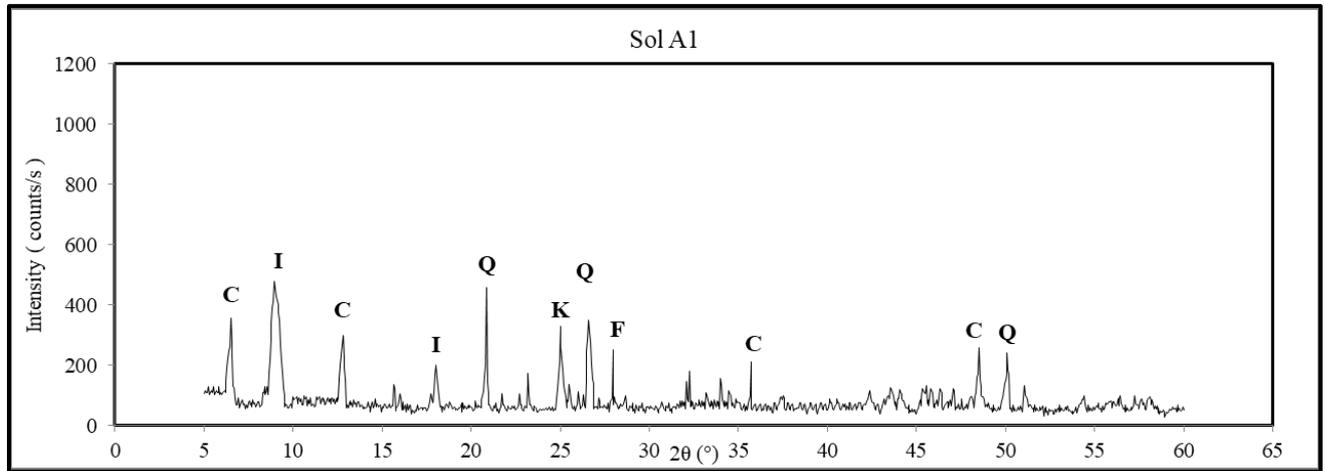


Figure II. 6: Diffractogramme de rayons X du sol A1

II.5.2. Détermination de la nature du sol

La courbe granulométrique de sol a présenté sur la figure III.5. Le tamisât à 80 µm du sol est supérieurs à 30%. Le diamètre maximal des grains de sol Dmax sont inférieurs à 50 mm. Selon la Norme NF P 11-300, le sol est classifié comme sols fins « type A ».

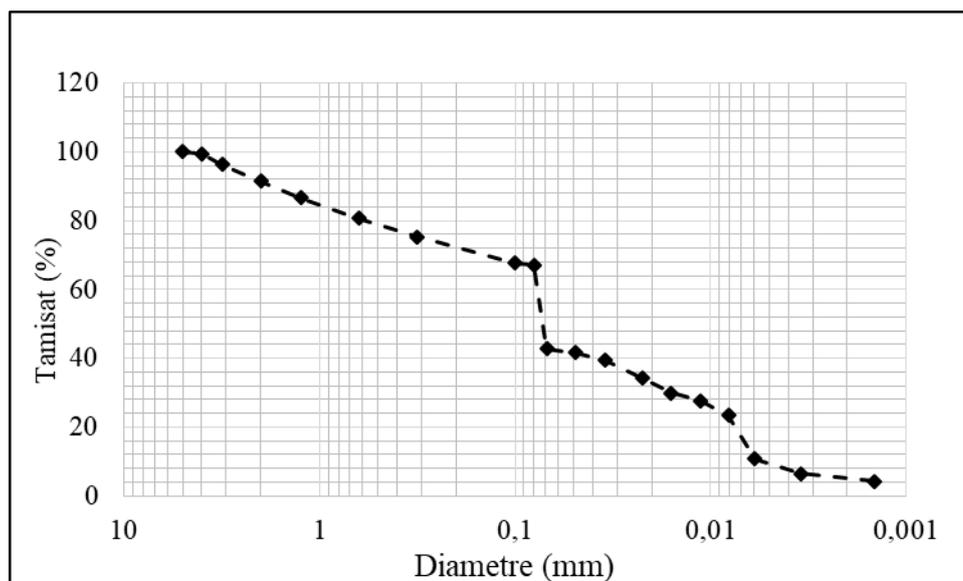


Figure II. 7: Analyse granulométrique des sols non traités

II. Techniques expérimentales.

Dans le tableau II.2, sont regroupés les résultats des essais des tamisats à 2 et 0.08mm (fraction argileuse), des valeurs de bleu de méthylène (VBS), des limites d'Atterberg, et des indices de plasticité des sols :

Tableau II. 2: Valeur de bleu de méthylène et des limites d'Atterberg des sols

Type de Sol	Tamisât à 2 mm (%)	Tamisât à 0.08 mm (%)	VBS (cm ³ /g)	Limites d'Atterberg		
				WL(%)	WP(%)	IP
A1	91,533	67,100	1,568	41,525	29,307	12,218

La classification de sol se base sur la Norme NF P 11-300. La valeur de bleu de méthylène du sol est 1.568(< 2,5) et la valeur de IP est 12.218 (> 12), ainsi classifié « limon peu plastique ».

II.5.3. Composition chimique des sols

Le tableau II.3 présent la composition chimique du sol non traité qui a déterminé par fluorescence X. Cette analyse a été faite au sien de laboratoire d'analyse chimique de cimenterie du Groupe GICA de Ain El-Tota (BATNA) selon la norme NF EN 1744-1/IN1 (P18-660-1/IN1).

Tableau II. 3: Composition chimique des sols

Constituent (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl
A1	31,43	4,19	1,22	32,5	1,89	0,36	0,40	0,04	0,01

III.6. Caractéristiques de ciment :

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment CEMI 42.5, c'est un ciment pour les travaux dans les milieux fortement agressifs. Fabriqué à la cimenterie d'AIN EL KBIRA.

III.6.1. Caractéristiques chimiques :

Tableau II. 4: Analyse chimique du ciment.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CL	P.A.F	Residue insoluble
Valeur(%)	21.57	4.37	5.27	64.31	1.62	0.38	/	0.01	0.98	1.29

Tableau II. 5: Composition minéralogique du clinker.

Composants	Valeur
C ₃ S	67.81
C ₂ S	9.74

C ₃ A	2.13
C ₄ AF	16.35

III.6.2. Caractéristiques physiques :*Tableau II. 6: Propriétés physiques du ciment.*

Propriété	Valeur
Consistance normale	23.49 %
Surface spécifique Blaine	3670 cm ² /g
Retrait à 28 jours	≤1000 μm / m
Expansion	≤ 10 mm
Masse volumique absolue	3.16
Temps de prise	≥ 60 Min

III.6.3. Caractéristiques mécaniques :*Tableau II. 7: Propriétés mécaniques du ciment.*

Propriétés		Valeur
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	4.08
	7 jours	6.68
	28 jours	8.41
Résistance à la compression (MPa)	2 jours	17.67
	7 jours	36.21
	28 jours	51.12

CHAPITRE III

Les résultats expérimentaux

Chapitre III : Les résultats expérimentaux.

III.1. Introduction

On procède dans ce qui suit à l'analyse et l'interprétation, après présentation des résultats que nous avons obtenus dans notre étude, ont discuté tous les propriétés étudiées : la résistance à la compression simple et la porosité. Les paramètres pris en compte sont : l'influence de compactage, l'âge et le taux de ciment ajoutés sur le comportement des sols.

III. 2. Programme d'essais de la résistance à la compression simple (Rc)

Le programme d'essais de compression a été développé pour évaluer, séparément, les influences de la quantité de ciment et de la porosité sur la résistance mécanique du mélange sol-ciment. Les points de moulage ont été choisis en considérant des densités sèches de 16.4 KN/m³, 17.2 KN/m³, 18 KN/m³ et 18.8 KN/m³, avec la même teneur en humidité. Les quantités de ciment étudiées dans les mélanges étaient de 2%, 3%, 5% et 7%.

III. 3. Evolution de la résistance à la compression simple (Rc)

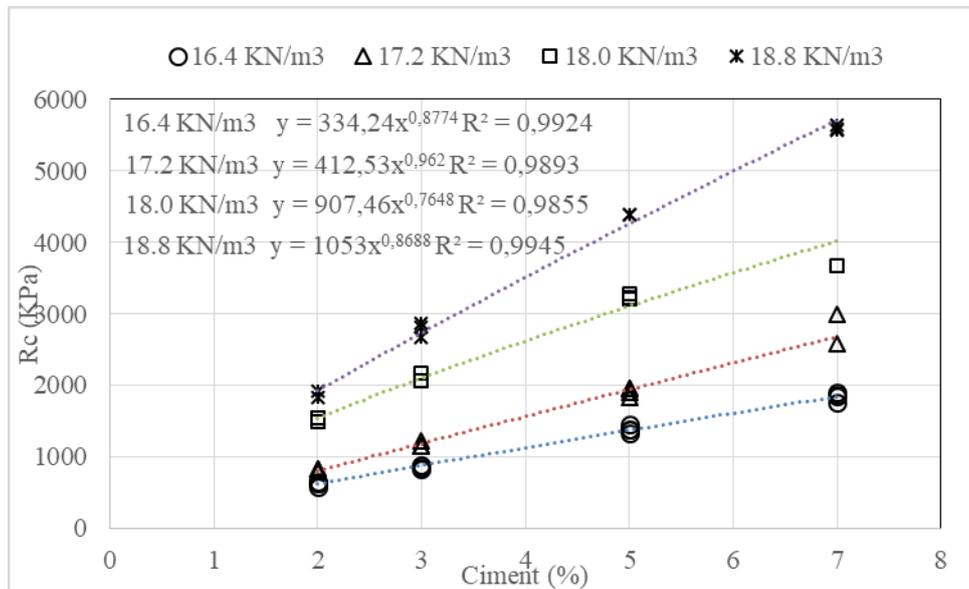


Figure III. 1: Evolution de la résistance à la compression simple du sol non traité et traité à différents dosages en ciment

Les résultats des essais de compression pour le sol traité par le ciment ont présenté dans la figure III.1. La figure présente des résultats en considérant des densités sèches de 16.4 KN/m³, 17.2 KN/m³, 18 KN/m³ et 18.8 KN/m³, avec la même teneur en humidité. Les quantités de ciment étudiées dans les mélanges étaient de 2%, 3%, 5% et 7%. L'ajout de ciment entraîne une

augmentation du (R_c) des sols traités par rapport aux sols non traités, mais dans des proportions différentes en fonction de dosage de ciment.

Plus la quantité de ciment est élevée, plus la résistance à la compression est grande pour une densité et une teneur en ciment données. On peut observer que la teneur en ciment a un effet raisonnable sur la résistance de sol traitée par le ciment. De plus, on peut voir que la résistance à la compression augmente de manière non linéaire (fonction de puissance) avec l'augmentation de la teneur en ciment, la non-linéarité étant plus clairement remarquée pour des quantités de ciment plus petites. En général, tous les mélanges sol-ciment présentent une augmentation du taux de gain de résistance avec une augmentation du poids unitaire sec.

III.4. Effet de ciment et Porosité sur la résistance à la compression

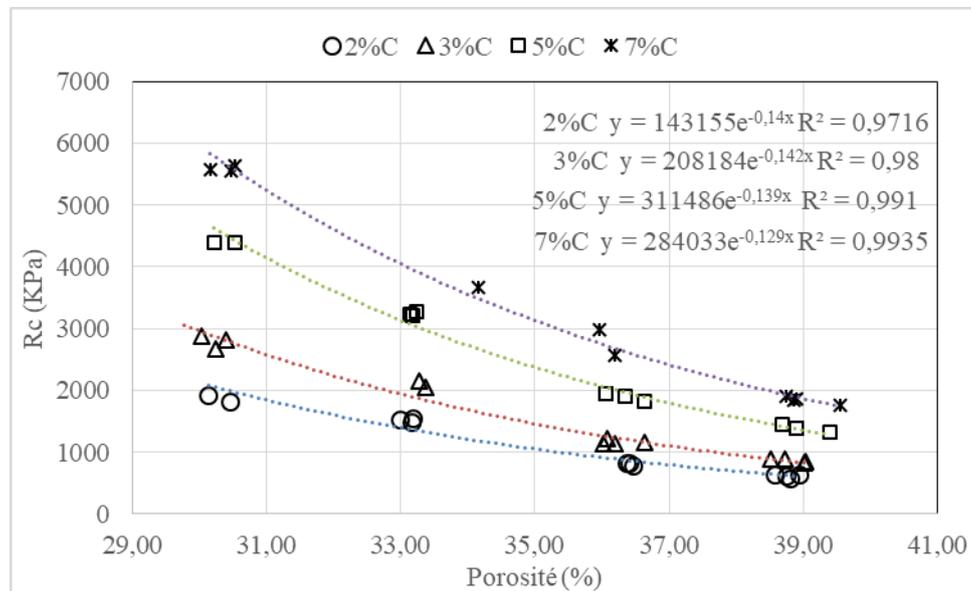


Figure III. 2: Variation de la résistance à la compression avec la porosité

Figure III.2 montre comment la porosité affecte la résistance à la compression. La résistance à la compression augmente de façon exponentielle avec la réduction de la porosité pour tous les mélanges compactés. Cet effet bénéfique d'une diminution de la porosité a été rapporté par plusieurs chercheurs (Ingles et Metcalf 1972; Consoli et al. 2006, 2007). Le mécanisme par lequel la réduction de la porosité influence la résistance sol-ciment est lié à l'existence d'un plus grand nombre de contacts inter-particules et, par conséquent, une plus grande possibilité pour les matériaux cimentaires de favoriser des liaisons efficaces à ces contacts, explique l'augmentation du taux de gain de résistance à la compression avec une réduction de la porosité. De plus, les mélanges sol-ciment présentent une nette augmentation du taux de résistance à la compression avec une porosité décroissante

III.5. Effet de ciment et poids volumique sur la résistance à la compression

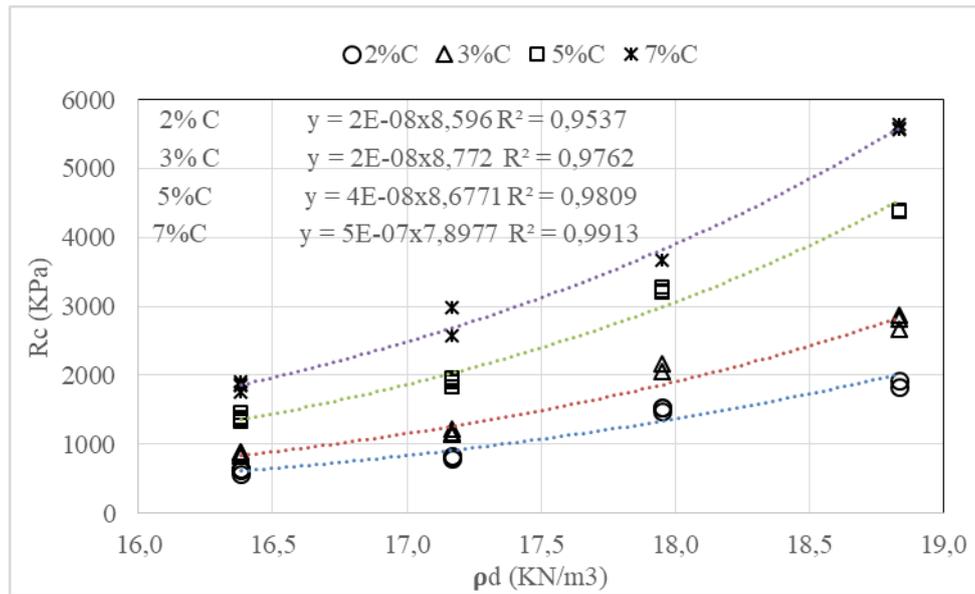


Figure III. 3: Variation de la résistance à la compression avec le poids volumique

Figure III.3 montre comment la densité affecte la résistance à la compression en considérant des densités sèches de 16.4 KN/m³, 17.2 KN/m³, 18 KN/m³ et 18.8 KN/m³, avec la même teneur en humidité. La résistance à la compression augmente de façon puissance (non linéaire) avec l'augmentation de la densité pour tous les mélanges compactés. Cet effet bénéfique d'une diminution de la porosité L'ajout de ciment entraîne une augmentation du (Rc) des sols traités par rapport aux sols non traités, mais dans des proportions différentes en fonction de dosage de ciment. En général, tous les mélanges sol-ciment présentent une augmentation du taux de gain de résistance avec une augmentation du poids unitaire sec.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a analysé l'effet du traitement sur le comportement et performance mécanique du sol.

La résistance à la compression des sols étudiés dépend du dosage de ciment utilisé pendant le traitement, teneur en ciment à un effet bénéfique sur le comportement mécanique des sols étudiés ce qui permet le développement de réactions pouzzolaniques entre le sol et le ciment. La formation de nouveaux hydrates (C-A-H et C-S-H) au cours de la période de conservation et en fonction du dosage de ciment, contribuant à améliorer le comportement mécanique. La réduction de la porosité du sol traitée compactée a grandement amélioré la résistance; il a été

III. Les résultats expérimentaux.

montré que la résistance à la compression augmentait approximativement avec la réduction de la porosité du sol traitée et compactée.

Conclusion Générale et Perspectives

Conclusion Générale et Perspectives

L'objet de ce travail est de fournir quelques réponses concernant l'influence du traitement par le ciment avec des doses variables sur les propriétés physiques et mécaniques, quelques conclusions ont été tirées.

Sur le plan physique; Les paramètres de compactage sont fortement influencés par le taux de ciment utilisé lors du traitement des sols étudiés. L'augmentation du pourcentage de ciment au cours du traitement des sols entraîne une augmentation de la densité sèche maximale.

Sur le plan mécanique; La résistance à la compression des sols étudiés dépend également du dosage de ciment, ce qui permet le développement de réactions pouzzolaniques entre le sol et le ciment. La formation de nouveaux hydrates (C-A-H et C-S-H) au cours de la période de conservation et en fonction du dosage de ciment, contribuant à améliorer le comportement mécanique.

La réduction de la porosité du sol traitée compactée a grandement amélioré la résistance; la résistance à la compression augmentait approximativement avec la réduction de la porosité du sol traitée et compactée.

Nous sommes invités à utiliser des méthodes et des corrélations nouvelles et très intéressantes pour le contrôle et la caractérisation des propriétés des sols traités, cette méthode devenant une alternative industrielle en raison de sa rapidité, de sa facilité et de l'économie qu'il peut offrir en termes de ressources temps et matériaux. Par conséquent, en utilisant cette relation pour prendre en compte les spécificités de chaque cas, y compris la disponibilité et le coût de transport de chaque matière. Le choix de la quantité de ciment et de l'effort de compactage approprié pour obtenir un mélange permet de répondre à la force requise par le projet avec les meilleures performances et à moindre coût.

Perspectives

Les perspectives de ce travail sont nombreuses, tant le sujet est riche en sujets de recherche et en applications pratiques. En laboratoire, en ce qui concerne l'étude paramétrique, il serait intéressant de poursuivre l'étude de comportement des sols traités avec les déchets tels que céramique et laitier surtout les sols sensibles à l'eau.

La prise du matériau et sa durabilité dans des milieux pollués (pour des parois étanches par exemple) pourront également faire l'objet d'une étude approfondie.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Ahnberg, H. and S.-E. Johanson (2005). Increase in strength with time in soils stabilised with different types of binder in relation to the type and amount of reaction products. Deep Mixing

Alrubaye, A. J., Hasan, M., Fattah, M. Y., (2016), "Improving Geotechnical Characteristics of Kaolin Soil Using Silica Fume and Lime", Special Topics & Reviews in Porous Media- An International Journal, Vol. 7 (1), pp. 77–85.

Alrubaye, A. J., Hasan, M., Fattah, M. Y., (2017), "Stabilization of Soft Kaolin Clay with Silica Fume and Lime", International Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 90-96, Taylor & Francis.

ASTM C837-09(2014), Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM D 4318 (2000) Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. West Conshohocken, PA, 2000.

ASTM D 698. (2012). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). Vol. 4.08. West Conshohocken, PA, 2012.

ASTM D2216-10, Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

ASTM D2487-11, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

ASTM D422-61(2007)e2, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

ASTM D6276-99a. Standard Test Method for using pH to estimate the soil - lime proportion requirement for soil stabilization, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999, www.astm.org.

Axelsson, K., S.-E. Johansson and R. Andersson (2002). Stabilization of Organic Soils by Cement and Pozzolanic Reactions - FEASIBILITY STUDY, Swedish Deep Stabilization Research Centre. 3.

Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils . Engineering Geology 42 , 223-237.

Boardman, D. I., Glendinning, S., et Rogers, C. D. (2001). Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes. Géotechnique, vol. 50, n°6, pp. , 533-543.

Bruce, D. A. (2001). "Practitioner's guide to the deep mixing method." Ground Improvement 5(3): 95-100.

Chen, F.H., (1988), "Foundation on Expansive Soils", Elsevier Scientific Publishing Company INC., New York, USA.

Choquette, M. (1988). La stabilisation à la chaux des sols argileux du Québec. Québec: Ph.D. thesis, Department of Geology, Université Laval. Le Runigo, 2008)

- Croft, J.B., Nettleton, A.F., (1962). Influence of clay mineralogy on the development of strength in stabilized clays from podzolic profiles with particular reference to the Sydney area. In proceedings of the 2nd Australian road research conference, pp. 1204-1225.
- Cui, Y.J, Tang, A.M, Qian, L.X (2011). Thermal-mechanical behavior of compacted GMZ bentonite. *Soil Foundation* .51(6), 1065–1073.
- Diamond, S. (1970). Pore size distributions in clays. *Clays Clay Miner.* 18, No. 1, 7-23.
- Eades, J. L., et Grim, R. E. (1960). Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. Highway Research Board, Bulletin 262, 51-63.
- Elkady T. (2016). The effect of curing conditions on the unconfined compression strength of lime-treated expansive soils, *Road Materials and Pavement Design*, 17:1, 52-69, DOI: 10.1080/14680629.2015.
- Estéoule, J., et Perret, P. (1979). Le traitement des sols fins par la chaux. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, No 69, 99-118. Experiences of a young soil mixing method. Deep Mixing '09, Okinawa.
- Juang et Diamond, S., Kinter, E. B. (1965). Mechanism of soil-lime stabilization. An interpretative review, Presentation at the 44th Annual Meeting, Highway Research Board. Washington.
- Haofeng, Xing. Yang, Xiaoming. Xu, Chao. Ye, Guanbao. (2009). Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil–cement. *Engineering Geology* 103(1):33-38 DOI: 10.1016/j.enggeo.2008.07.011
- Herzog, A., Michell, J. K. (1963). Reactions accompanying stabilization of clays with cement. Highway Research Record, No. 36, 146-171.
- Huang, X., Zhou, G.J. (1994). Hardening mechanism of cement stabilized soil. *Chin.J.Geotech.Eng.* 16(1), 62-68.
- Ingles, O.G., Metcalf, J.B., 1973. *Soil Stabilization Principles and Practice*. Butterworth, Sydney.
- Kawamura, M., Hasaba, S., Sugiura, S., 1971. Influence of exchangeable cations (Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) held on bentonite on the bentonite–cement interaction. *Proc.JpnSoc.Civ.Eng.* 192, 123–129.
- Kawasaki, T., A. Niina, S. Saitoh, Y. Suzuki and Y. Honjo (1981). Deep mixing method using cement hardening agent. 10th ICSMFE, Stockholm, 721-724.
- Le Roux, A. (1969). Traitements des sols argileux par la chaux. *Bull. Liaison Labo. Routiers P. et Ch.* no 40, Réf 653. (Thompson, 1968)
- Le Runigo, B. (2008). Durabilité d'un limon traité à la chaux et soumise à différentes sollicitations hydrauliques: comportement physico-chimique, microstructurale, hydraulique et mécanique.
- Little, D. N. (1987). Fundamentals of the stabilization of soil with lime. *Bulletin of National Lime Association*, 1987, 322, 17.

Locat, J., Bérubé, M. A., et Choquette, M. (1990). Laboratory investigations on the lime stabilisation of sensitive clays: shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 27, 294- 304.

Marrot, L. (2010). Contribution à l'étude de la résistance des sols traités à la chaux face au gel pour une application en couche de forme. Nivelles: Lhoist RetD, Nivelles, Belgique.

Mitchell J.K. Dermatas D. (1992) : Clay soil heave caused by lime sulfate reactions. pp 41-64 in Hoffiman D.D. Satanley D.D. Innovation and uses for lime STP 1135. ASTM. 141 p

Mouloud Benazzoug., Ramdane Bahar (2018): Effect of the Addition of Chemical Stabilizers on the Characteristics of Clays Chapter from book Ground Improvement and Earth Structures (pp.121-132).

Mouroux P., Margron P. et Pint J.C., (1988), "La construction économique sur sols gonflants", Manuels et méthodes n°14. B.R.G.M., Orléans.

Nakatsukasa, Y. (1986).The influence of cation exchange capacity (CEC) on strength of stabilized of seabed silts. Proceedings of the 41 Conference Japan Civil Engineering Committee, vol.13.pp.219-220.

Nelson J. D., Miller D. J., (1992), "Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineering", Edition John Wiley et Sons, INC.

NF P 94-051 (1993): Sols : reconnaissance et essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau.

NF P 94-057 (1992) : Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols – Méthode par sédimentation.

NF P 94-093 (1993). Détermination des caractéristiques de compactage du sol. Paris: AFNOR.

NF P 94-093 (1999) : Sols : reconnaissance et essais – Détermination des références de compactage d'un matériau – Essai Proctor Normal – Essai Proctor modifié (1999).

NF P11-300 (1992). Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. AFNOR.

NF P94-056 (1996). Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage. AFNOR.

NF P94-068 (1998). Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche. AFNOR.

Paige-Green, P., 2008. The durability of stabilized materials. Proceedings of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geo-mechanics. Curran Associates, Inc., Goa, India, pp. 3787–3792.

Perret P. (1977) : Contribution à l'étude de la stabilisation des sols fins par la chaux : étude globale du phénomène et applications. Thèse de doctorat INSA Rennes.

Porbaha, A., S. Shibuya and T. Kishida (2000). "State of the art in deep mixing technology, Part III: Geomaterial characterization of deep mixing." *Ground Improvement* 4(3): 91-110.

Rao, S. M., Shivananda, P. (2001). Swelling behaviour of lime-stabilized specimens after wetting and drying cycles. *Workshop in clay behaviour: chemico-mechanical coupling from nanostructures to engineering applications*, vol.2, Italy.

Saitoh, S. Suzuki, Y. (1986). Hardening of soil improved by deep mixing method. *Proceedings of the 11th International Conference SMFE*, pp. 1745-1748.