

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 : GENIE CIVIL*

# *Mémoire*

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

**FILIERE : GENIE CIVIL**

**Spécialité : MATERIAUX EN GENIE CIVIL**

Par

**ROUABAH Abdelbaki**

**ABBAS Youcef**

*Intitulé*

**Comportement des sols traité par la chaux à long terme soumis au cycle séchage-  
humidification**

*Soutenu le : 20/06/2024*

*Devant le Jury composé de :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Pr. ACHOUR YACINE</i>	<i>Prof</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr. MAAFI NABIL</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr. BENOUDAH ABDELATIF</i>	<i>MCB</i>	<i>Co-encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr. BENAMMAR ABDELHAFID</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr. BELKADI AHMED ABDERRAOUF</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

*Année Universitaire 2023/2024*

## **Remerciements**

Nous exprimons toute notre gratitude et sincères dévouement à Dieu Le Tout puissant qui grâce à son aide nous avant terminé ce modeste travail.

Nous tenons à remercier chaleureusement notre promoteur Dr MAAFI NABIL son aide et son encadrement, ses encouragements et surtout sa compréhension durant toute la période de préparation de ce mémoire.

Nous remercions également l'honorable jury qui a bien voulu examiner notre travail.

Je tiens à remercier particulièrement tous les membres du département de Génie civil leur soutien et leurs aides.

Nous tenons à exprimer nos reconnaissances et nos gratitudes à toutes celles et tous ceux que nous ont aidés la préparation de ce travail.

**Dédicace :**

A mes parents pour l'éducation qu'ils m'ont prodigué avec tous les moyens et au prix de tous les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'ils m'ont enseigné depuis mon enfance.

A mes chères frères et sœurs.

A tous mes amis et collègues que j'ai pu connaître depuis mon enfance.

A tous les professeurs qui m'ont enseigné tout au long de mon parcours.

A tous ceux qui m'aiment, A tous ceux que j'aime  
Je vous dédie ce modeste travail.

**LISTE DES NOTATIONS**

**CEC** : Capacité d'échange cationique.

**DRX** : Diffraction du rayon X.

**$\rho_d$  opt** : Teneur en eau à l'optimum de Proctor (%).

**PFC** : Point de fixation de la chaux.

**UCS** : Résistance à la compression simple (MPa).

**Rfb** : Résistance à la traction par fendage (MPa).

**R<sup>2</sup>** : Carré du coefficient de détermination sous Excel.

**Résumé**

Ce travail traite des résultats d'une étude expérimentale sur le comportement des sols couramment rencontrés sur les chantiers de terrassement tels que les remblais et les couches de forme. Ces sols ont été traités par la chaux (sa teneur varie entre 0 et 8%) en utilisant deux modes de conservation, le premier dans une chambre humide et le deuxième les sols exposés aux cycles séchage - humidification. Cette recherche a mené sur une étude de la durabilité vis-à-vis du cycle séchage-humidification a été faite sur les sols traités. On a utilisé deux différents types du sol tel que sols fins dont on a trois classes A1, A2, A3 et sol sableux-graveleux avec des fines B5. Les résultats ont indiqué que la résistance à la compression augmente proportionnellement avec l'augmentation de la teneur en chaux. Cette étude évalue les paramètres de contrôle de la résistance d'un sol traité par la chaux et montre que le rapport vides-chaux ( $\eta=L_v$ ) (correspondant à la porosité divisée par la teneur volumétrique en chaux) joue un rôle fondamental dans l'évaluation de la résistance. Les paramètres de contrôle évalués étaient la quantité de chaux, la porosité et le rapport vides-chaux. Un certain nombre d'essais de compression non confinés (UCS) ont été effectués dans le cadre du présent travail. Les résultats montrent que la résistance à la compression non confinée (UCS) augmente de manière linéaire avec la quantité de chaux. Une fonction puissance s'adapte mieux à la relation UCS-porosité ( $\eta$ ) pour les mélanges sol-chaux. Le rapport  $\eta=L_v$ , dans lequel  $L_v$  est ajusté par un exposant (ici 0.43, 0.49, 0.36 et 0.12) pour les sols A1, A2, A3 et B5 respectivement, s'avère être un bon paramètre dans l'évaluation de l'UCS du sol étudié (UCS varie de manière non linéaire avec  $\eta=L_v$  dans le cas de l'addition de chaux). Enfin, il a été constaté qu'une corrélation unique contrôle la résistance des mélanges sol- chaux compactés étudiés ; par conséquent, en utilisant cette relation, un ingénieur (en tenant compte des spécificités de chaque cas telles que le prix, la disponibilité et le coût de transport de chaque matériau, entre autres) peut choisir la quantité de chaux et l'effort de compactage approprié à fournir un mélange qui répond à la résistance requise par un projet au coût optimal.

**Mot clé** : sol, chaux, traitement, cycle, séchage-humidification, porosité.

**Abstract**

This work deals with the results of an experimental study on the behaviour of the soils commonly found on earthworks such as embankments and top layers; These soils were treated with lime (its content varies between 0 and 8%) using two modes of conservation first in a humid chamber and the second the soils exposed to cycles wetting-drying. This research has led to the effect of the lime content on the volume variation of different made blends. In addition, a study of durability against the wetting-drying cycle was carried out on the treated soils. Two different soil types were used, such as fine soils of which there are three classes A1, A2, A3 and sandy-gravelly soil with B5 fines. The results indicated that the compressive strength increases proportionally with the increase in lime content. This study evaluates the parameters controlling the resistance of a soil treated with lime and shows that the void-lime ratio ( $\eta=L_v$ ) (corresponding to the porosity divided by the volumetric lime content) plays a fundamental role in the resistance assessment. The control parameters evaluated were lime quantity, porosity and voids-to-lime ratio. A number of unconfined compression tests (UCS) were carried out as part of the present work. The results show that the unconfined compressive strength (UCS) increases linearly with the amount of lime. A power function better fits the UCS-porosity ( $\eta$ ) relationship for soil-lime mixtures. The ratio  $\eta=L_v$ , in which  $L_v$  is adjusted by an exponent (here 0.43, 0.49, 0.36 and 0.12) for soils A1, A2, A3 and B5 respectively, turns out to be a good parameter in the evaluation of the UCS of the soil studied (UCS varies non-linearly with  $\eta=L_v$ ). Finally, it was found that a unique correlation controls the strength of the compacted soil-lime mixtures studied; consequently, using this relationship an engineer (considering the specifics of each case such as price, availability, and cost of transportation of each material, among others) can choose the amount of lime, and the compaction effort appropriate to provide a mixture that meets the strength required by a project at the optimum cost.

**Key word:** soil, lime, treatment, wetting-drying, cycle, porosity.

## ملخص

يتناول هذا العمل نتائج دراسة تجريبية حول سلوك التربة التي تصادف عادة في الأعمال الخاصة بتهيئة أرضية الطرقات مثل الردم وطبقة ما تحت الأساس، تمت معالجة هذه التربة بالجير (بنسب تتراوح بين 0 و 8٪) باستخدام طريقتين للتخزين، الأولى في غرفة رطبة والثانية في التربة المعرضة لدورات التجفيف والترطيب. وقد تمت دراسة تأثير نسبة الجير على تغير أحجام الخلطات المختلفة. بالإضافة إلى ذلك، أجريت دراسة لديمومة التربة المعالجة بالجير المعرضة لدورات الترطيب والتجفيف على التربة. في هذه الدراسة تم استخدام نوعين من التربة أولهما التربة الدقيقة واستعملت بثلاث فئات A1 و A2 و A3 والنوع الثاني التربة الرملية الحصوية B5. أشارت النتائج إلى أن قوة الضغط تزداد بالتناسب مع زيادة محتوى الجير. تقوم هذه الدراسة بتقييم المعلمات التي تتحكم في مقاومة التربة المعالجة بالجير وتبين أن نسبة الجير الفراغي ( $\eta=L_v$ ) (المقابلة للمسامية مقسومة على محتوى الجير الحجمي) تلعب دوراً أساسياً في تقييم المقاومة. معاملات التحكم التي تم تقييمها هي كمية الجير، المسامية ونسبة الفراغات إلى الجير. تم إجراء عدد من اختبارات الضغط (UCS) كجزء من العمل الحالي. أظهرت النتائج أن مقاومة الضغط (UCS) تزداد خطياً مع كمية الجير. تبين أن النسبة  $\eta=L_v$ ، التي يتم فيها ضبط  $L_v$  بواسطة الأس (هنا 0.43 و 0.49 و 0.36 و 0.12) للتربة A1 و A2 و A3 و B5 على التوالي، هي معلمة جيدة في تقييم (UCS) للتربة المدروسة (UCS) يختلف بشكل غير خطي مع  $\eta=L_v$  في حالة إضافة الجير). وأخيراً وجد أن هناك علاقة فريدة تتحكم في مقاومة مخاليط التربة الجيرية المضغوطة المدروسة؛ لذلك، باستخدام هذه العلاقة، يمكن للمهندس توفير خليط يلبي القوة التي يتطلبها المشروع بالتكلفة المثلى (مع الأخذ في الاعتبار خصوصيات كل حالة مثل السعر والتوفر وتكلفة النقل لكل مادة، اختيار كمية الجير، وجهد الضغط المناسب).

**الكلمة المفتاحية:** التربة، الجير، المعالجة، دورة، التجفيف الترطيب، المسامية.

Table des matières

Résumé .....	I
Abstract .....	II
ملخص.....	III
LISTE DES FIGURES .....	III
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	
I.1. Introduction.....	5
I.1.1. L'effet de la chaux dans le sol .....	6
I.1.1.1. Séchage, hydratation et l'ionisation de la chaux.....	6
I.1.1.2. Diminution de l'indice de plasticité .....	7
I.1.1.3. Amélioration des références de compactage.....	8
I.1.1.3. Augmentation de pH.....	9
I.1.1.4. Flocculation et capacité d'échange cationique <i>CEC</i> .....	10
I.1.1.5. Réaction pouzzolanique .....	12
I.1.2. Stabilisation à long terme.....	14
I.2. Cycle séchage-humidification.....	15
I.2.1. Analyse minéralogique et microstructurale .....	17
I.2.2. Résistance à la compression.....	20
<b>TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES</b>	
II.1. Introduction .....	23
II.2. Préparation des sols .....	23
II.2.1. La confection de l'échantillon de sol traité.....	23
II.3. Essais de caractérisations.....	25
II.3.1. Détermination des dosages en chaux .....	25
II.3.1. Résumé de la méthode d'essai .....	26
II.3.2. Proportion sol-chaux et relation de pH.....	26
II.4. Détermination des performances mécaniques .....	27
II.4.1. Confection des éprouvettes.....	27
II.4.2 Essai de compression simple .....	28
II.4.3 Essai de compression diamétrale .....	29



II.5. Essai de cycles de séchage-humidification.....	30
II.5.1. Appareil .....	30
II.5.2. Méthode d'essai : Utilisation de matériel de sol en passant le tamis de 4,75 mm (5mm) .....	31
<b>CARACTERISATION DES MATERIAUX</b>	
III.1. Introduction .....	33
III.2.1. Étude aux diffractogrammes des sols non traités .....	33
III.2.2. Détermination de la nature du sol .....	35
III.2.3. Composition chimique des sols.....	36
III.3. Chaux vive.....	36
III.4. Point de fixation de la chaux « PFC ».....	37
III.5. Références de compactage .....	38
III.5.1. Sol A1.....	38
III.5.2. Sol A2.....	39
III.5.3. Sol A3.....	40
III.4.4. Sol B5 .....	41
<b>LES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX</b>	
IV.1. Introduction .....	42
IV.2. Évolution de la résistance à la compression simple (UCS).....	42
IV.3. Évolution de la résistance à la traction Brésilienne ( $R_{tb}$ ).....	43
IV.4. Cycle séchage-humidification.....	44
IV.5. Évolution de la résistance à la compression simple des sols soumis au cycle séchage- humidification .....	48
IV.6. Effet du rapport vides-chaux.....	52
IV.7. Effet du traitement sur la microstructure .....	54
<b>Conclusion Générale et Perspectives</b>	
Conclusion Générale et Perspectives .....	56
<b>Référence bibliographique</b> .....	60

## LISTE DES FIGURES

Figure I. 1: Exemple de la structure routière.....	5
Figure I. 2: Effet du dosage en chaux sur les limites d'Atterberg de l'argile de Londres (illite, kaolinite, smectite) (Rogers et al. 1996).....	7
Figure I. 3: Évolution de WL et WP d'un sol après l'ajout de chaux (GTS 2000).....	8
Figure I. 4: Influence du traitement à la chaux sur les courbes Proctor (GTS, 2000).....	8
Figure I. 5: Influence du traitement à la chaux sur les courbes Proctor (GTS 2000).....	9
Figure I. 6: Variation du pH d'une solution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans l'eau en fonction de la quantité de chaux ajoutées (Marrot, 2010).....	10
Figure I. 7: Structure microscopique d'une argile non traitée et traitée à la chaux (Little 1987).....	10
Figure I. 8: Résistances à la compression simple d'une montmorillonite (à gauche) et d'une kaolinite (à droite) traitées à différents dosages en chaux .....	12
Figure I. 9: Solubilité des aluminates et des silicates en fonction du pH (Little 1987) .....	12
Figure I. 10: Réaction pouzzolaniques (Marrot 2010) .....	13
Figure I. 11: Schémas du mécanisme de stabilisation des sols traités à la chaux (Locat et al. 1990).....	14
Figure I. 12 Morphologie du sol traité à 4% CaO, après 90 jours .....	15
Figure I. 13: Diagrammes de diffraction des rayons X (DRX) des échantillons de sol (A) après 28 jours de durcissement et (B) à la fin des cycles de séchage-humidification (G: Gypse; E: Ettringite; Q: Quartz; K: Kaolinite; I: Illite C: Calcite; F: Feldspath). A. Aldaood, 2014) .....	18
Figure I. 14: Image MEB. (A) après 28 jours de durcissement et (B) à la fin des cycles séchage-humidification. (A. Aldaood, 2014) .....	20
Figure I. 15: Résistance à la compression. A) cure normale. B) cycles séchage-humidification. (A. Aldaood, 2014).....	21
Figure II. 1: Préparation du sol traité .....	24
Figure II. 2: Détermination du PFC (Marrot, 2010).....	26
Figure II. 3: Types d'éprouvettes confectionnés pour la mesure de résistance à la compression simple .....	27
Figure II. 4: Vue d'ensemble du dispositif de mesure de la résistance à la compression simple .....	28
Figure II. 5: Vue d'ensemble de dispositifs de mesure la résistance à la compression diamétrale .....	28
Figure II. 6: Vue d'ensemble de moule pour l'essai de cycle séchage-humidification.....	29
Figure II. 7 : Calcule le volume de l'éprouvette dans l'essai de cycle séchage-humidification	32
Figure III. 1: Diffractogramme de rayons X du sol A1 .....	34
Figure III. 2: Diffractogramme de rayons X du sol A2.....	34
Figure III. 3: Diffractogramme de rayons X du sol A3.....	34
Figure III. 4: Diffractogramme de rayons X du sol B5 .....	34

---

Figure III. 5: Analyse granulométrique des sols non traités.....	35
Figure III. 6: Détermination du point de fixation de la chaux.....	37
Figure IV. 1: Évolution de la résistance à la compression simple du sol A1, A2, A3 et B5 non traité et traité à différents dosages en chaux .....	43
Figure IV. 2: Évolution de la résistance à la traction Brésilienne du sol A1, A2, A3 et B5 non traité et traité à différents dosages en chaux .....	44
Figure IV.3: Évolution de la perte de masse du sol A1 soumis au cycle séchage-humidification .....	45
Figure IV. 4: Évolution de la perte de masse du sol A2 soumis au cycle séchage-humidification .....	46
Figure IV. 5: Évolution de la perte de masse du sol A3 soumis au cycle séchage-humidification .....	47
Figure IV. 6: Évolution de la perte de masse du sol B5 soumis au cycle séchage-humidification .....	47
Figure IV. 7: Évolution de la résistance à la compression simple du sol A1 soumis au cycle séchage-humidification .....	49
Figure IV. 8: Évolution de la résistance à la compression simple du sol A2 soumis au cycle séchage-humidification .....	50
Figure IV. 9: Évolution de la résistance à la compression simple du sol A3 soumis au cycle séchage-humidification .....	50
Figure IV. 10: Évolution de la résistance à la compression simple du sol A3 soumis au cycle séchage-humidification .....	51
Figure IV. 11: Variation de la résistance à la compression non confinée en fonction de la porosité/teneur volumétrique de chaux .....	52
Figure IV. 12: Variation de la résistance à la compression unitaire avec porosité/teneur volumétrique ajustée de chaux .....	53
Figure IV. 13: DRX des sols traités soumis au cycle séchage-humidification après 180 jours	55

**Liste des tableaux**

Tableau II. 1: Les essais de caractérisations géotechniques du sol .....	25
Tableau III. 1: Valeur de bleu de méthylène et des limites d'Atterberg des sols.....	35
Tableau III. 2: Composition chimique des sols.....	36
Tableau III. 3: Propriétés chimiques de la chaux .....	36
Tableau III. 4: Propriétés physiques de la chaux.....	36
Tableau III. 5: Références de compactage du sol A1 non traité et traité .....	38
Tableau III. 6: Références de compactage du sol A2 non traité et traité .....	39
Tableau III. 7: Références de compactage du sol A3 non traité et traité .....	40
Tableau III. 8: Références de compactage du sol B5 non traité et traité.....	41

---

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

---

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

La technique de traitement des sols à la chaux est connue dans le domaine des travaux de terrassement, construction de remblais et des routes (autoroutes, voies ferrées, routes, aéroports, etc.). Le traitement à la chaux est une méthode économique (mise en œuvre rapide, moins de moyens nécessaires), écologique (peu de matériau mis en décharge, car peu de déblai) et durable. Il est actuellement considéré comme une méthode importante de réutilisation et d'évaluation des sols inutilisables pour améliorer ses propriétés physiques et mécaniques par l'augmentation de la résistance, de la rigidité, homogénéité, vieillissement ou bien durabilité et diminution de l'imperméabilité.

L'ajout de chaux 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 chaux 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 décomposition chimique et de l'hydratation des silicates et des aluminates (C-S-H et C-S-A-H). Il en résulte la formation de matériaux à base de ciment, qui lient les particules du sol et améliorent les propriétés mécaniques du sol traité à la chaux. Donc la quantité de la chaux dans un sol pour toutes les applications géotechniques est nécessaire pour déterminer les propriétés, en particulier le changement de volume, la résistance et capacité d'échange cationique.

La durabilité peut être définie comme la capacité des matériaux à conserver leur stabilité et leur intégrité et à maintenir une résistance résiduelle suffisante à long terme aux conditions climatiques. Les propriétés mécaniques et minéralogiques du sol, sa durabilité dans des conditions climatiques extrêmes est un paramètre essentiel pour évaluer in situ l'utilisation du sol en tant que matériau de construction. Les conditions climatiques, à savoir les cycles de séchage-humidification, sont considérées comme l'une des actions les plus destructrices pouvant causer des dommages aux infrastructures telles que les autoroutes et les chaussées. Au cours de ces cycles, la plupart des propriétés techniques des sols, notamment leur résistance, sont gravement affectées et il en résulte une propagation des fissures et une défaillance de l'infrastructure.

Le manque de connaissances sur la durabilité des sols stabilisée due à la réaction entre la chaux et le sol, et sur le comportement à long terme des sols traités à la chaux, et soumis à des cycles de séchage-humidification, explique l'absence d'utilisation de cette technique. Des recherches approfondies visant à acquérir davantage de connaissances devraient permettre d'élargir la portée du traitement à la chaux dans les travaux de terrassement pour les couches de forme dans les zones humides et les plaines inondables.

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 chaux pour obtenir un mélange répondant à l'objectif recherché au meilleur moment et au meilleur coût.

Deux approches, expérimentale et modulatrice, ont été utilisées pour analyser l'influence de la chaux sur un sol après une conservation à long terme et des cycles de séchage-humidification. L'approche expérimentale vise à documenter l'effet de la chaux sur un sol en termes de la résistance à la compression, l'un des paramètres les plus importants pour la détermination du comportement sol-liant, et à déterminer les dosages appropriés.

La méthode de conception expérimentale est une approche mathématique permettant de déterminer que les liens entre les paramètres peuvent influencer sur le phénomène étudié (nommé le facteur) et les grandeurs physiques ou mécaniques étudiées (appelée la réponse). Cette méthode vise également à élucider les relations entre la réponse et les facteurs, ainsi que les facteurs entre eux. Les facteurs représentent toutes les variables contrôlables pouvant affecter la réponse observée. Les résultats sont les magnitudes observées par chaque expérience réalisée. La modélisation statistique confirme l'hypothèse proposée concernant l'influence de la composition chimique et de la chaux sur le comportement d'un sol compacté traité à la chaux sous conservation à long terme et soumis à des cycles de séchage humidification ; les modèles mathématiques pour l'été sont dessinés en utilisant la méthode expérimentale proposée.

Ainsi, les principaux objectifs de la présente recherche étaient les suivants :

- Analyser les performances des sols contenant une large gamme de la chaux, sous l'effet des temps de cure et des cycles de séchage-humidification.

- évaluer le comportement de durabilité des sols stabilisés à la chaux contre les cycles séchage-humidification.

Ce travail est structuré en trois grands chapitres ; la première partie est consacrée à l'étude bibliographique, la deuxième partie porte sur la partie expérimentale et la dernière sur l'analyse des résultats obtenus.

#### Chapitre I : étude bibliographique

Ce chapitre est une revue de la littérature des travaux de recherches sur le comportement des sols traités à la chaux, il sera divisé en deux parties.

Le premier est consacré à une étude bibliographique sur l'application du traitement des sols à la chaux, leur processus physico-chimique, les modifications induites par la chaux à court terme et à long terme (concentrera sur l'effet de la stabilisation sur la microstructure, et les propriétés mécaniques).

Dans la deuxième partie, nous présentons des travaux expérimentaux et théoriques réalisés relatifs aux phénomènes de cycle séchage-humidification des sols sera faite.

Chapitre II (matériaux matériels et essais) et III (caractérisation des matériaux étudiés) : le second chapitre présente les différents matériaux, matériels et méthodes d'essais utilisés, tels que les essais de détermination des performances mécaniques (résistance en compression simple (UCS), résistance en compression diamétrale (R<sub>tb</sub>)). L'essai de cycle séchage-humidification effectué selon la norme ASTM D-559 a aussi été présenté. Selon la classification des sols (NF P11-300), quatre types de sols ont été sélectionnés pour cette étude, A1, A2 et A3 sont des sols fins, alors que le B5 se classe dans la catégorie des sols grenus. La chaux vive ERCO compagnie de SAÏDA, ALEGIRIAS a été choisie pour le traitement, sa composition et ses propriétés seront également abordées. Les dosages en chaux sont choisis en se basant sur 3 objectifs :

- L'objectif d'amélioration.
- L'objectif de stabilisation sans tenir compte de la résistance au séchage/humidification.
- L'objectif de stabilisation et de résistance au séchage/humidification.

Chapitre IV : 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 : nature minéralogique, composition chimique, dosage de la chaux sur le comportement des sols traités à la chaux à long terme et soumis à des cycles de séchage-humidification.

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

---

# **BIBLIOGRAPHIE**

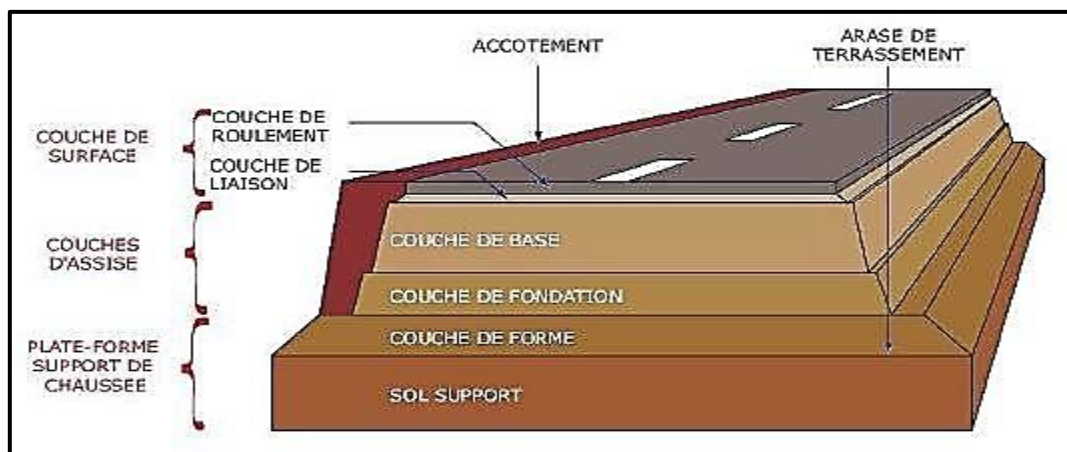
---

## I.1. Introduction

La construction de la grande muraille de Chine, le dôme de Panthéon et les chaussées romaines sont les premières traces de l'utilisation de la technique de stabilisation des sols par l'ajout de liant hydraulique datent d'environ 250 avant J.-C. Mais, c'est seulement à partir de la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle que les pays scandinaves et le Japon ont débuté des recherches sur le traitement des sols (**Holm 2000**). La technique de traitement des sols à la chaux est généralement pratiquée dans le domaine des terrassements des travaux routiers depuis les années 1960. C'est surtout depuis la Seconde Guerre mondiale que l'utilisation de cette technique est devenue prévalente en raison des aspects positifs qu'elle profère, nous mentionnons les intérêts de la valorisation des matériaux locaux en place ainsi que des sous-produits de l'industrie (qui sont intégrés dans la composition des liants) en améliorant leur comportement mécanique et leur maniabilité afin de les rendre aptes au terrassement (**Ahnberg et al. 2003 ; Ahnberg et al. 2005 ; Bujulu et al. 2009 ; Jegandan et al. 2010**).

Pour les mêmes raisons, c'est une méthode qui respecte l'environnement en limitant le transport, l'excavation, les mises en décharge des sols, la préservation des ressources naturelles non renouvelables et des gisements de granulats (carrières, ballastières) qui sont utilisés dans la construction des remblais par des techniques traditionnelles. En effet, sa mise en œuvre ne requiert pas de mise en décharge (**Robert et al. 1994**), et donc moins de transport.

De manière générale, le sol traité consiste à mélanger mécaniquement le sol en place avec un liant hydraulique (**Porbaha et al. 2000 ; Terashi 2003 ; Larsson 2005 ; Gerressen et al. 2009**).



*Figure I. 1: Exemple de la structure routière*

La technique s'est étendue à la réalisation des couches de forme, surtout les couches de forme autoroutières. La couche de forme est une zone de transition permettant d'adapter les caractéristiques des matériaux de remblai ou du sol en place aux fonctions essentielles d'une plate-forme support de chaussée ou de voie, figure I.1.

À la profondeur entre 30 et 80 cm, la couche de forme risque d'être touchée par l'eau ; c'est la raison pour laquelle elle est astreinte à une exigence supplémentaire qui est l'absence de gonflement et de déstructuration sous l'effet de l'eau. Si le sol répond à plusieurs conditions, telles que la granularité compatible avec les exigences de nivellement de la plateforme (homogénéisation), l'insensibilité aux effets des intempéries (eau, gel, etc.), la résistance vis-à-vis de la circulation au chantier (la capacité portante à résister aux charges transmises par les roues des véhicules) et le drainage, dans ce cas les sols sont aptes à constituer une couche de forme.

Dès la fin des années 80, un document méthodologique codifiant la technique du traitement des sols a été réalisé devant la place grandissante occupée par les couches de forme en sols traités dans les grands projets surtout dans la structure des chaussées.

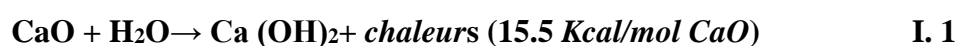
Un pas important a été franchi en 1992, avec la parution du Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme (**GTR 1992**) qui, d'une part, propose une démarche empirique pour la prise en compte des couches de forme en sols traités dans le dimensionnement des structures de chaussée et d'autre part précise les classes de matériaux devant subir un traitement pour être utilisés dans des couches de forme. Les connaissances actuelles régissant l'application de la technique du traitement des sols, pour la conception et la construction des remblais routiers et des couches de forme synthétisées par le Guide de Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (**GTS 2000**), publié par le Service d'Études techniques des Routes et Autoroutes (**SETRA**) et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) en janvier 2000 (**Thi Thanh Hang Nguyen 2015**). Toutefois, il existe encore des lacunes dans ces connaissances, notamment relatives aux aspects du comportement des sols traités et exposés au cycle séchage-humidification.

### **I.1.1. L'effet de la chaux dans le sol**

Plusieurs processus physico-chimiques immédiats et à long terme essentiels se produisent lors de l'incorporation de la chaux dans un sol humide :

#### **I.1.1.1. Séchage, hydratation et l'ionisation de la chaux**

Lors du mélange de la chaux vive (CaO) au sol, l'hydratation se traduit par la réaction suivante, cette réaction est exothermique :

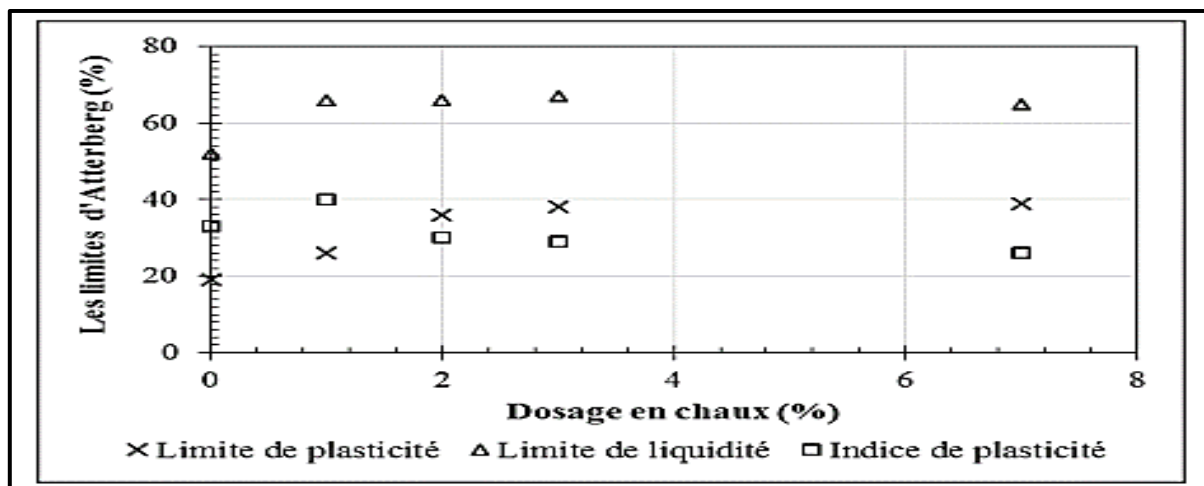


La chaleur produite par la réaction exothermique a pour conséquence la réduction de la teneur en eau, une partie de cette chaleur provoque l'évaporation de l'eau du sol et le reste augmente la température du mélange. Dans des conditions de laboratoire, un ajout d'un pourcent massique de chaux diminue

la teneur en eau du sol d'environ un pourcent. En plus, l'incorporation de la chaux dans le sol conduit à la formation de chaux éteinte (1,3 fois de la masse de chaux vive ajoutée) donc l'augmentation de la matière sèche.

### I.1.1.2. Diminution de l'indice de plasticité

Rogers et al. (Rogers et al. 1996) ont montré que l'augmentation du dosage en chaux provoque une forte amélioration de la limite de plasticité et une diminution de l'indice de plasticité avec une faible augmentation de la limite de liquidité comme illustrée dans la figure I.2.



*Figure I. 2 : Effet du dosage en chaux sur les limites d'Atterberg de l'argile de Londres (illite, kaolinite, smectite) (Rogers et al. 1996)*

Selon Bell (Bell 1996), l'augmentation de la limite de plasticité de l'argile traitée à la chaux dépend de sa minéralogie argileuse, par exemple l'augmentation de la limite de plasticité pour la kaolinite est moins forte que la montmorillonite et n'a aucune influence sur le quartz. L'addition de la chaux sur une argile très plastique a montré que l'indice de plasticité diminue de 170% à 58% (Lasledj et al. 2008).

La figure I.3 explique l'évolution des limites d'Atterberg et la transformation de l'état du sol après le traitement. La réduction de l'indice de plasticité se produit en concomitance avec celle de la teneur en eau. Après traitement, le sol se trouve à une teneur en eau inférieure à la nouvelle limite de plasticité. C'est-à-dire que le sol se transforme de l'état plastique (déformable – collant) avant le traitement à l'état solide (rigide – fragile) après le traitement. Cela facilite donc la mise en œuvre du remblai (la circulation des engins) (GTS 2000).

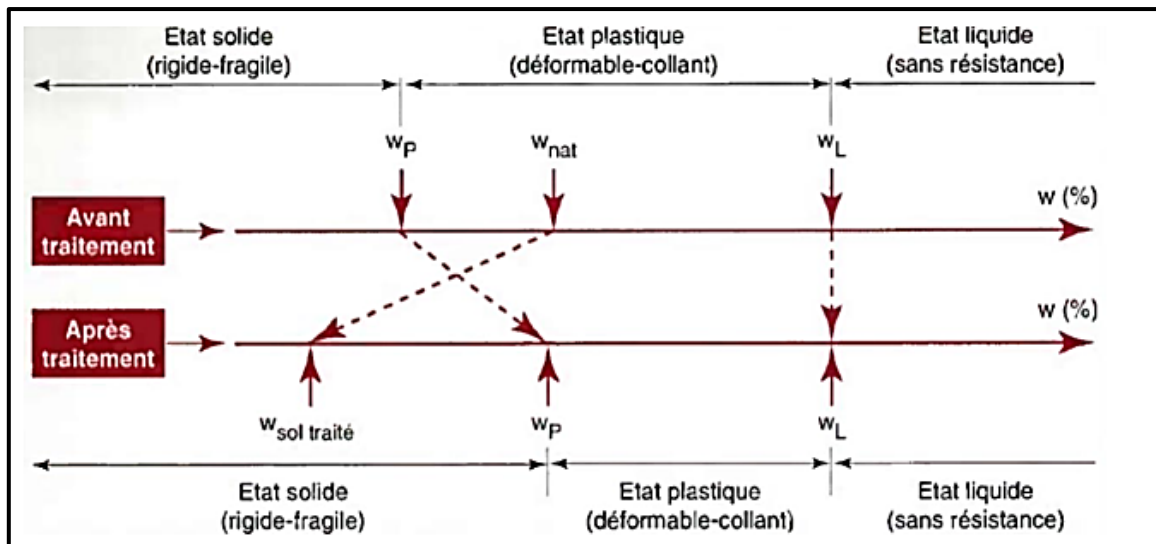


Figure I. 3 : Évolution de  $W_L$  et  $W_P$  d'un sol après l'ajout de chaux (GTS 2000)

### I.1.1.3. Amélioration des références de compactage

GTS (GTS 2000) a montré que la courbe de compactage Proctor devient plus aplatie après le traitement comme illustré dans la figure I.4.

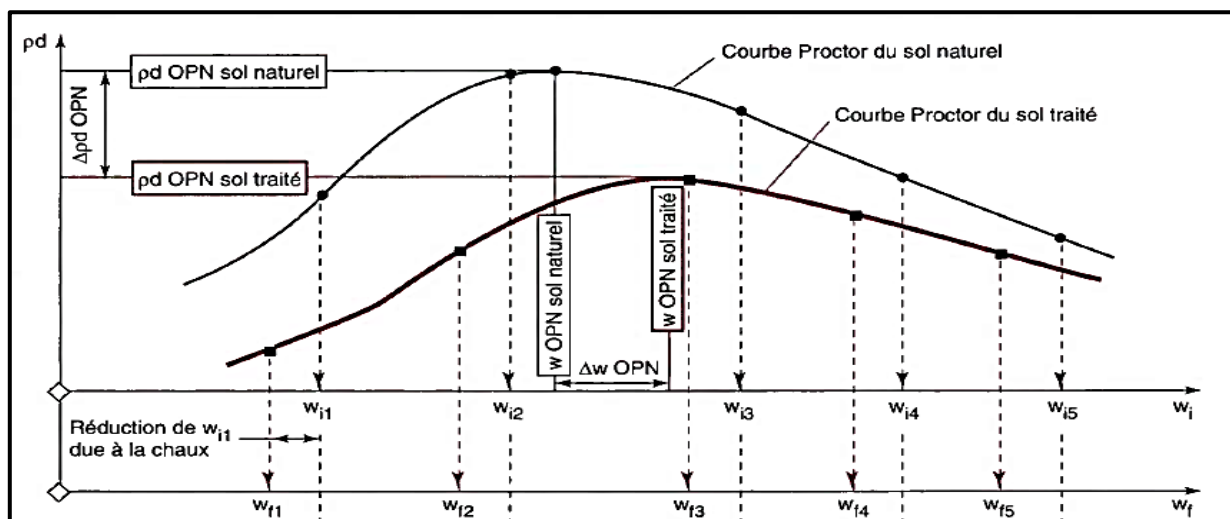


Figure I. 4 : Influence du traitement à la chaux sur les courbes Proctor (GTS, 2000)

Après l'incorporation de la chaux dans le sol, la masse volumique sèche maximale ( $pd_{OPN}$ ) diminuée et la teneur en eau à l'optimum ( $w_{OPN}$ ) augmente (Ormsby, 1973 ; Brandl, 1981 ; Osula, 1996). Cette diminution est attribuée et expliquée par le phénomène de floculation à cause de la réorganisation des particules argileuses, cette modification dépend de la quantité de chaux ajoutée. Plus la quantité de chaux ajoutée est importante, plus  $pd_{OPN}$  est faible et plus la teneur en eau optimale est décalée vers les fortes teneurs en eau. Les réactions d'hydratation et pouzzolaniques

exigent plus d'eau après l'addition de la chaux dans le sol ce qui explique l'augmentation de  $w_{OPN}$  (Mtallib et al. 2011).

Après le traitement, les courbes de l'indice portant californien  $CBR_{4j}$  immersion et l'indice portant immédiat (IPI) (figure I.5) se sont déplacées vers les teneurs en eau plus élevées, c'est-à-dire pour une même teneur en eau, la portance du sol traité est améliorée par rapport à celle du sol non-traité. Donc, il est possible d'améliorer et de rendre un sol sensible à l'eau vers un sol apte grâce au traitement à la chaux et au compactage quand la relation I.2 est vérifiée :

$$\frac{CBR_{4j} \text{ immersion}}{IPI} \geq 1 \quad \text{I. 2}$$

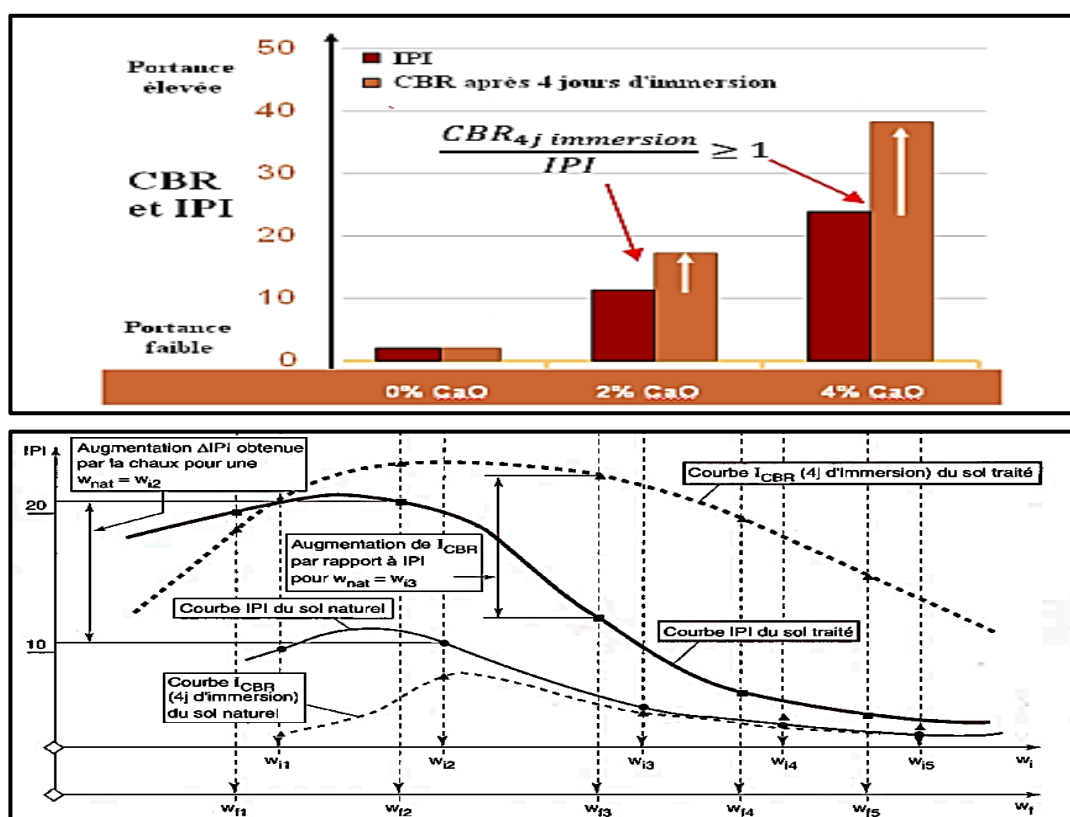
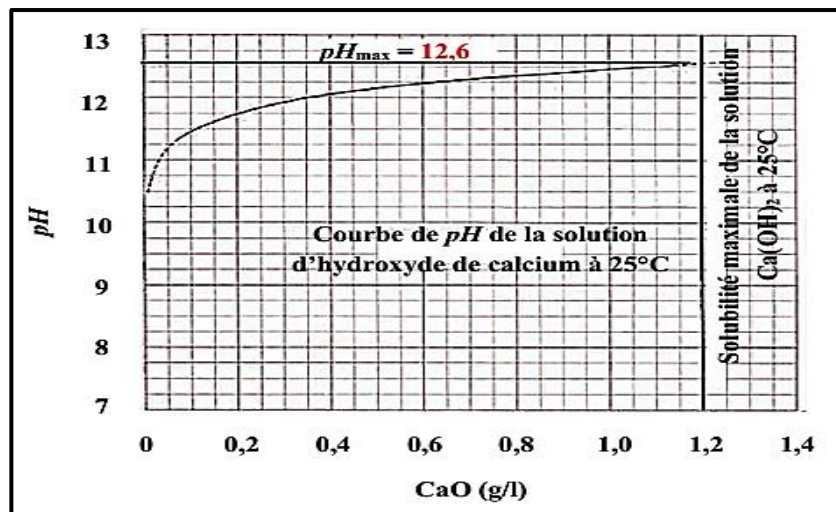


Figure I. 5 : Influence du traitement à la chaux sur les courbes Proctor (GTS 2000)

### I.1.1.3. Augmentation de pH

Il existe un dosage en chaux minimal nommé « point de fixation de la chaux (PFC) pour initier les réactions pouzzolaniques, à partir de ce dosage, la chaux devient disponible pour les réactions pouzzolaniques (Hilt et al. 1960 ; Eades et al. 1966 ; Locat et al 1990 ; Little 1995). En se basant sur l'étude de Eades (Eades et al. 1966) pour développer la norme ASTM D6276-99a qui détermine le PFC, le point de fixation de la chaux représente le dosage en chaux correspondant à une valeur de pH de 12.4. Le Runigo (Le Runigo, 2008) a montré que le pH est utilisé comme un indicateur de la quantité de la chaux ajoutée à un sol pour améliorer ses performances mécaniques.

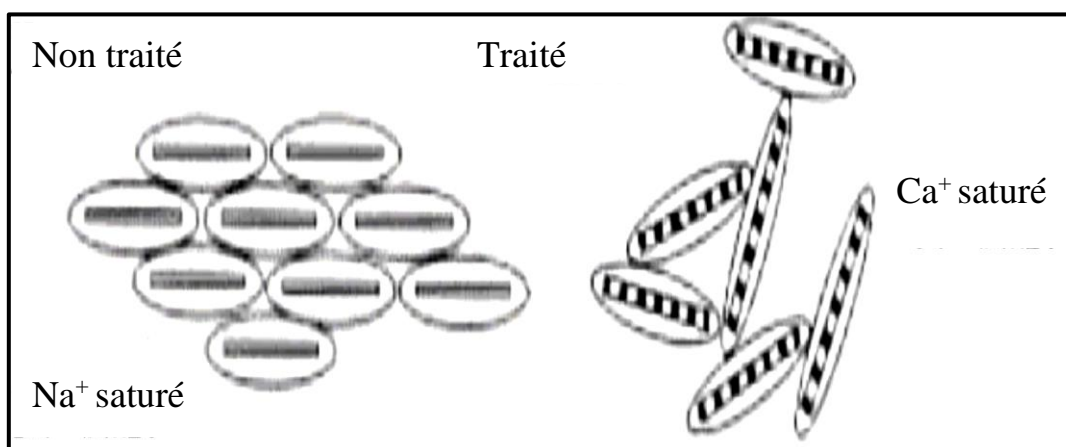
L'augmentation de pH est d'autant plus élevée que la quantité de chaux est importante comme illustré dans la figure I.6. Le pH peut atteindre une valeur de 12,6 au maximum, proche du pH d'une solution aqueuse saturée en chaux.



*Figure I. 6 : Variation du pH d'une solution de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dans l'eau en fonction de la quantité de chaux ajoutées (Marrot, 2010)*

#### I.1.1.4. Flocculation et capacité d'échange cationique CEC

Des raisons de la flocculation et l'agglomération des particules argileuses en grumeaux stables l'ionisation, hydratation et la modification de la capacité d'échange cationique (CEC) (Diamond et al. 1965 ; Herzog et al.1963). Ce phénomène s'explique par la formation de ponts  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ou  $\text{CaOH}^+$  entre les feuillets d'argile comme illustrée dans la figure I.7.

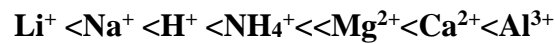


*Figure I. 7 : Structure microscopique d'une argile non traitée et traitée à la chaux (Little 1987)*

Les cations  $\text{Ca}^{2+}$  en solution se substituent aux cations adsorbés à la surface des argiles et dans leurs espaces interfoliaires (Little 1987). Cet échange se produit, car les ions de calcium divalents peuvent remplacer facilement des cations monovalents, et des ions en plus forte concentration remplacent



aisément ceux dont la concentration est moindre. Généralement, les cations de plus grande valence remplacent ceux dont la valence est plus faible, et les cations de grande taille remplacent ceux dont la taille est plus petite, mais de même valence (**Thi Thanh Hang Nguyen 2015**). À concentrations égales, voici l'ordre de substitution classique, où le cation de droite remplace celui de gauche :



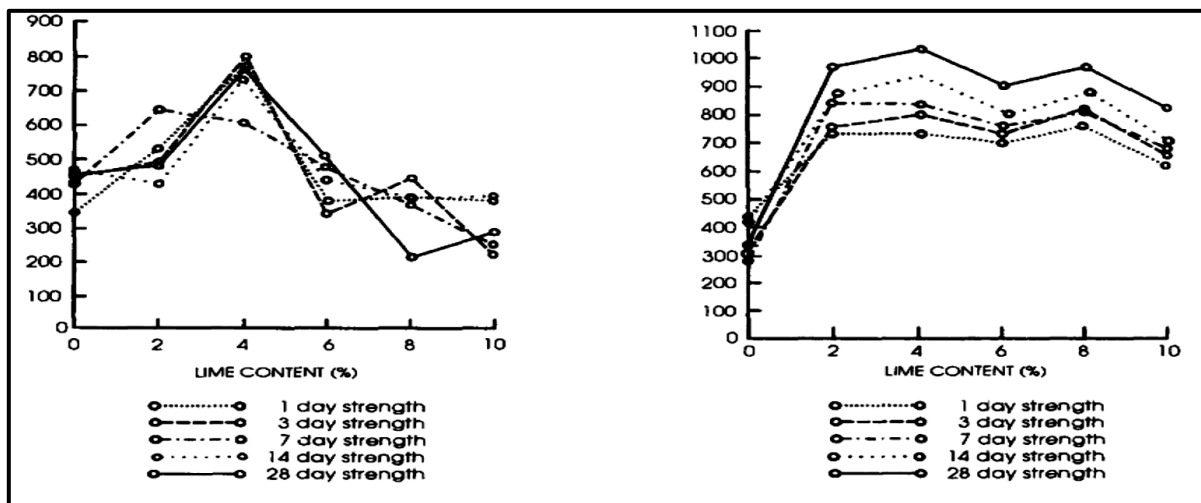
Croft et al. (**Croft et al. 1962**) ont rapporté que le ciment pouvait s'hydrater normalement dans les minéraux argileux, que la kaolinite et l'illite consommaient peu d'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , CH) et que la résistance du sol stabilisé constitué du sol principalement composé était plus élevée. La montmorillonite consommait plus de CH et la résistance du sol stabilisé constitué du sol principalement composé était plus faible. Cui (**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.

Cette théorie n'explique pas de manière satisfaisante le phénomène mentionné ci-dessus. Nakatsukasa (**Nakatsukasa 1986**) a signalé que d'autres cations absorbés par le sol pouvaient échanger avec du  $\text{Ca}^{2+}$  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 (**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 au ciment.

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 (**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  $\text{Ca}^{2+}$  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.

Un phénomène identique est observé dans l'étude de (**Bell 1996**) : en déterminant les résistances à la compression simple de la kaolinite et de la montmorillonite traitées à différents dosages en chaux et pour différents temps de cure de moins de 28 jours comme cela est présenté dans la figure I.8, l'auteur

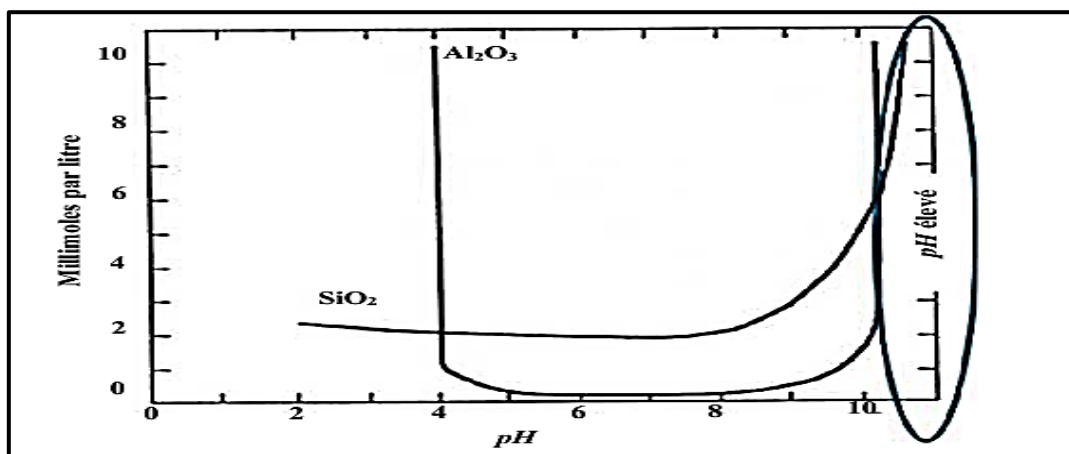
a tiré la conclusion de l'existence d'un dosage en chaux optimal correspondant à la valeur maximale de la résistance à la compression simple.



*Figure I. 8 : Résistances à la compression simple d'une montmorillonite (à gauche) et d'une kaolinite (à droite) traitées à différents dosages en chaux*

#### I.1.1.5. Réaction pouzzolanique

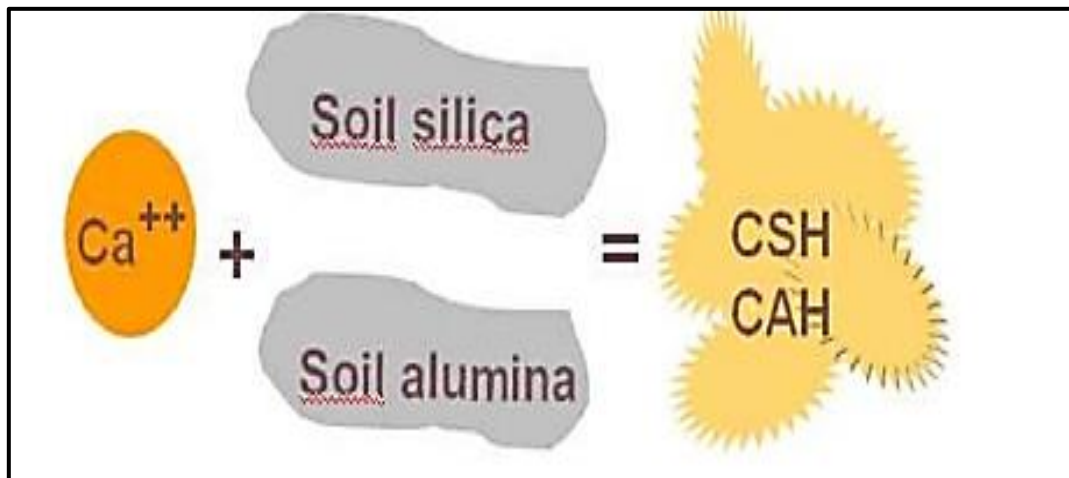
Les silicates et aluminates présents dans le sol sont susceptibles de subir une dissolution à cause de la valeur de pH élevée due à l'hydratation de la chaux vive comme illustrée dans la figure I.9.



*Figure I. 9 : Solubilité des aluminates et des silicates en fonction du pH (Little 1987)*

Plusieurs chercheurs (Eades et al. 1960 ; Bell, 1996 ; Rao et al. 2001) ont constaté que la formation des silicates de calcium hydratés (C-S-H), aluminates de calcium hydraté (C-A-H) et des silicates d'aluminate de calcium hydratés (C-A-S-H) a causé des éléments dissouts qui réagir avec les cations  $\text{Ca}^{2+}$  substitués comme présentés dans la figure I.10, créant ainsi des liaisons de même nature que des produits cimentaires. Ces réactions sont dites réactions pouzzolaniques. La nature des produits cimentaires formés varie en fonction de la nature des minéraux argileux : une montmorillonite

mènerait, contrairement à une kaolinite, à la formation de C-S-H plutôt qu'à la formation de C-A-H (Bahar et al. 2018 ; Boardman et al. 2001).



*Figure I. 10 : Réaction pouzzolaniques (Marrot 2010)*

Des études ultérieures (Locat et al. 1990 ; Perret, 1977 ; Estéoule et al. 1979 ; Choquette, 1988) ont montré que les responsables du durcissement du mélange sol-chaux sont les réactions pouzzolaniques. Cependant, les vitesses de solubilisation des constituants de la fraction argileuse d'un sol sont plus faibles qu'en présence des matériaux pouzzolaniques traditionnels, et donc les phénomènes de cimentation et du durcissement se développent lentement (plusieurs semaines, mois, voire des années dans les conditions climatiques tempérées).

Plusieurs facteurs influencent la vitesse et la cinétique des réactions; la température du milieu, l'état hydrique du sol, la quantité et la nature de la fraction argileuse.

Pour une température du milieu au-dessus de 45°C, les produits de la réaction sont dénaturés (Thompson, 1968 ; Bell, 1996). Lorsque la température est inférieure à environ 4°C, la prise est ralentie, voire arrêtée, et reprend lorsque la température commence à s'élever à nouveau. Donc, plus la température est faible plus la prise est lente, et l'inverse plus la température est élevée, plus la prise est rapide. Cabane (Cabane 2005) a montré que la quantité de l'eau libre dans le sol doit être suffisante pour assurer la solubilisation et l'hydratation des particules, cette quantité d'eau se situe légèrement au-dessus de celle à l'optimum Proctor normal (Le Roux 1969).

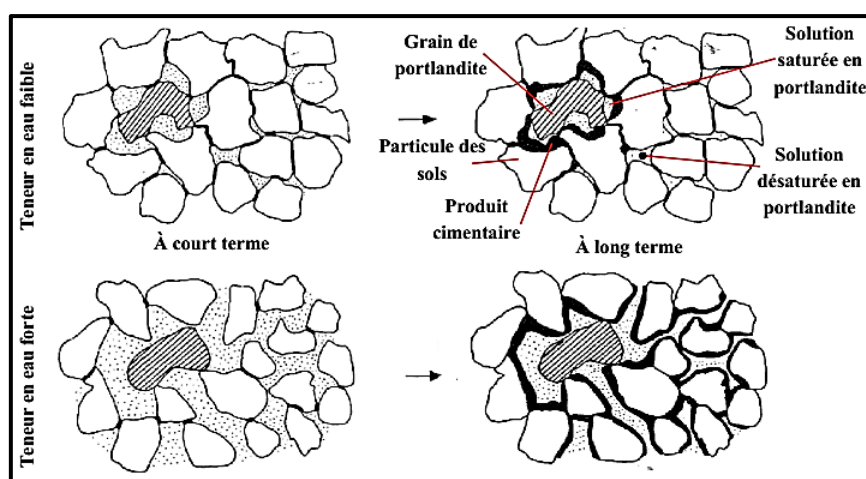
La quantité et la nature de la fraction argileuse sont des facteurs qui influencent la vitesse des réactions, car ils sont constitués de phyllosilicates d'aluminium, qui réagit avec la chaux, plus la teneur en silicate disponible est élevée plus la réaction est forte. Dans le cas de la recombinaison pouzzolaniques, la montmorillonite composée en trois couches subit des réactions plus vites qu'une kaolinite composée de deux couches à cause des silicates qui sont exposés des deux côtés pour la

montmorillonite, parfois avec un décalage de plusieurs semaines. Néanmoins, une surface de silicates « disponibles » est attaquant si elle n'est pas reliée à une autre surface similaire par des ions qui ne sont pas facilement échangeables, comme c'est le cas dans l'illite et le chlorite.

### I.1.2. Stabilisation à long terme

Comme évoqué précédemment, la stabilisation à long terme est due aux réactions pouzzolaniques se produisant sur la surface des grains (**Ingles et al. 1973 ; Choquette, 1988 ; Locat et al. 1990 ; Le Runigo, 2008**).

Les travaux de Ingles (Ingles 1970) ont montré pour la première fois que les réactions pouzzolaniques pourraient être initiées par la dissolution des contours des feuillets argileux en contact avec de l'eau du sol. Il y aurait alors mis en solution de la silice, et précipitation de C-S-H sur les bords des argiles. Ces réactions seraient, selon lui, poursuivies jusqu'à épuisement de l'eau contenue dans les pores. Plus tard, Ingles (**Ingles et al. 1973**) a proposé le premier modèle schématisant l'initiation des processus physico-chimiques lors de l'incorporation de la chaux dans le sol. Ce modèle a été modifié par Choquette (**Choquette 1988**) en tenant en compte la différence de la condition de compactage entre la teneur en eau faible et la teneur en eau forte. Locat et al. (**Locat et al. 1990**) ont complété ce modèle (figure I.11). Après le malaxage du sol avec la chaux, la réaction pouzzolanique entre la chaux et des feuillets argileux dans le sol crée des produits cimentaires qui couvraient les grains et les lient entre eux. À long terme, le sol à une teneur en eau élevée qui semble réagir mieux avec la chaux que celui à une teneur en eau faible car le mouvement du soluté dans les pores est plus facile dans le premier cas et cela crée la condition favorable à la formation des produits cimentaires.



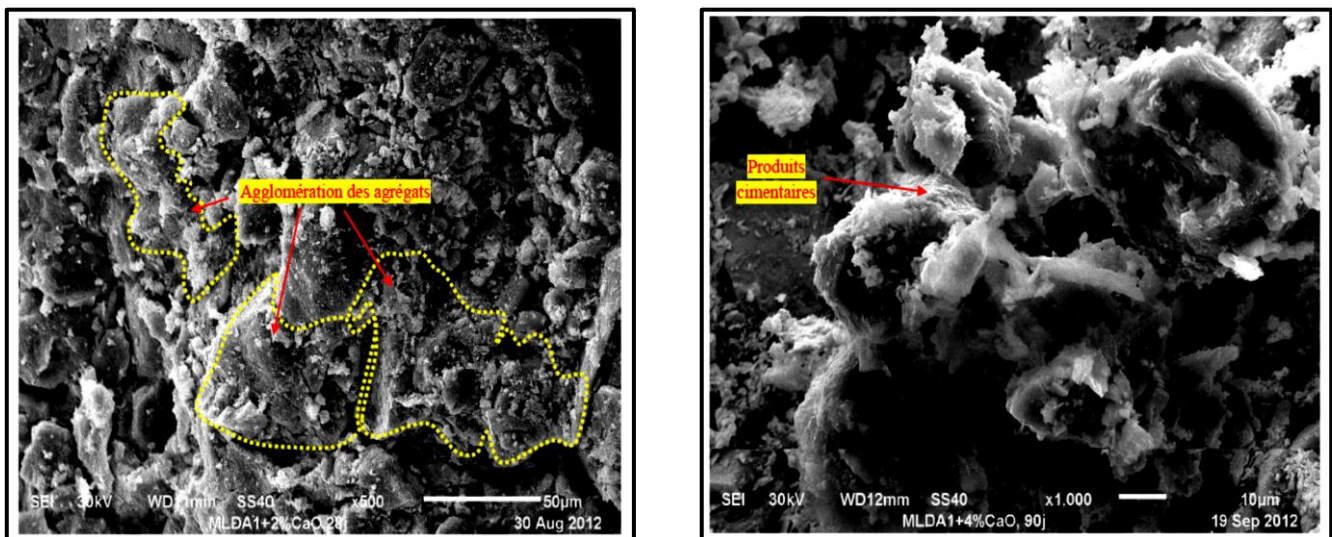
**Figure I. 2: Schémas du mécanisme de stabilisation des sols traités à la chaux (Locat et al. 1990)**

L'étude de Deneele et al. (**Deneele et al. 2009**) à l'aide de la Microscopie électronique à balayage (MEB) a éclairé les processus physico-chimiques dans un sol limono-argileux traité à la chaux. Selon

leur observation, un sol limono-argileux naturel comprend des particules élémentaires (grains de sol). Ces particules élémentaires sont recouvertes par des minéraux argileux agglomérés et ces particules argileuses forment des ponts continus entre les grains. Les particules élémentaires sont au contact les uns avec les autres et laissent entre elles des macropores de 100  $\mu\text{m}$ . Les agrégations de particules argileuses sont à l'origine d'une microporosité intra-agrégats ( $< 1 \mu\text{m}$ ) (figure I.12). L'ajout de la chaux dans le sol induit une modification de la microstructure à long terme. Après 28 jours de traitement, les auteurs ont observé que les grains de sol présentent une structure en nids d'abeilles.

Cette structure résulte de la précipitation d'hydrates à la surface des grains. Les analyses qualitatives effectuées montrent que ce sont des silicates de calcium hydraté (C-S-H) associés à des aluminosilicate de calcium hydraté (C-A-S-H).

Les C(A)-S-H formés présentent une structure alvéolaire caractéristique de la structure de nid d'abeilles. Cette structure crée des pores de très petite taille ( $< 1 \mu\text{m}$ ). Ce ne sont plus les particules argileuses qui connectent les grains, mais les hydrates qui se propagent à la surface des grains, liant les différents grains entre eux (figure I.12).



**Figure I. 3 Morphologie du sol traité à 4% CaO, après 90 jours**

La stabilisation à moyen et à long terme conduit à la modification de la microstructure, de la conductivité hydraulique, et à l'augmentation des performances mécaniques des sols traités, comme ce qui est montré par la suite.

## I.2. Cycle séchage-humidification

La durabilité peut être définie comme la capacité des matériaux à conserver leur stabilité et leur intégrité et à maintenir une résistance résiduelle suffisante à long terme pour offrir une résistance

suffisante aux conditions climatiques (**Dempsey et al. 1968**). Outre les propriétés mécaniques et minéralogiques du sol, sa durabilité dans des conditions climatiques extrêmes est un paramètre essentiel pour évaluer in situ l'utilisation du sol en tant que matériau de construction. Les conditions climatiques, à savoir les cycles de séchage-humidification, sont considérées comme l'une des actions les plus destructrices pouvant causer des dommages aux infrastructures telles que les autoroutes et les chaussées (**Allamand, 1981 ; Sobhan et al. 2007**). Au cours de ces cycles, la plupart des propriétés techniques des sols, notamment leur résistance, sont sérieusement affectées et il en résulte une propagation des fissures et une défaillance de la stabilité (**Al-Obaydi et al. 2010; Al-Zubaydi, 2011**).

Les sols fins et sols sableux, gracieux avec fins sont actuellement utilisés dans des applications géotechniques, en particulier dans la construction d'infrastructures telles que les autoroutes et les chaussées (**Aiban et al. 1998; Razouki et al. 1999 ; Rollings et al. 1999; Adamset, 2008**). La quantité de la chaux dans un sol est cruciale pour déterminer les propriétés, en particulier le changement de volume et la résistance nécessaires pour toutes les applications géotechniques. Certains auteurs (**Smith et al. 1962 ; voir également FAO, 1990**) ont constaté que dans le cas des sols fins qui contiennent des teneurs en gypse inférieures à 10% n'affectait pas de manière significative les caractéristiques du sol (structure, texture et rétention d'eau).

Sur la base de leurs études, les chercheurs ont déterminé diverses quantités initiales de sulfates (c.-à-d. De gypse) auxquels des problèmes tels qu'une réduction de la résistance et une augmentation du gonflement peuvent être attendues. En fait, les sols à grain fin sont généralement connus pour leur vulnérabilité environnementale et sont considérés comme problématiques, car ils perdent les propriétés techniques requises pour une utilisation dans des structures géotechniques lorsqu'ils sont exposés à des conditions environnementales telles que le gel-dégel (**Saetersdal, 1981 ; Czurda et al. 1997 ; Aldaood et al., 2014**) et des cycles séchage-humidification (**Hunter, 1988 ; Al-Obaydi et al., 2010 ; Little et al., 2010 ; Tang et al., 2011**).

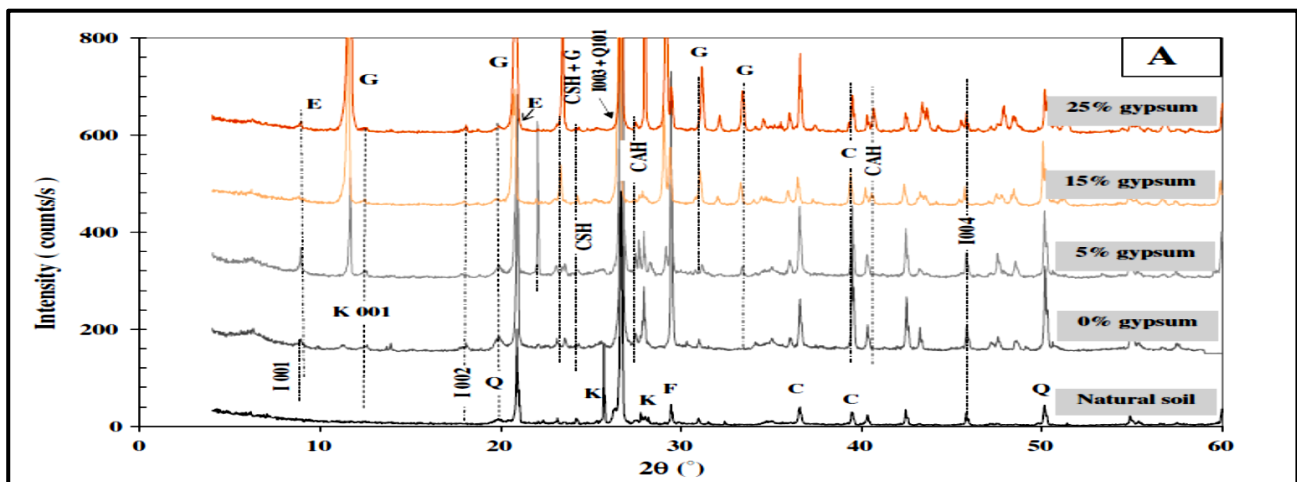
Cependant, les résultats des recherches sur les effets des cycles de séchage-humidification sur la stabilité des sols à grains fins stabilisés sont très rares et dépendent du type de sol, du pourcentage de stabilisant, des méthodes d'essai et des conditions de durcissement (**Shihata et Baghdadi, 2001 ; Khattab et al. 2007 ; Al-Obaydi et al. 2010 ; Al-Kiki et al. 2011 ; Tang et al. 2011**). Al-Obaydi et al. (**Al-Obaydi et al. 2010**) ont étudié la durabilité des sols gypseux contenant 23% de gypse, stabilisés avec du ciment et de la chaux résiduelle et soumis à 12 cycles de séchage-humidification. Les échantillons ont été durcis pendant 7 jours avant les tests. Ils ont déterminé que les échantillons de sol naturels ne présentaient aucune durabilité contre le séchage-mouillage, tandis que la résistance

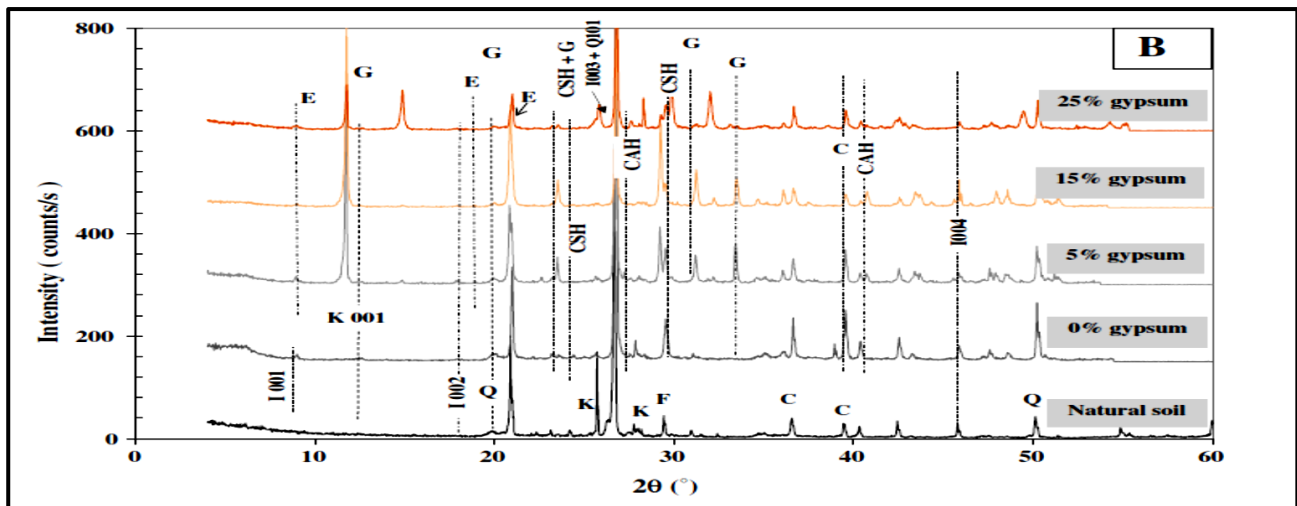


du sol était renforcée par l'ajout de ciment et de chaux résiduelle. Ils ont conclu que le degré de détérioration dû aux cycles de séchage-mouillage dépend du traitement utilisé : la détérioration des échantillons stabilisés avec de la chaux résiduelle est plus prononcée que celle des échantillons stabilisés avec du ciment. (Maafi. N, 2020)

### I.2.1. Analyse minéralogique et microstructurale

Les analyses DRX d'échantillons de sol naturel et d'échantillons de sol traités à la chaux et durcies pendant 28 jours à 20 °C sont illustrées à la figure I.13. Le diagramme de DRX des échantillons de sol naturel indique que le sol est composé principalement de kaolinite sous forme de minéraux argileux et contient du quartz, de la calcite et des feldspaths. En raison du milieu fortement alcalin (pH atteignant 12,4) activé par la dissolution de la chaux ajoutée dans l'eau libre du sol traité, les cations de calcium divalent ( $\text{Ca}^{+2}$ ) de la chaux ont été dissous. De plus, des réactions pouzzolaniques ont permis à la silice dissoute et à la fraction alumine du sol de se combiner au calcium dissous dans l'eau libre du sol. Tant que le calcium résiduel est disponible et que le pH est suffisamment élevé, la réaction pouzzolanique se poursuivra. Ces réactions entraînent la formation d'hydrates de calcium en raison de la présence d'ions  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SiO}_4$  et  $\text{AlO}_6$ . (Maafi. N, 2020)





**Figure I. 4:** Diagrammes de diffraction des rayons X (DRX) des échantillons de sol (A) après 28 jours de durcissement et (B) à la fin des cycles de séchage-humidification (G: Gypse; E: Ettringite; Q: Quartz; K: Kaolinite; I: Illite C: Calcite; F: Feldspath). A. Aldaood, 2014)

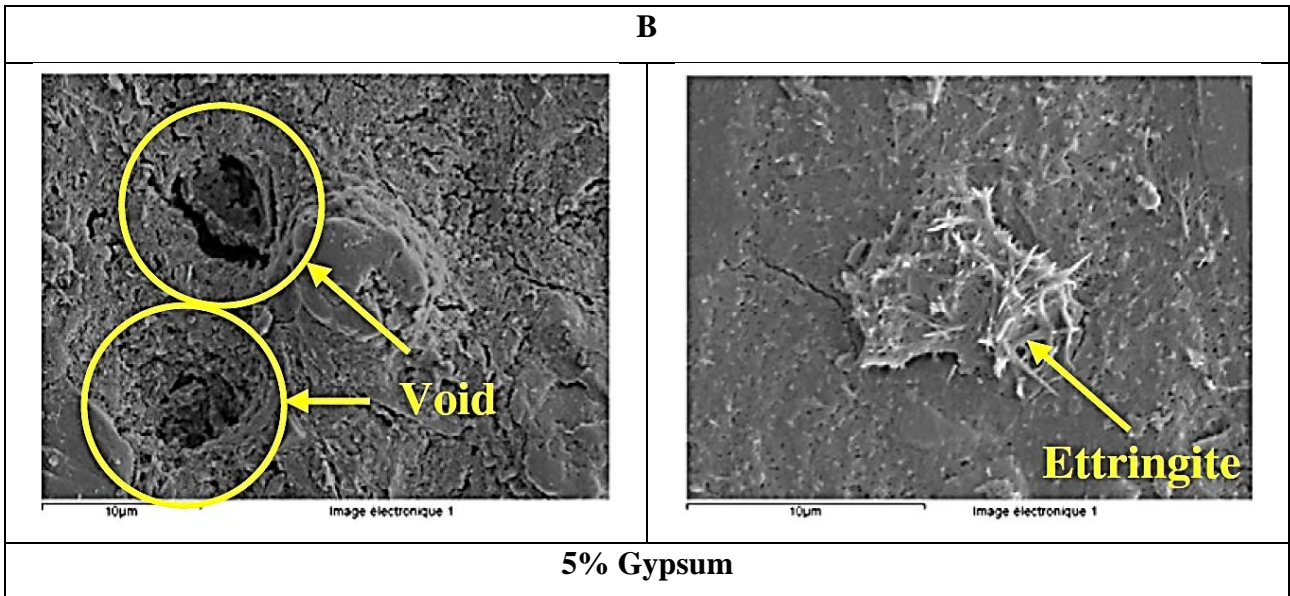
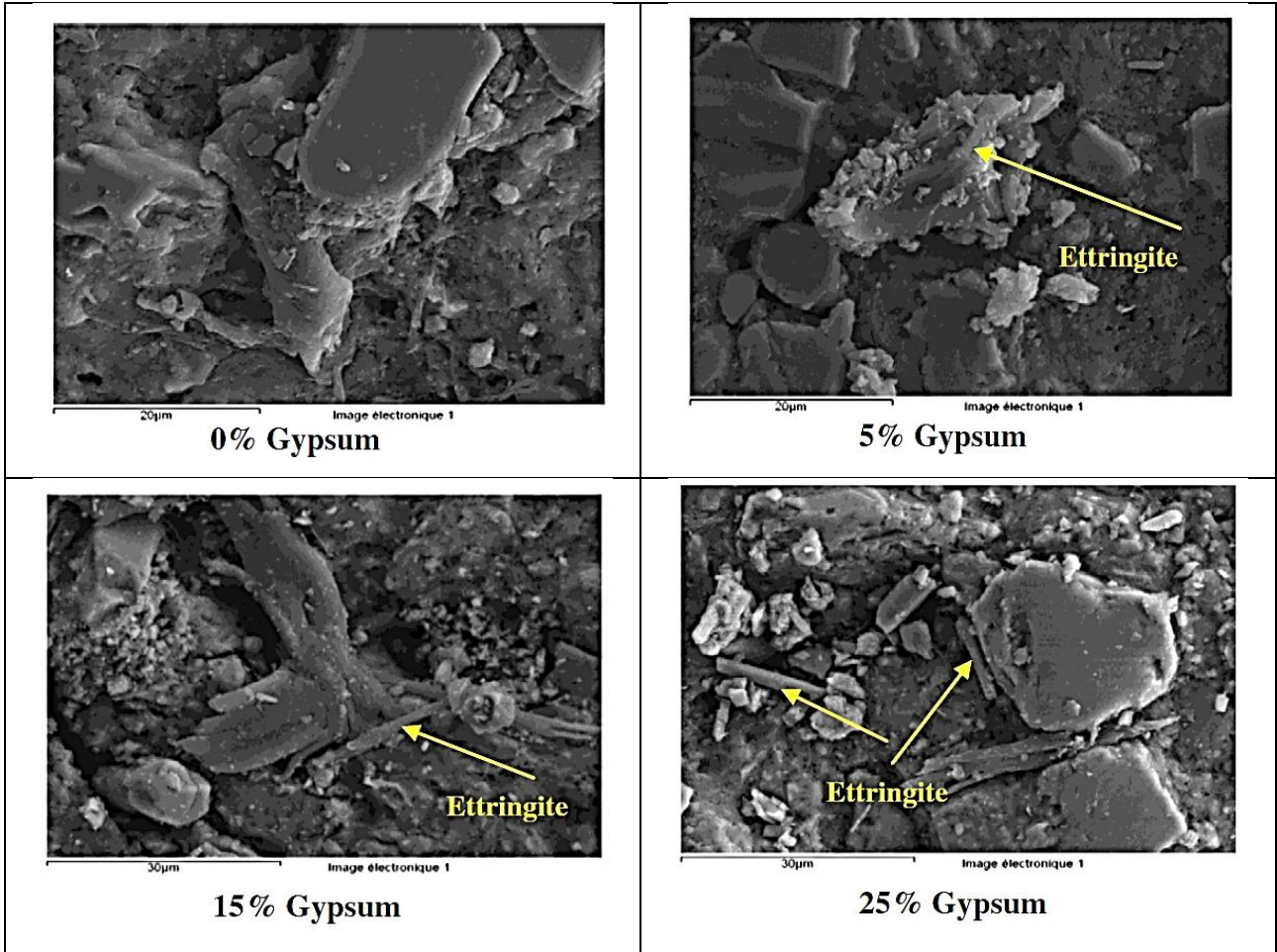
L'identification a révélé la formation de nouveaux hydrates de calcium (CSH et CAH) dans tous les échantillons traités à la chaux et d'ettringite dans les échantillons contenant du gypse. L'ettringite est un minéral de type sulfate de calcium et d'aluminium hydraté (CASH). L'intensité la plus élevée d'ettringite a été observée dans les échantillons de sol contenant 5% de gypse. (Maafi, N, 2020)

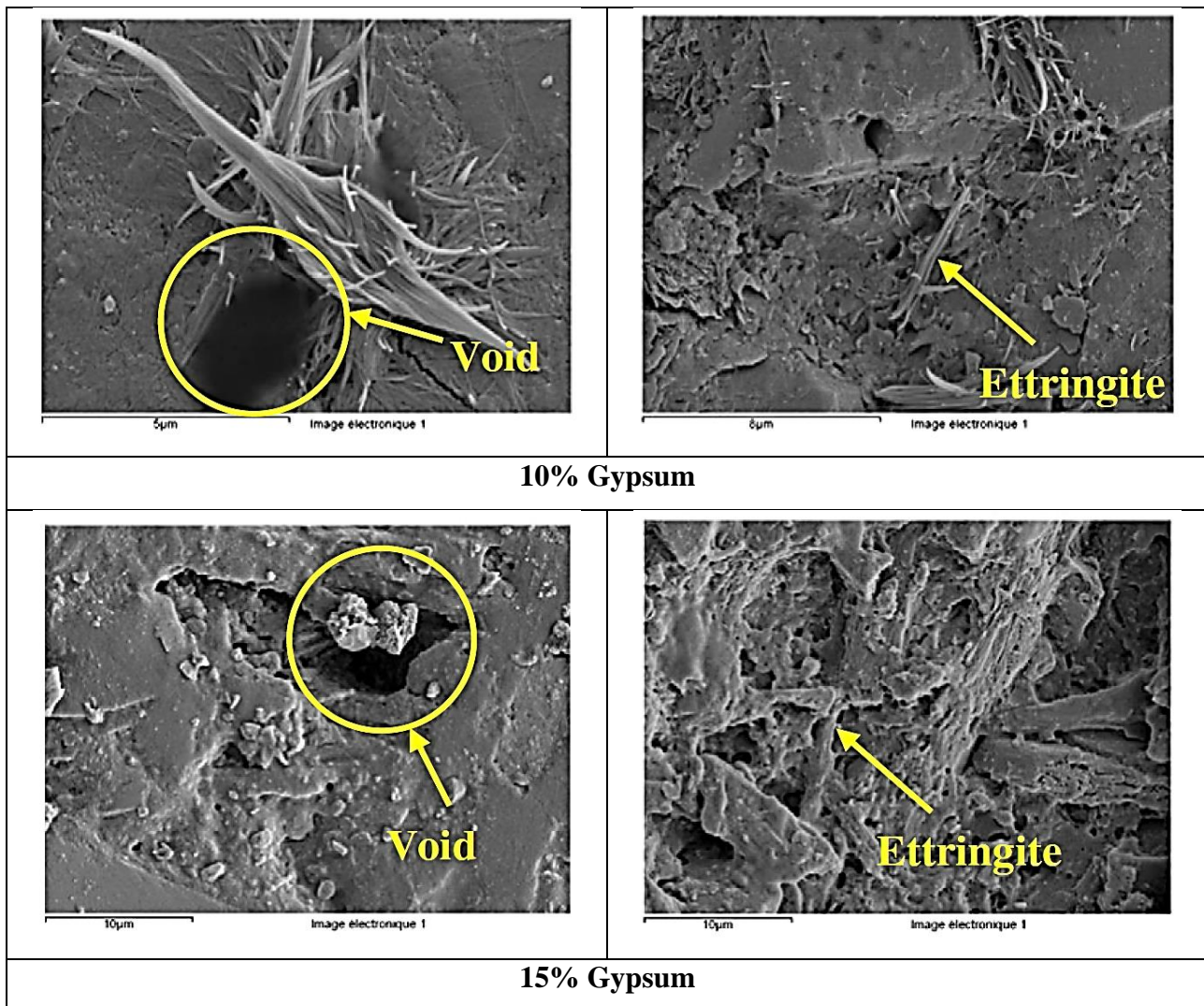
La figure I.13 montre les schémas de diffraction des rayons X des échantillons de sol à la fin des cycles séchage-humidification. Les échantillons de sol gypseux révèlent l'augmentation du pic d'ettringite qui apparaît à  $2\theta = 21,08^\circ$ . Ceci est attribué à plus de réactions se produisant entre les composants de l'échantillon (sol, gypse et chaux) au cours des cycles séchage-humidification. De plus, la plupart des pics d'intensité du gypse ont diminué pendant les cycles séchage-humidification, en raison de la dissolution du gypse.

Il existe également un risque de formation d'un hémihydrate de sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) pendant les cycles de séchage-humidification du sol contenant 25% de gypse ( $2\theta = 14.83^\circ$ ). Cela peut être dû à la teneur élevée en gypse en plus de la température de séchage de  $60^\circ\text{C}$ .

A







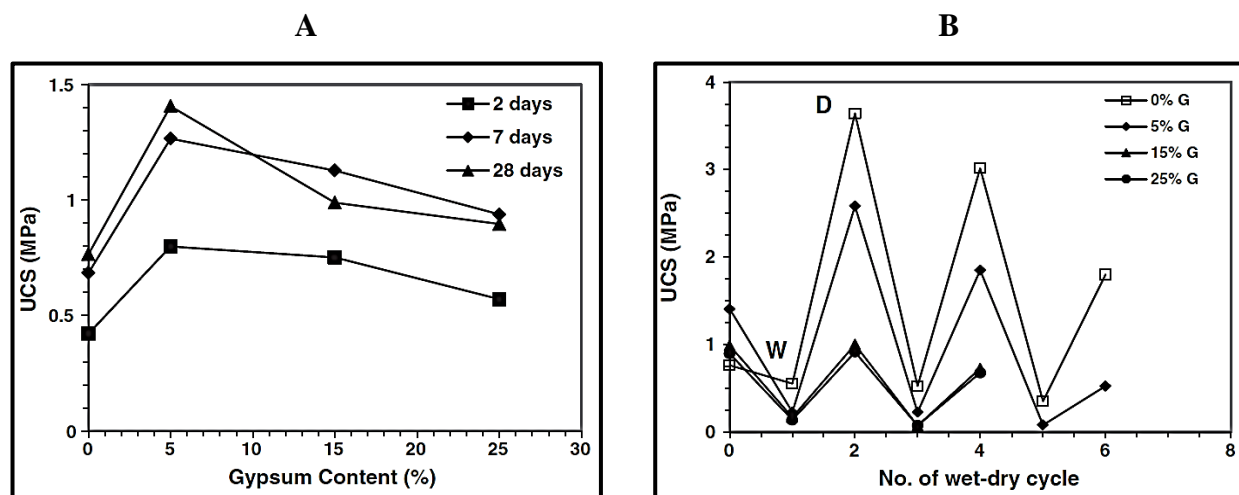
**Figure I. 5:Image MEB. (A) après 28 jours de durcissement et (B) à la fin des cycles séchage-humidification. (A. Aldaood, 2014)**

La présence de particules d'ettringite révélée par le DRX a été confirmée par des images au MEB (figure I.19). La présence d'ettringite est plus élevée dans les échantillons de sol contenant de plus grandes quantités de gypse. Les images MEB (figure I.14A) montrent les modifications de la texture des différents échantillons testés: des particules plus petites ont été observées dans les échantillons de gypse par rapport aux échantillons sans gypse. La réaction chaux– sol – gypse induit l'affinement de la structure. De plus, les images MEB des échantillons de sol après des cycles de séchage-humidification (figure I.14B) illustrent la présence d'un certain nombre de vides induits par la dissolution du gypse. (Maafi. N, 2020)

### **I.2.2. Résistance à la compression**

La figure I.20 montre les résultats de résistance à la compression d'échantillons de sol durcis à différents âges. Alors que le processus de durcissement tend à augmenter la résistance de tous les

échantillons de sol, les valeurs de ( $R_c$ ) des échantillons contenant du gypse sont supérieures à celles des échantillons sans gypse. La résistance à la compression a augmenté de manière significative avec 5% de gypse, mais moins pour des pourcentages plus élevés de gypse (15% et 25%). Les augmentations de la résistance ont été prononcées à la fin du septième jour de cure. Pour les deux pourcentages les plus élevés de teneur en gypse (15% et 25%), la présence de particules de gypse n'ayant pas réagi avec de la chaux, représentant des matériaux légers de densité 2.3, peut être à l'origine de la légère réduction du ( $R_c$ ) entre 7 et 28 jours de cure. Les augmentations du temps de durcissement (2 à 28 jours) peuvent être attribuées au taux d'hydratation dû aux réactions à court terme entre le sol, la chaux et le gypse et à la formation de C-S-H et/ou de C-A-H et d'ettringite. On sait que le gypse améliore la résistance du sol en modifiant le cours de l'hydratation du silicate de calcium, qui se forme principalement dans les premières étapes de l'hydratation. L'ajout de gypse entraîne la libération d'ions sulfate qui réagissent avec la phase d'alumine dans le sol. Le gypse accélère la réaction chimique entre le sol et la chaux (Holm et al., 1977; Kujala, 1977; Kujala et al. 1977). L'hydrate de silicate se forme aussi bien que l'aluminate de calcium, ce qui permet de renforcer les échantillons de sol. (Maafi. N, 2020)



**Figure I. 6: Résistance à la compression. A) cure normale. B) cycles séchage-humidification. (A. Aldaood, 2014)**

La résistance à la compression du sol traité à la chaux diminue avec l'augmentation du nombre de cycles de séchage-humidification, comme le montre la figure I.15. La réduction la plus importante a été enregistrée après le premier cycle pour les échantillons testés à l'état mouillé et la réduction a progressivement atteint des valeurs minimales au quatrième cycle pour les échantillons de sol avec 15 et 25% de gypse, tandis que la réduction s'étend au sixième cycle pour les échantillons de sol avec 0 et 5% de gypse.

Les valeurs de ( $R_c$ ) des échantillons de sol testés à l'état de séchage étaient supérieures à celles de l'état d'humidification et ces valeurs diminuaient également avec le nombre de cycles. Les valeurs maximales de ( $R_c$ ) ont été enregistrées avec des échantillons de sol contenant respectivement 0 et 5% de gypse, par rapport à des échantillons de sol contenant 15 et 25% de gypse. Ces résultats expérimentaux révèlent que la teneur en gypse joue un rôle important dans les propriétés de durabilité du sol. (**Maafi. N, 2020**)

La formation d'ettringite, illustrée à la figure I .14 A et B (MEB), entraîne également une dégradation de la résistance en affectant la structure du sol et en augmentant le volume des échantillons de sol (c'est-à-dire en provoquant une expansion). L'ettringite est un minéral hydraté qui présente un comportement expansif lorsqu'il est mouillé (**Wild et al., 1999; Little et al., 2010; Celik et al. 2013**). Cette expansion rend les échantillons de sol stabilisés potentiellement instables sur le plan volumétrique (**Wild et al., 1998; Rahmat et al. 2011**). La dissolution de l'ettringite au cours des cycles de séchage-humidification provoque la formation de macro vide, entraînant une réduction de la résistance du sol. (**Maafi. N, 2020**)



---

# **TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES**

---

### II.1. Introduction

Pour étudier la stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au séchage-humidification, différents essais ont été effectués dans cette étude. Les essais réalisés sont divisés en trois groupes :

- **Essais de caractérisation** : caractérisation géotechnique, caractérisation des éléments chimiques 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, l'essai de détermination des références de compactages tels que les courbes Proctor à énergie normale, les courbes de l'indice portant immédiat, et l'indice portant CBR après 4 jours d'immersion. 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. L'essai de détermination du point de fixation de la chaux (PFC) est utilisé pour déterminer des dosages en chaux. (Maafi. N, 2020)

- **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, telle que l'essai de compression simple (UCS) et l'essai de traction Brésilienne (Rtb). (Maafi. N, 2020)

- **Essais pour étudier les comportements au cycle séchage-humidification**. Deux groupes d'essais correspondant aux phénomènes de cycle séchage-humidification dans le sol sont concernés : le premier groupe comporte le suivi de la perte de masse vis-à-vis aux cycles séchage-humidification, et le deuxième groupe concerne également le suivi de la variation de la résistance mécanique à la compression simple (UCS) au cours des cycles. (Maafi. N, 2020)

### II.2. Préparation des sols

#### II.2.1. 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 chaux ajoutée «  $m_{CaO}$  » est déterminée selon l'équation (II.2) après une durée d'homogénéisation du sol dans la boîte hermétique :

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

Où :

C (%) : dosage en chaux,

m : masse initiale 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 et on le laisse 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 présentés est illustré dans la figure II.1 :



Figure II. 1: Préparation du sol traité. (Maafi. N, 2020)

### II.3. Essais de caractérisations

#### II.3.1. Essais de caractérisations géotechniques et chimiques

Les essais de caractérisations géotechniques du sol et les Normes correspondantes sont regroupés dans le tableau II.1 suivant :

*Tableau II. 1: Les essais de caractérisations géotechniques 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 de 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 du pH	-	ASTM D 6276
7	Fluorescence X pour déterminer les éléments chimiques	P18-660-1/IN1	-

#### II.3.1. Détermination des dosages en chaux

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 pour la stabilisation du sol est déterminée par des essais de caractéristiques spécifiques du sol stabilisé, tel 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. (Maafi, N, 2020)



**II.3.1. 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 du mélange sol-chaux pour obtenir un pH d'au moins 12,4. Cette de valeur de pH obtenu dans cette méthode d'essai résulte de la présence de chaux libre dans le mélange sol-chaux. Normalement, le pH de la chaux spécifique utilisée pour la stabilisation du sol devrait être déterminé et utilisé comme indicateur.

**II.3.2. 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, on 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 et peuvent produire des résultats erronés selon cette méthode. (Maafi. N, 2020)

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 présentée dans la figure II.2.

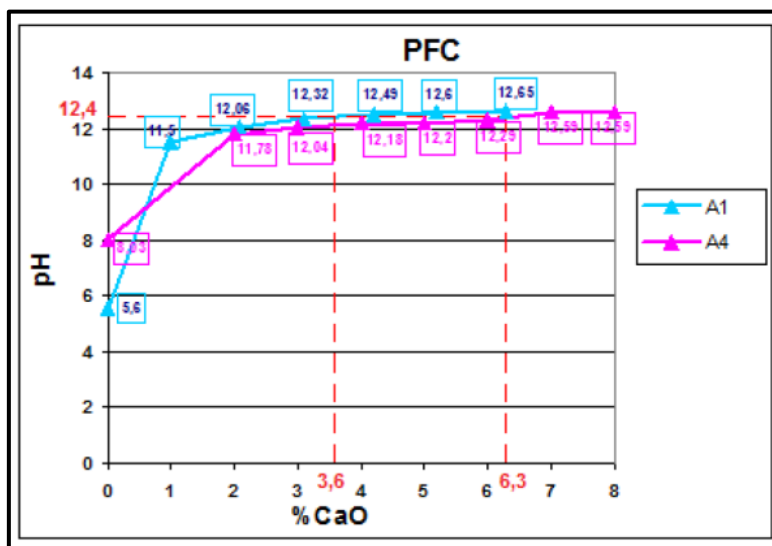


Figure II. 2 : Détermination du PFC (Marrot, 2010)

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 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.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, appliquée 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). (Maafi. N, 2020)

L'éprouvette est confectionnée à  $50 \pm 2$  mm de diamètre et de  $100 \pm 2$  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.3.



Éprouvettes 10X10 pour l'essai de compression simple au mode de cure normale

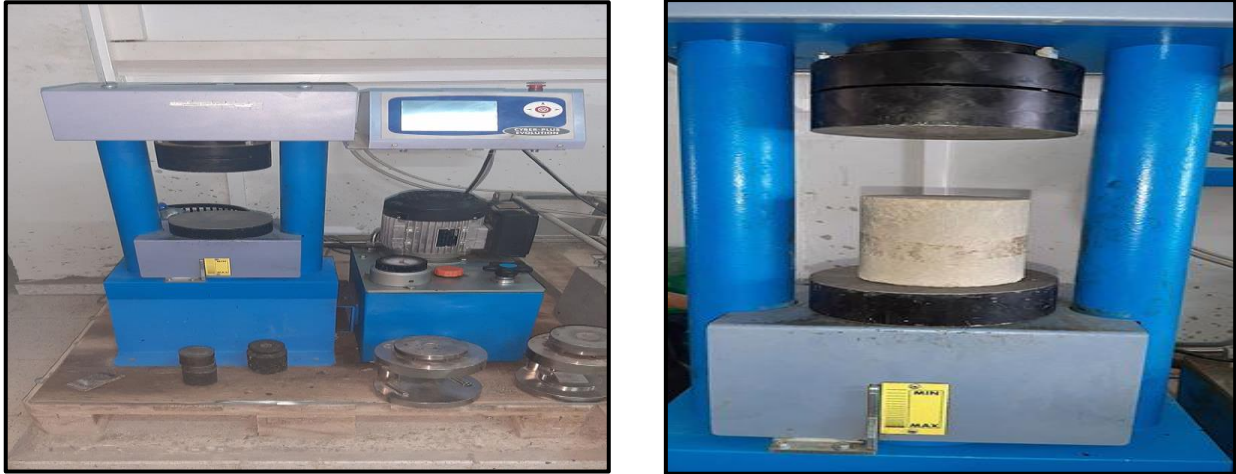


Éprouvettes pour l'essai de cycle séchage-humidification

**Figure II. 3 : 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.4 est une presse hydraulique qui répond aux critères de la norme NF EN 13286-41.



*Figure II. 4 : Vue d'ensemble du dispositif de mesure de 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 placée 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 :

$$R_c = \frac{F}{A_c} \quad (II. 2)$$

Où :

$R_c$  (N/mm<sup>2</sup> ou MPa) : résistance à la compression simple,

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

$A_c$  (mm<sup>2</sup>) : 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.4.3 Essai de compression diamétrale

L'essai de compression diamétrale (appelé également traction indirecte ou traction Brésilienne) est réalisé selon la norme NF EN 13286-42. Une force de compression est appliquée le long de deux génératrices opposées de l'éprouvette jusqu'à l'apparition de la rupture. Des contraintes de traction sont induites dans la direction diamétrale orthogonale à la charge et sont maximales au centre de l'éprouvette. La résistance à la traction Brésilienne (ou la résistance à la compression diamétrale) est calculée en se basant sur la force à la rupture.

Les éprouvettes de sol naturel ou de sol traité sont placées dans le système extensométrique selon les critères définis dans la norme NF EN 13286-42 comme présentés dans la figure II.5. On place ce système d'étriers dans un plan perpendiculaire à l'axe de la charge au centre du plateau de la presse. On ajuste la hauteur des plateaux de manière à obtenir le contact avec le système. Le principe de l'essai est présenté dans la figure II.5. La force,  $F$  est appliquée ensuite de manière continue et uniforme sans choc (150 N/s), de façon à appliquer une contrainte inférieure à 0,2 MPa par seconde. La force maximale subie par l'éprouvette est enregistrée. La résistance à la traction Brésilienne est calculée ensuite selon l'équation suivante :

$$R_{tb} = \frac{2F_r}{\pi HD} \quad (II. 3)$$

Avec :

$R_{tb}$  : résistance à la traction Brésilienne (N/mm<sup>2</sup> ou MPa),

$F_r$  : force maximale sur l'éprouvette (N),

$H$  : longueur de l'éprouvette (mm),

$D$  : diamètre de l'éprouvette (mm).

L'essai de compression diamétrale est effectué sur trois éprouvettes, donc la résistance à la traction Brésilienne est la moyenne arithmétique des trois valeurs obtenues.

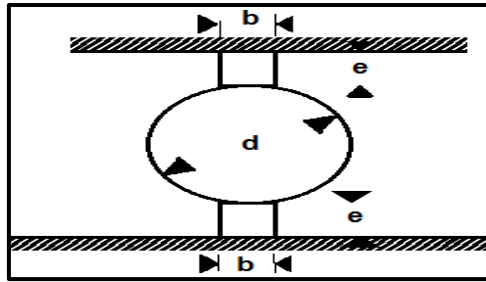


Figure II. 5: Vue d'ensemble de dispositifs de mesure la résistance à la compression diamétrale

## II.5. Essai de cycles de séchage-humidification

Ces méthodes d'essai couvrent les procédures permettant de déterminer les pertes de masse, les changements de teneur en eau et les changements de volume (gonflement et retrait) générés par le séchage et l'humidification répétés d'échantillons de sol-chaux durcis. Les échantillons sont compactés dans un moule, avant l'hydratation de la chaux, à une densité maximale avec une teneur en eau optimale, à l'aide de la procédure de compactage décrite dans la méthode d'essai ASTM D 558. (Maafi. N, 2020)

Ces méthodes d'essai sont utilisées pour déterminer la résistance d'échantillons sol-chaux compactés au cycle séchage-humidification répété. Ces méthodes de test ont été développées pour être utilisées conjointement avec les méthodes de test ASTM D 560 et les critères indiqués dans le manuel « Soil-Cement Laboratory Handbook » de Portland Cement Association, afin de déterminer la quantité minimale de liant (chaux) requise dans le sol pour atteindre un degré de dureté suffisant pour résister aux intempéries. (Maafi. N, 2020)

### II.5.1. Appareil

Un moule métallique cylindrique ayant une capacité de  $(944 \pm 11 \text{ cm}^3)$  avec un diamètre interne de  $101,60 \pm 0,41 \text{ mm}$ , conforme à la figure II.6 pour permettre la préparation d'échantillons compactés de terre mélangée de chaux de cette taille. Le moule doit être muni d'un collet détachable d'une hauteur d'environ 63,5 mm. Le moule peut être du type fendu consistant en deux sections demi-rondes ou en une section de tuyau avec un côté fendu perpendiculairement à la circonférence du tuyau et pouvant être bloqué de manière sûre pour former un cylindre fermé ayant les dimensions décrites ci-dessus. Le moule et le collier doivent être construits de manière à pouvoir être fixés fermement à une base détachable. (Maafi. N, 2020)

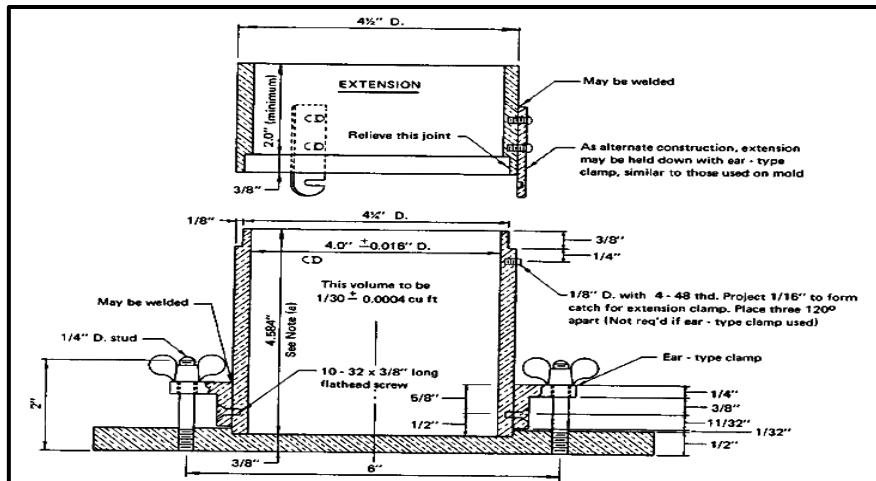


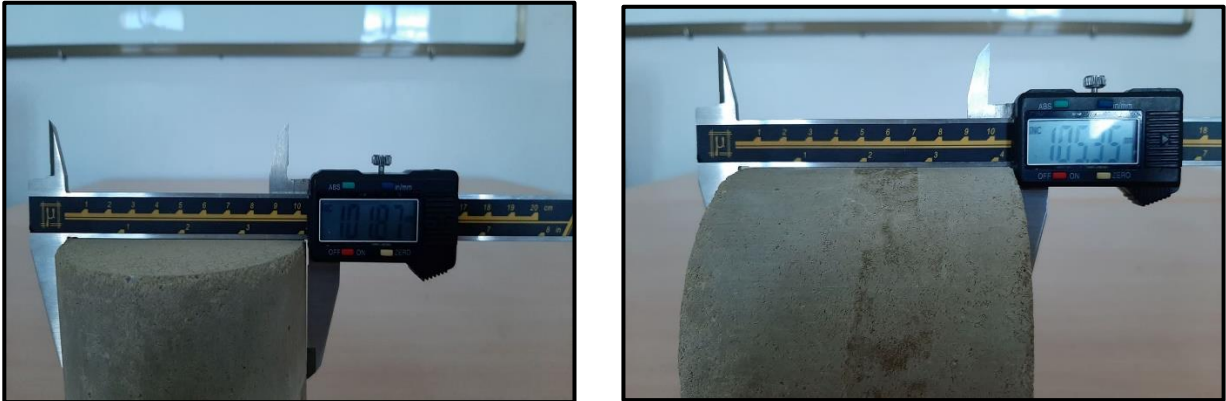
Figure II. 2: Vue d'ensemble de moule pour l'essai de cycle séchage-humidification

### II.5.2. Méthode d'essai : Utilisation de matériel de sol en passant le tamis de 4,75 mm (5mm)

- Préparer une quantité suffisante de sols passant par le tamis 4,75 mm (5mm) pour confectionner deux spécimens compactés.
- Ajoutez au sol la quantité requise de chaux et mélangez soigneusement la chaux avec le sol pour obtenir une couleur uniforme.
- Ajouter suffisamment d'eau pour que le mélange sol-chaux atteigne la teneur optimale en eau au moment du compactage. Lorsque le sol utilisé est un matériau argileux à texture épaisse, compactez le mélange de sols, de (chaux) et d'eau dans le récipient à une profondeur d'environ 50 mm à l'aide du pilon ou d'un bourreur similaire, et laissez reposer pendant au moins 5 minutes, mais pas plus de 10 minutes pour faciliter la dispersion de l'humidité et pour permettre une absorption plus complète du mélange sol-chaux.
- Former un échantillon en compactant immédiatement le mélange de sol et de (chaux) dans le moule (avec le collier attaché), et en plus de scarifier les sommets des deuxièmes couches pour supprimer les plans de compactage lisses avant de placer et de compacter les couches suivantes. Cette scarification doit former des rainures perpendiculaires les unes aux autres, d'une largeur d'environ 3,2 mm, d'une profondeur de 3,2 mm et distantes d'environ 6,4 mm.
- Pendant le compactage, prélevez dans le lot un échantillon représentatif du mélange de sols, pesant au moins 100 g, pesez immédiatement et séchez à l'étuve à  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  pendant au moins 12 h ou à poids constant. Calculer la teneur en eau pour la comparer à la teneur en eau prévue.

- Pesez le spécimen compacté et le moule, retirez-le du moule et calculez le poids à sec de chaque spécimen en  $\text{g/cm}^3$  pour vérifier la densité de calcul.
- Identifiez le spécimen sur une étiquette métallique (ou un autre dispositif approprié) avec un numéro et les autres marques d'identification nécessaires et utilisez-le pour obtenir des données sur les variations d'humidité et de volume pendant l'essai.
- Formez un deuxième échantillon aussi rapidement que possible et déterminez le pourcentage d'humidité et de poids à l'état séché. Identifiez cet échantillon avec un numéro, ainsi que les autres marques d'identification nécessaires, et utilisez-le pour obtenir des données sur les pertes sol-chaux-ciment au cours de l'essai.
- Déterminez le diamètre et la hauteur moyens du spécimen et calculez son volume.
- Placez les échantillons sur des supports appropriés dans la chambre humide et protégez-les de l'eau libre pendant une période de 7,28 et 180 jours.
- Pesez et mesurez l'échantillon à la fin de la période de stockage de 7,28 et 180 jours pour fournir des données permettant de calculer sa teneur en eau et son volume.
- À la fin du stockage dans la chambre humide, immergez les échantillons dans de l'eau potable à la température ambiante pendant 5 heures et retirez-les. Pesez et mesurez l'échantillon (échantillon de changement de volume et d'humidité).
- Placer les deux échantillons dans un four à  $71^\circ\text{C}$  ( $160^\circ\text{F}$ ) pendant 42 h et les retirer. Pesez et mesurez les spécimens.
- Les procédures constituent un cycle (48 h) de séchage-humidification. Encore une fois, immerger les échantillons dans l'eau et poursuivre la procédure pendant 12 cycles.
- Calculez les variations de volume et de la teneur en eau et les pertes sol-chaux-ciment des échantillons de la manière suivante :
- Calculez la différence entre le volume de l'éprouvette au moment du moulage et les volumes suivants après les cycles en pourcentage du volume initial.
- Calculer la teneur en eau de l'échantillon au moment du moulage et les teneurs en eau suivantes après les cycles en pourcentage du poids initial de l'échantillon, à l'état sec.

Calculer la perte de masse de l'échantillon au moment du moulage et les pertes de masse suivantes après les cycles en pourcentage du poids initial de l'échantillon, à l'état sec. (Maafi. N, 2020)



*Figure II. 3: Calcule le volume de l'éprouvette dans l'essai de cycle séchage-humidification*



---

# **CARACTERISATION DES MATERIAUX**

---

#### III.1. Introduction

Dans le cadre du présent travail, des sols fins limono-argileux et sol sableux gravier avec fine couramment rencontrés sur des chantiers de terrassement (A1, A2, A3 et B5 selon la Norme française NF P 11-300) ont été utilisés. Le premier sol est un sol limoneux de découverte du gisement de la région de la commune de Khelil Wilaya de Bordj Bou Arreridj (ci-après dénommer A1). Le deuxième sol est une argile limoneuse du gisement de la région de la commune de Belimour wilaya de Bordj Bou Arreridj (ci-après, dénommer A2). Le troisième sol est une argile plastique de la région de la commune de Sidi Aissa Wilaya de M'Sila (ci-après dénommé A3), et le dernier sol est un sol sable-gravier avec des fines également de la découverte de gisement de la région de la commune de Belimour wilaya de Bordj Bou Arreridj sol (ci-après dénommé B5). Ces lots de sols sont transportés 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. (Maafi. N, 2020)

#### III.2. Caractérisation des sols non traités

##### III.2.1. Étude aux diffractogrammes des sols non traités

Les diffractogrammes de rayons X de quatre sols non traités sont présentés dans les figures III.1, 2, 3 et 4. 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.
- Le sol de Belimour (A2) contient de l'illite, de la kaolinite, du chlorite, du quartz, de la montmorillonite.
- Le sol de Sidi Aissa (A3) comprend de l'illite, de la kaolinite, du chlorite, de la montmorillonite, du quartz.
- Le dernier sol (B5) contient du chlorite, quartz et de la kaolinite. (Maafi. N, 2020)

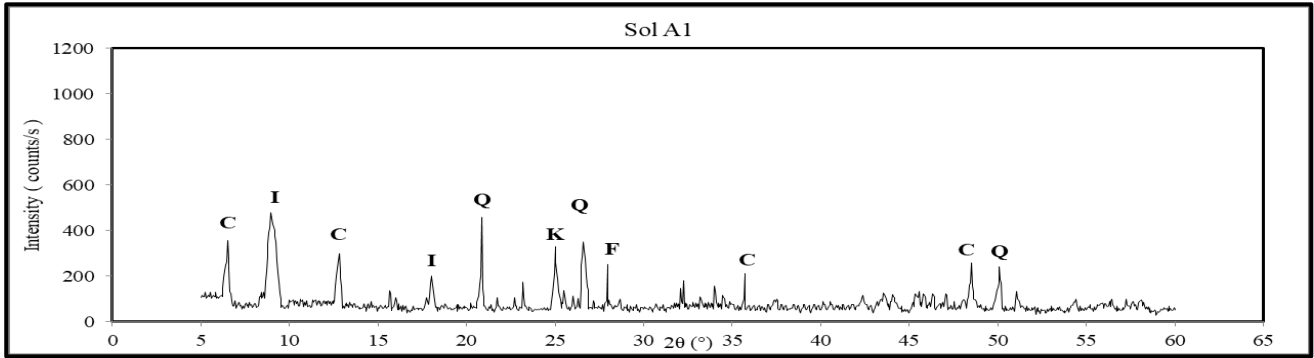


Figure III. 1: Diffractogramme de rayons X du sol A1 (Maafi. N, 2020)

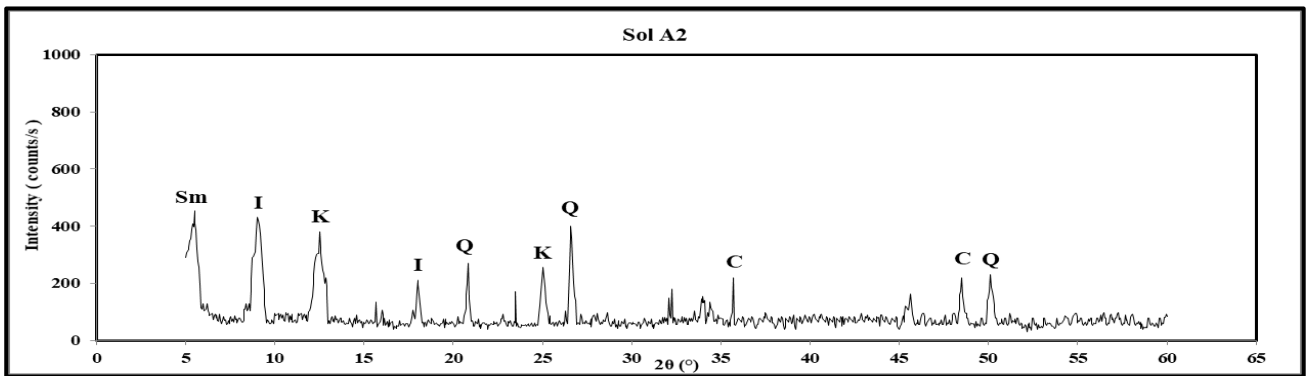


Figure III. 2: Diffractogramme de rayons X du sol A2 (Maafi. N, 2020)

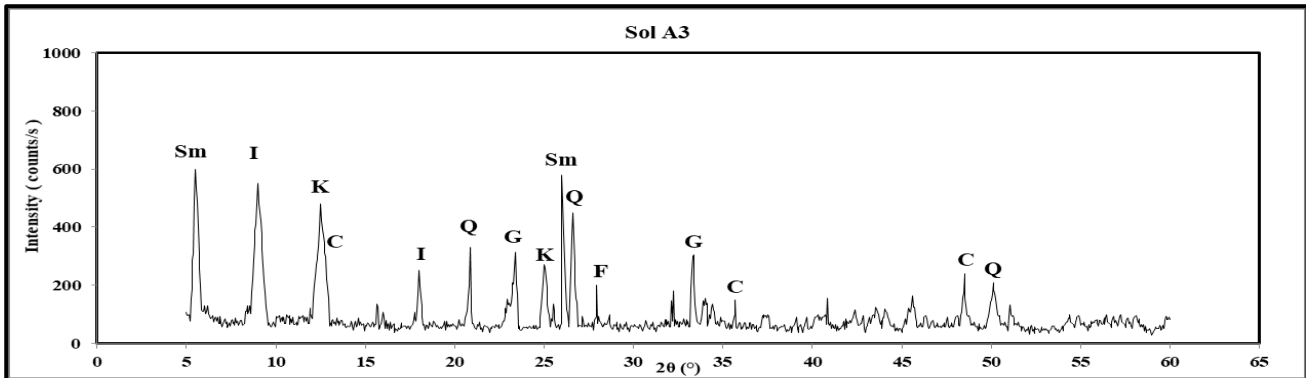


Figure III. 3: Diffractogramme de rayons X du sol A3 (Maafi. N, 2020)

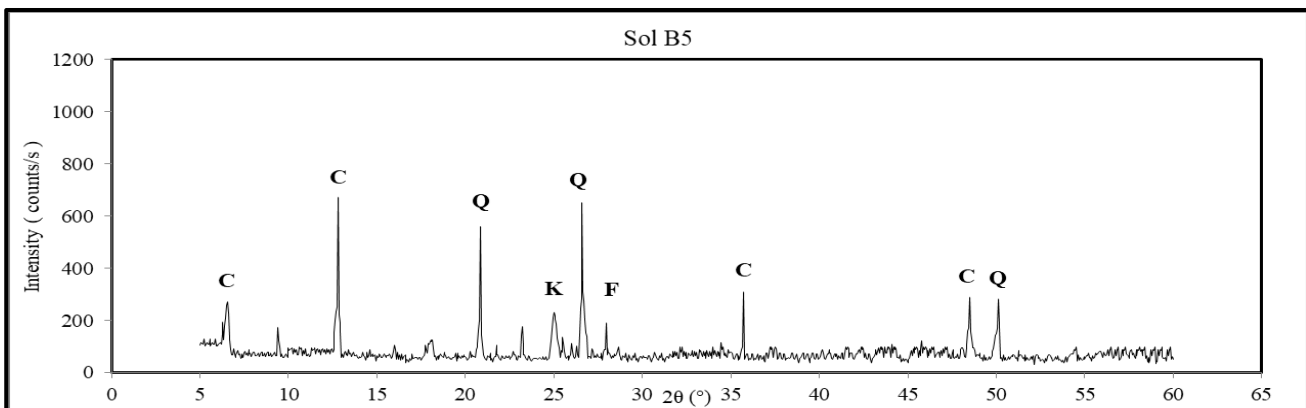


Figure III. 4: Diffractogramme de rayons X du sol B5 (Maafi. N, 2020)

III.2.2. Détermination de la nature du sol

Les courbes granulométriques des sols sont présentées sur la figure III.5. Les tamisats à 80 µm des trois sols (A1, A2 et A3) sont supérieurs à 30% par contre le tamisât à 80 µm du sol B5 est inférieur de 30%. Les diamètres maximaux des grains de sol Dmax sont inférieurs à 50 mm. Selon la Norme NF P 11-300, les sols (A1, A2 et A3) sont classifiés comme sols fins « type A » et le sol B5 est classé de « type B ». (Maafi. N, 2020)

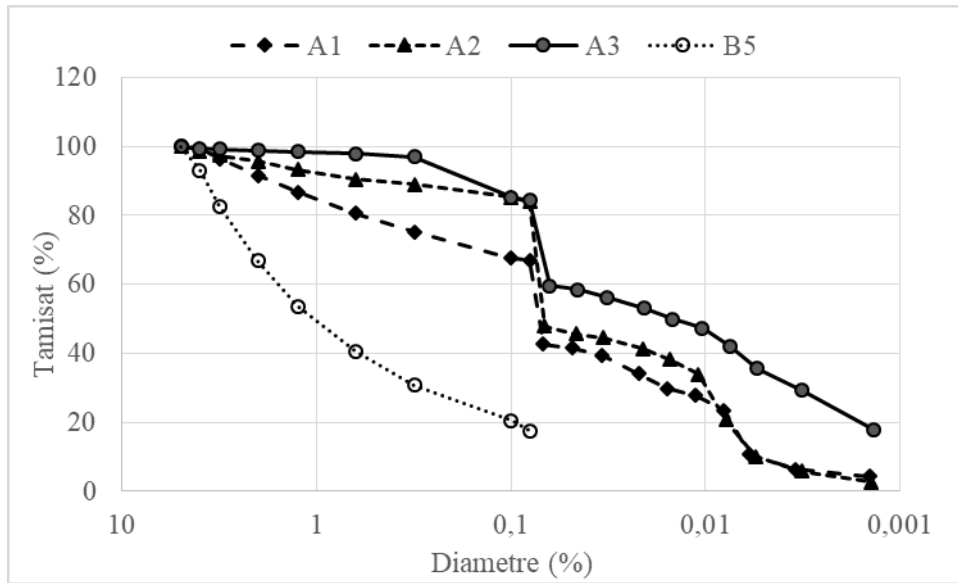


Figure III. 5: Analyse granulométrique des sols non traités (Maafi. N, 2020)

Dans le Tableau III.1 sont regroupés les résultats des essais des tamisât 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 (Maafi. N, 2020):

Tableau III. 1: Valeur de bleu de méthylène et des limites d’Atterberg des sols. (Maafi. N, 2020)

Type de Sol	Tamisât à 2 mm (%)	Tamisât à 0.08 mm (%)	VBS (cm <sup>3</sup> /g)	Limites d’Atterberg		
				WL(%)	WP(%)	IP
A1	91,533	67,100	1,568	41,525	29,307	12,218
A2	95,766	84,000	1,600	36,142	21,936	14,206
A3	98,900	84,334	6,185	60,893	29,5	31,393
B5	66,800	17,600	0,582	32,2	12,126	20,174

La classification des sols se base sur la Norme NF P 11-300. Pour le sol A1, la valeur de bleu de méthylène du sol est 1,568 (< 2,5) et la valeur de IP est 12,218 (> 12), ainsi, on peut le classer dans la catégorie « limon peu plastique ». Le sol A2 avec un VBS de 1,600 (< 2,5) et un IP égal 14,206 (12 < IP ≤ 25). Il est donc classé comme « argile limoneuse peu plastique ». Quant au sol A3,

VBS = 6,185 (> 6), IP = 31.393 (> 25); il est défini comme « argile très plastique ». Le sol B5 a une VBS de 0,582 ( $VBS \leq 1,5$ ) et un IP = 20,174 ( $12 < IP \leq 25$ ), il est donc classé comme « sol sableux graveleux avec fins ». (Maafi. N, 2020)

**III.2.3. Composition chimique des sols**

Le tableau III.2 présente les compositions chimiques des sols non traités qui sont déterminées par fluorescence X. Cette analyse a été faite au sien de laboratoire d’analyse chimique de cimenterie du Groupe GICA d’Ain El-Touta (BATNA) selon la norme NF EN 1744-1/IN1 (P18-660-1/IN1).

*Tableau III. 2: Composition chimique des sols. (Maafi. N, 2020)*

Constituent (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl
A1	31,43	4,19	1,22	32,5	1,89	0,36	0,40	0,04	0,01
A2	15,48	4,44	2,18	42,40	1,6	0,35	0,84	0,07	0,02
A3	50,01	15,81	6,76	8,39	2,42	1,57	0,5	3,31	0,03
B5	27,56	10,70	4,57	31,41	1,62	0,99	0,65	0,3	0,01

**III.3. Chaux vive**

La chaux utilisée pour le traitement des sols est la chaux vive (CaO) fournie par la société ERCO de la wilaya de SAÏDA. Les tableaux III.3, III.4 présentes les caractéristiques physiques et chimiques de la chaux utilisée. (Maafi. N, 2020)

*Tableau III. 3: Propriétés chimiques de la chaux. (Maafi. N, 2020)*

Constituent (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
Chaux vive	1,35	3,27	0,87	82,77	1,83	0,151	0,064	0,11

*Tableau III. 4: Propriétés physiques de la chaux. (Maafi. N, 2020)*

Caractéristique	
Masse volumique apparente	731g/l
Masse volumique absolue	3,315 g/cm <sup>3</sup>
Coefficient absorption	<5%
Sensitivité au gel	<30%
Volume d'extinction	2,73 cm <sup>3</sup>
Tamisât à 630 µm	0%
Tamisât à 90 µm	<10%

III.4. Point de fixation de la chaux « PFC »

Le PFC représente le point de fixation de la chaux ; il correspond au point de transition du sol traité d'un état d'amélioration à un état de stabilisation. Lorsque la teneur en chaux est supérieure à cette valeur, la chaux est adsorbée par les minéraux argileux et devient disponible pour les réactions pouzzolaniques. Le PFC est déterminé par le test de pH sur le mélange sol-chaux immédiatement après le malaxage, comme décrit dans la norme ASTM D6276 - 99A. Cette méthode indique que le PFC est la teneur minimale en chaux pour que le mélange sol-chaux atteigne un pH égal à 12,4. À partir de cette valeur, une quantité supplémentaire de chaux est supposée être disponible pour le développement des réactions pouzzolaniques. Dans la présente étude, les doses de chaux sélectionnées correspondent à trois objectifs :

- i) Amélioration du sol uniquement,
- ii) Stabilisation et insensibilité à l'eau ;
- iii) Stabilisation et résistance aux cycles de séchage-humidification à long terme.

La figure III.6 montre les valeurs de PFC pour les différents sols. Elles sont égales à 1%, 1,5%, 3,7% et 1,2 % du sol sec respectivement pour les sols A1, A2, A3 et B5. Les dosages en chaux de 2%, 4%, 6% et 8% sont choisis pour les sols A1, A2, A3 et B5. (Maafi. N, 2020)

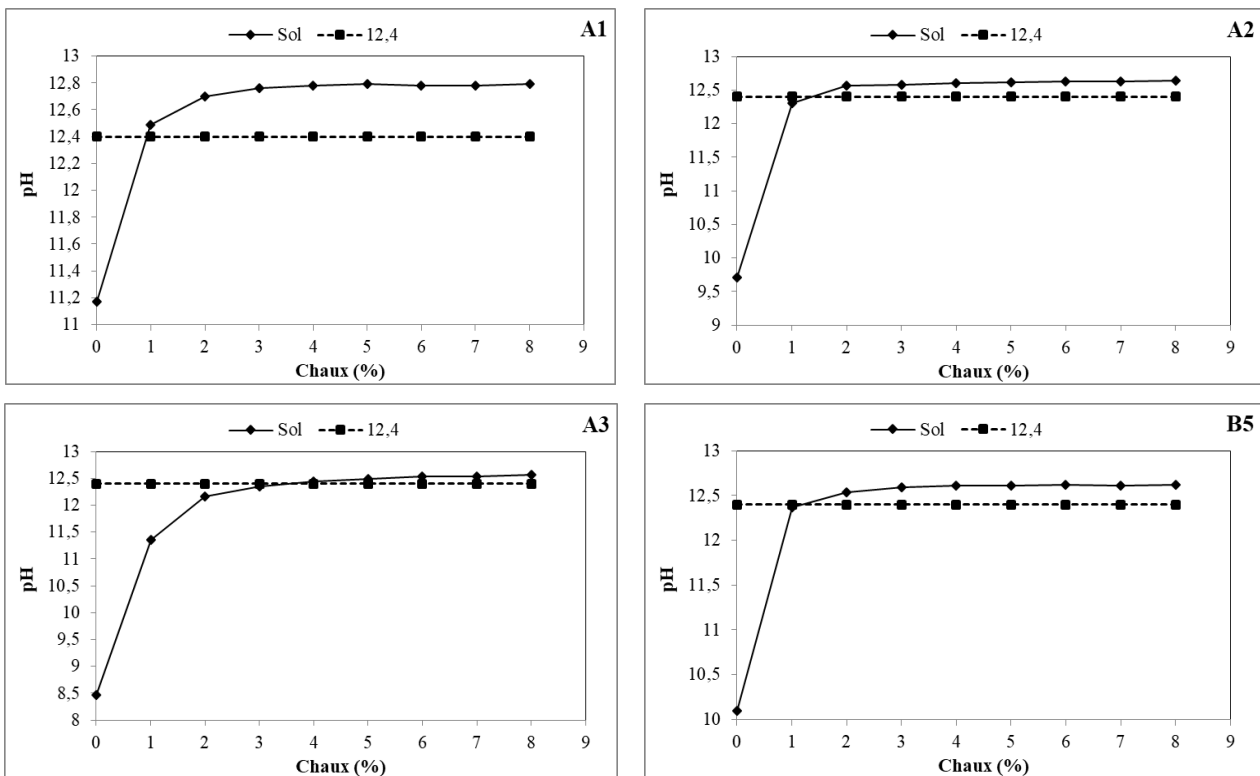


Figure III. 6: Détermination du point de fixation de la chaux

**III.5. Références de compactage**

La détermination des valeurs de la teneur en eau optimale ( $w_{OPN}$ ) et de la masse volumique sèche correspondante ( $\rho_{dOPN}$ ) sont obtenues à partir des courbes de compactage « Proctor Normal ». La mesure de l’IPI (Indice de Portance Immédiat) et l’indice *CBR* (California Bearing Ratio) après 4 jours d’immersion ( $CBR_{4j\ immersion}$ ) sont réalisés pour l’échantillon compacté à l’optimum.

Le GTS propose des critères concernant l’indice Portant Immédiat et l’indice *CBR* 4 jours immersion pour la réalisation des remblais, construction des couches de forme et l’insensibilité à l’eau :

$$CBR_{4j\ immersion} \geq 20 \tag{III.1}$$

$$\frac{CBR_{4j\ immersion}}{IPI} \geq 1 \tag{III.2}$$

Pour le sol A1 ( $10 < IPI < 20$ ), le sol A2 ( $7 < IPI < 15$ ), le sol A3 ( $5 < IPI < 10$  pour le sol B5, le GTS ne prend pas en compte ce genre de sol.

**III.5.1. Sol A1**

Le tableau III.5 récapitule les références optimums Proctor Normal, les valeurs *IPI* et les valeurs de  $CBR_{4j\ immersion}$  pour le sol A1 non traité et traité à l’optimum «  $w_{OPN}$  ».

**Tableau III. 5: Références de compactage du sol A1 non traité et traité . (Maafi. N, 2020)**

Dosage en Chaux	$\rho_{d\ OPN}$ (KN/m <sup>3</sup> )	$w_{OPN}$ (%)	<i>IPI</i> à $w_{OPN}$	$CBR_{4j\ immersion}$ à $w_{OPN}$	$\frac{CBR_{4j\ immersion}}{IPI}$
0%	15,88	22,3	13,27	11,91	0,90
2%	14,9	24,2	17,41	15,90	0,92
4%	14,72	25,8	22,49	26,16	1,16
6%	14,64	26,9	26,86	32,36	1,20
8%	14,39	26,7	30,59	35,49	1,16

Les valeurs de la teneur en eau optimale ( $w_{OPN}$ ) et de la masse volumique sèche correspondante ( $\rho_{d\ OPN}$ ) sont déterminés par des courbes de compactage Proctor Normal. Il est clair que ces paramètres sont fortement influencés par la teneur en chaux dans tous les sols étudiés :  $w_{OPN} = 22,3\%$  et  $\rho_{d\ OPN} = 15,88\text{ KN/m}^3$  pour le sol A1 avec 0%,  $w_{OPN} = 26,7\%$  et  $\rho_{d\ OPN} = 14,39\text{ KN/m}^3$  pour le sol A1 avec 8% de chaux. Ces points correspondent aux pics des courbes de compactage. La teneur en eau optimale a augmenté de 17%, lorsque la teneur en chaux est passée

### III. Caractérisation des matériaux

de 0 à 8% de chaux en raison de la réaction exothermique entre la chaux et l'eau, qui nécessite une quantité supplémentaire d'eau pour obtenir une compacité satisfaisante à l'état humide.

En conséquence, l'ouvrabilité du sol traité devient plus facile par rapport au sol non traité. Cependant, la densité sèche maximale du sol traité montre le comportement opposé. Ils montrent une relation inversement proportionnelle à la teneur en chaux, elle a diminué de 10%, lorsque la teneur en chaux est passée de 0 à 8%. Après traitement, la courbe de compactage des sols étudiés devient plus aplatie et se déplace vers des niveaux d'humidité croissants par rapport au sol naturel. La compacité maximale devient moindre, ce qui entraîne une réduction de la densité sèche maximale par rapport aux sols non traités présentant une teneur en humidité optimale plus élevée (Little., 1987 ; Ormsby, 1973 ; Brandl., 1981 ; Osula., 1996). Cela explique la diminution de la densité sèche maximale par la réorganisation des particules d'argile provoquée par le phénomène de floculation / agrégation (Mtallib et Bankole, 2011). (Maafi. N, 2020)

Pour dosage en chaux le plus faible (2%), la valeur  $IPI = 13,27$  satisfait au premier critère de la réalisation du remblai, et ne satisfait pas au critère de l'insensibilité à l'eau avec une valeur du rapport  $CBR_{4j\ immersion}/IPI$  égale à 0,90 ( $< 1$ ) insuffisante. Pour un dosage en chaux supérieur 4%, le sol traité satisfait au critère de la réalisation des remblais, construction des couches de forme et l'insensibilité à l'eau ( $10 < IPI < 20$ ), avec  $IPI = 30,59$  et le rapport  $CBR_{4j\ immersion}/IPI$  égale à 1,16 supérieure à 1 pour le sol traité avec 8% chaux. (Maafi. N, 2020)

#### III.5.2. Sol A2

Le Tableau III.6 récapitule les références optimums Proctor Normal, les valeurs  $IPI$  et les valeurs de  $CBR_{4j\ immersion}$  pour le sol A2 non traité et traité à  $\omega_{OPN}$ .

**Tableau III. 6: Références de compactage du sol A2 non traité et traité. (Maafi. N, 2020)**

Dosage en Chaux	$\rho_{dOPN}$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\omega_{OPN}$ (%)	$IPI$ à $\omega_{OPN}$	$CBR_{4j\ immersion}$ à $\omega_{OPN}$	$\frac{CBR_{4j\ immersion}}{IPI}$
0%	16,85	17,8	5,17	4,31	0,83
2%	15,69	21,6	8,87	10,65	1,20
4%	15,36	24,9	12,43	14,19	1,14
6%	15,18	23,6	15,90	17,35	1,09
8%	15,04	26,7	21,53	24,39	1,13

Les valeurs de la teneur en eau optimale ( $\omega_{OPN}$ ) et de la masse volumique sèche ( $\rho_{dOPN}$ ) sont déterminés par des courbes de compactage Proctor Normal :  $\omega_{OPN} = 17,8\%$  et  $\rho_{dOPN} = 16,85\text{KN/m}^3$  pour le sol A2 avec 0%,  $\omega_{OPN} = 26,7\%$  et  $\rho_{dOPN} = 15,04\text{KN/m}^3$  pour le sol A1 avec 8% de chaux.



La teneur en eau optimale a augmenté de 34%, lorsque la teneur en chaux est passée de 0 à 8% de chaux. Cependant, la densité sèche maximale du sol traité montre le comportement opposé.

Ils montrent une relation inversement proportionnelle à la teneur en chaux, elle a diminué de 11%, lorsque la teneur en chaux est passée de 0 à 8% de chaux.

Pour le dosage en chaux le plus faible (2%), la valeur  $IPI = 5,17$  ne satisfait pas au critère de la réalisation des remblais, construction des couches de forme et l'insensibilité à l'eau avec une valeur du rapport  $CBR_{4j\ immersion}/IPI$  égale à 0,83 ( $< 1$ ) insuffisante. Pour un dosage en chaux supérieur à 2%, le sol traité satisfait au critère de la réalisation des remblais, construction des couches de forme et l'insensibilité à l'eau ( $7 < IPI < 15$ ), avec  $IPI = 21,53$  et le rapport  $CBR_{4j\ immersion}/IPI$  égale à 1.13 supérieure à 1 pour le sol traité avec 8% chaux. (Maafi. N, 2020)

#### III.5.3. Sol A3

Le tableau III.7 récapitule les références optimums Proctor Normal, les valeurs  $IPI$  et les valeurs de  $CBR_{4j\ immersion}$  pour le sol A3 non traité et traité à  $w_{OPN}$ .

Les valeurs de la teneur en eau optimale ( $\omega_{OPN}$ ) et de la masse volumique sèche ( $\rho_{dOPN}$ ) sont déterminés par des courbes de compactage Proctor Normal :  $\omega_{OPN} = 22,8\%$  et  $\rho_{dOPN} = 15,16\text{KN/m}^3$  pour le sol A3 avec 0%,  $\omega_{OPN} = 31,1\%$  et  $\rho_{dOPN} = 13,46\text{KN/m}^3$  pour le sol A1 avec 8% de chaux. La teneur en eau optimale a augmenté de 27%, lorsque la teneur en chaux est passée de 0 à 8% de chaux. Cependant, la densité sèche maximale du sol traité montre le comportement opposé. Ils montrent une relation inversement proportionnelle à la teneur en chaux, elle a diminué de 12%, lorsque la teneur en chaux est passée de 0 à 8% de chaux. (Maafi. N, 2020)

**Tableau III. 7: Références de compactage du sol A3 non traité et traité. (Maafi. N, 2020)**

Dosage en Chaux	$\rho_{dOPN}$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\omega_{OPN}$ (%)	$IPI$ à $\omega_{OPN}$	$CBR_{4j\ immersion}$ à $\omega_{OPN}$	$\frac{CBR_{4j\ immersion}}{IPI}$
0%	15,16	22,8	0,92	0,56	0,61
2%	14,8	23,1	1,47	1,15	0,78
4%	14,43	25,4	2,87	2,25	0,78
6%	14,07	27,2	9,37	10,19	1,09
8%	13,46	31,1	12,74	14,94	1,17

### III. Caractérisation des matériaux

Pourtant, avec un dosage en chaux élevé (4%), la valeur  $IPI = 2,87$  ne satisfait pas au critère de la réalisation des remblais, construction des couches de forme et l'insensibilité à l'eau avec une valeur du rapport  $CBR_{4j\ immersion}/IPI$  égale à 0,61 ( $< 1$ ) insuffisante. Au dosage en chaux supérieur 4%, le sol traité satisfait au critère de la réalisation des remblais, construction des couches de forme et l'insensibilité à l'eau ( $5 < IPI < 10$ ), avec  $IPI = 9,37$  et le rapport  $CBR_{4j\ immersion}/IPI$  égale à 1,09 supérieur à 1 pour le sol traité avec 8% chaux. (Maafi. N, 2020)

#### III.4.4. Sol B5

La figure III.10 présente les courbes de compactage à l'énergie Proctor Normal à différents dosages en chaux. Le Tableau III.8 récapitule les références optimums Proctor Normal, les valeurs  $IPI$  et les valeurs de  $CBR_{4j\ immersion}$  pour le sol B5 non traité et traité à  $w_{OPN}$ .

**Tableau III. 8: Références de compactage du sol B5 non traité et traité. (Maafi. N, 2020)**

Dosage en Chaux	$\rho_{dOPN}$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\omega_{OPN}$ (%)	$IPI$ à $\omega_{OPN}$	$CBR_{4j\ immersion}$ à $\omega_{OPN}$	$\frac{CBR_{4j\ immersion}}{IPI}$
0%	21,22	9,2	1,92	1,12	0,58
2%	20,09	10,9	7,90	5,93	0,75
4%	19,38	11,6	10,69	11,40	1,07
6%	18,74	13,1	12,32	19,50	1,58
8%	19,03	12,9	14,28	23,98	1,68

Les valeurs de la teneur en eau optimale ( $\omega_{OPN}$ ) et de la masse volumique sèche ( $\rho_{dOPN}$ ) sont déterminés par des courbes de compactage Proctor Normal :  $\omega_{OPN} = 9,2\%$  et  $\rho_{dOPN} = 21,22\text{KN/m}^3$  pour le sol B5 avec 0%,  $\omega_{OPN} = 12,9\%$  et  $\rho_{dOPN} = 19,03\text{KN/m}^3$  pour le sol A1 avec 8% de chaux. La teneur en eau optimale a augmenté de 29%, lorsque la teneur en chaux est passée de 0 à 8% de chaux. Cependant, la densité sèche maximale du sol traité montre le comportement opposé.

Ils montrent une relation inversement proportionnelle à la teneur en chaux, elle a diminué de 10%, lorsque la teneur en chaux est passée de 0 à 8% de chaux.

Pour le dosage en chaux le plus faible (2%), la valeur  $IPI = 5,17$  ne satisfait pas au critère de la réalisation des remblais, construction des couches de forme et l'insensibilité à l'eau avec une valeur du rapport  $CBR_{4j\ immersion}/IPI$  égale à 0,83 ( $< 1$ ) insuffisante. Pour un dosage en chaux supérieur 2%, le sol traité satisfait au critère de la réalisation des remblais, construction des couches de forme et l'insensibilité à l'eau ( $7 < IPI < 15$ ), avec  $IPI = 21,53$  et le rapport  $CBR_{4j\ immersion}/IPI$  égale à 1,13 supérieure à 1 pour le sol traité avec 8% chaux.

---

# **LES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX**

---

### IV.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, on va discuter toutes les propriétés étudiées : la résistance à la compression simple, compression diamétrale, et dans le cycle de séchage-humidification : perte de masse, la résistance à la compression simple et finalisé par des modèles numériques. Les paramètres pris en compte sont : l'influence de l'âge et le taux de la chaux ajoutés sur le comportement des sols.

### IV.2. Évolution de la résistance à la compression simple (UCS)

L'évolution de la résistance à la compression (UCS) des sols A1, A2, A3 et B5 non traités et traités avec différents dosages de chaux pour différentes périodes de cure est présentée dans les figures IV.1, 2, 3 et 4. L'ajout de chaux entraîne une augmentation de (UCS) des sols traités par rapport aux sols non traités, mais dans des proportions différentes en fonction de dosage de la chaux. À court terme (jusqu'à 28 jours), la résistance mécanique du sol traité évolue de manière assez similaire, indépendamment du dosage de chaux et de l'objectif correspondant d'amélioration ou de stabilisation. Ainsi, la résistance à la compression voit sa valeur doubler après 7 jours dans le cas du sol A1 (0,478 à 0,734 MPa), multipliée par 4 dans le cas du sol A2 (0,28 à 1,06 MPa), multipliée par 6 dans le cas de A3 (0,37 à 1,182 MPa) et multiplié par 4 dans le cas du sol B5 (0,161 à 0,491 MPa).

À long terme, la résistance à la compression (UCS) du sol traité aux dosages les plus faibles (en dessous du PFC) change légèrement pour le sol A1 traité avec 2% de CaO ou reste stable pour le sol A2 traité avec 2% de CaO, pour le sol A3 traité à 4% de CaO et enfin pour le sol B5 traité à 2%. Pour un dosage plus élevé (supérieur à PFC), la résistance à la compression (UCS) évoluée positivement et se démarque progressivement en fonction du dosage et du temps. (Maafi. N, 2020)

À long terme le sol A1 et B5 apparaît moins réactif avec la chaux comparativement avec le sol A2. Après 90 et 180 jours de cure, la valeur de (UCS) du sol A1 traité avec 8% de chaux est multipliée respectivement par 5 et 7 pour atteindre la valeur de 1,200 et 1,549 MPa. Dans le cas du sol A2, la résistance à la compression du sol traité à 8% de CaO est multipliée par 10 et 14 après une cure de 90 à 180 jours, respectivement, pour atteindre une valeur absolue de 1,778 et 2,322 MPa. Le meilleur résultat est obtenu dans le sol argileux A3 traité à 8% de chaux, dont la valeur (UCS) est multipliée respectivement par 20 et 23, pour atteindre les valeurs de 2,482 et 2,889 MPa. Le sol B5 traité avec 8% de chaux voit sa valeur de (UCS) multipliée par 7 et 10, pour atteindre une valeur de 0,908 et 1,101 MPa respectivement. Ce comportement est corroboré par plusieurs auteurs (Kolias et al. 2005 ; Yi et al. 2006; Thi Thanh Hang Nguyen, 2015). L'augmentation de la résistance à la compression après 28 jours est justifiée par la réaction Pouzzolanique entre la chaux et les minéraux du sol au cours de cette période (Necmi et al. 2007 ; Liu, MD et al. 2012). Cette augmentation de la résistance

se traduit par l'hydrate de silicate de calcium, l'hydrate d'aluminate de calcium et l'hydrate d'aluminosilicate de calcium (CSH, CAH et CSAH) respectivement (Aldood. À 2014 ; Al-Taie. A et al. 2016, 2018).

En considérant le critère de la circulation sur la Couche de Forme traitée selon le GTS, on voit que ce critère ( $UCS \geq 1$  MPa) est presque vérifié à l'issue de 180 jours pour les sols A1 traité à (2, 4, 6 et 8% CaO) ( $UCS=1,023, 1,099, 1,166$  et  $1,549$  MPa). Pour le sol A3 traité à (4, 6 et 8% CaO) ( $UCS=1,58, 1,728$  et  $2,323$  MPa), ainsi que le sol A3 traité à (6 et 8% CaO) ( $UCS=1,412$  et  $2,889$  MPa). Pour le sol B5, le critère de circulation après le traitement à 8% de chaux est de ( $UCS=1,101$  MPa).

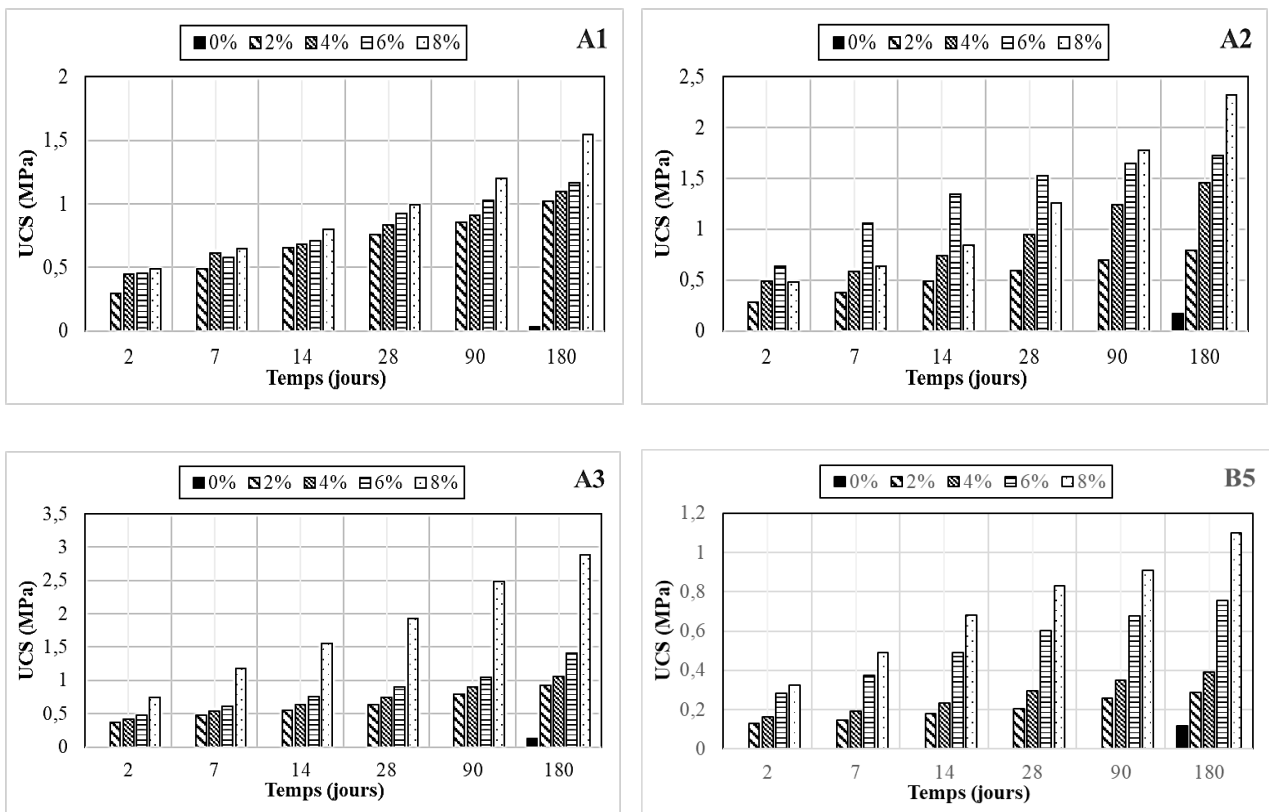


Figure IV. 1: Évolution de la résistance à la compression simple du sol (A1-A2-A3 et B5) non traité et traité à différents dosages en chaux

### IV.3. Évolution de la résistance à la traction Brésilienne ( $R_{tb}$ )

La figure IV.2 présente la résistance à la traction brésilienne ( $R_{tb}$ ) des sols traités et non traités. Les valeurs de ( $R_{tb}$ ) des sols traités montrent des tendances similaires à celles de la résistance à la compression (UCS). Une évolution positive du sol traité est observée. À 28 jours, les valeurs sont multipliées par (4, 6, 5 et 3) pour A1, A2, A3 et B5, respectivement entre 0 et 8% de chaux.

## IV. Les résultats expérimentaux

Après 90 et 180 jours de cure, la valeur de ( $R_{tb}$ ) du sol A1 traité avec 8% de chaux est multipliée respectivement par 5 et 6 pour atteindre la valeur de 0,1589 et 0,1847 MPa. Dans le cas du sol A2, la résistance à la traction brésilienne du sol traité à 8% de CaO est multipliée par 7 et 9 après une cure de 90 à 180 jours, respectivement, pour atteindre une valeur absolue de 0,2226 et 0,2906 MPa. Le meilleur résultat est obtenu dans le sol argileux A3 traité à 8% de chaux, dont la valeur ( $R_{tb}$ ) est multipliée respectivement par 4 et 5, pour atteindre les valeurs de 0,4746 et 0,4867 MPa. Le sol B5 traité avec 8% de chaux voit sa valeur de ( $R_{tb}$ ) multipliée par 4 et 5, pour atteindre une valeur de 0,1139 et 0,1226 MPa respectivement. (Maafi. N, 2020)

Avec des dosages de chaux inférieures au point de fixation (1, 1,5, 4 et 2%) pour les sols A1, A2, A3 et B5, respectivement (PFC, objectif d'amélioration du sol), montrent un léger développement. Dans le cas des dosages en chaux supérieurs à la PFC (objectifs de stabilisation), la résistance à la traction brésilienne des sols traités évolue avec le temps, et concomitamment au dosage de la chaux et au temps de cure. (Maafi. N, 2020)

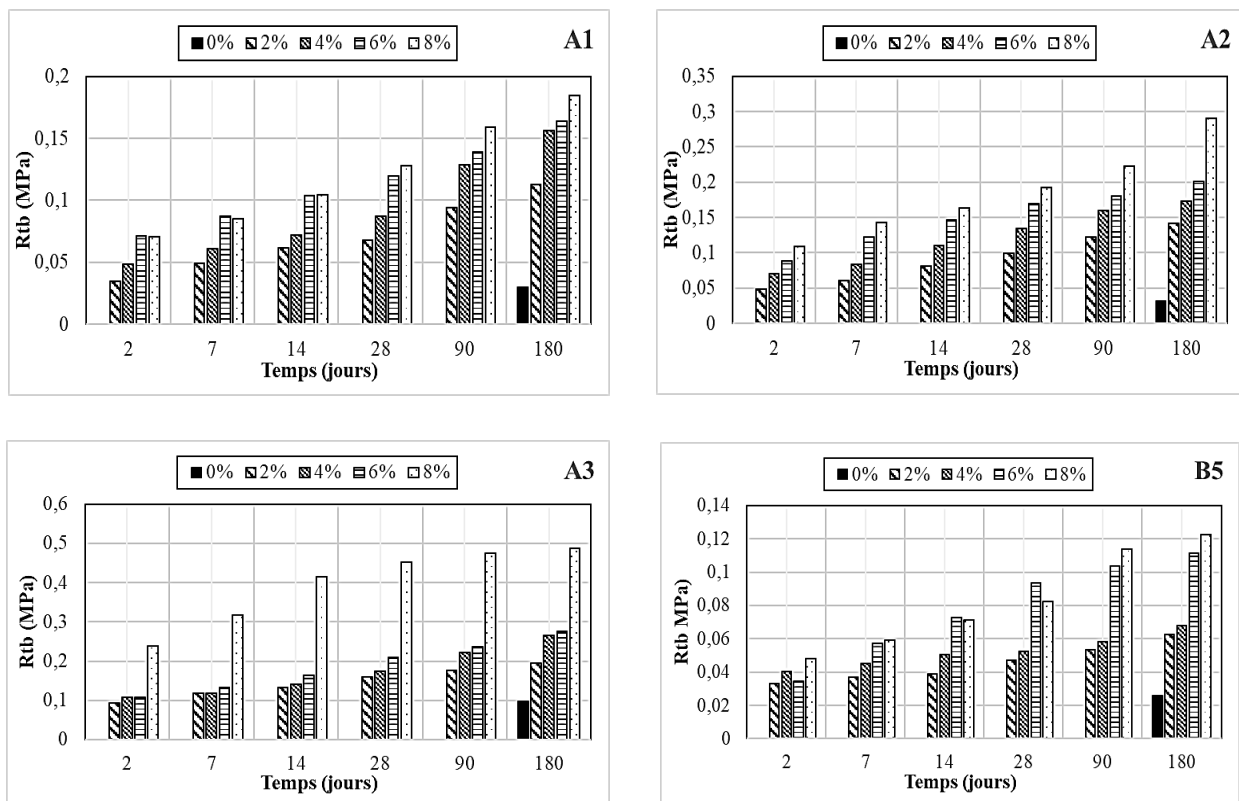


Figure IV. 2 : Évolution de la résistance à la traction Brésilienne du sol (A1-A2-A3 et B5) non traité et traité à différents dosages en chaux

### IV.4. Cycle séchage-humidification

La figure IV. 3 présente la variation de la perte de masse du sol A1, A2, A3 et B5 traité et non-traité à différentes périodes de cure 28 et 180 jours soumis à des cycles de séchage-humidification.

## IV. Les résultats expérimentaux

L'augmentation du nombre de sollicitations séchage-humidification affecte de manière significative la perte de masse des sols traités et non traités.

Après 28 et 180 jours de cure ; on a remarqué une réduction de masse pour les sols traités et non traités. Une légère amélioration pour le sol A1 avec 2% de chaux, qui a résisté aux 12 cycles. Après 28 jours de traitement pour le sol A1 traité avec 2 et 8% de chaux respectivement, l'échantillon a perdu près de (62 et 37%) de la masse pour les sols A1 traités avec 2 et 8% de chaux respectivement (43,78 et 8,43%), et une perte près de (62 et 37%) de la masse pour les sols A1 traités avec 2 et 8% de chaux respectivement après 180 jours.

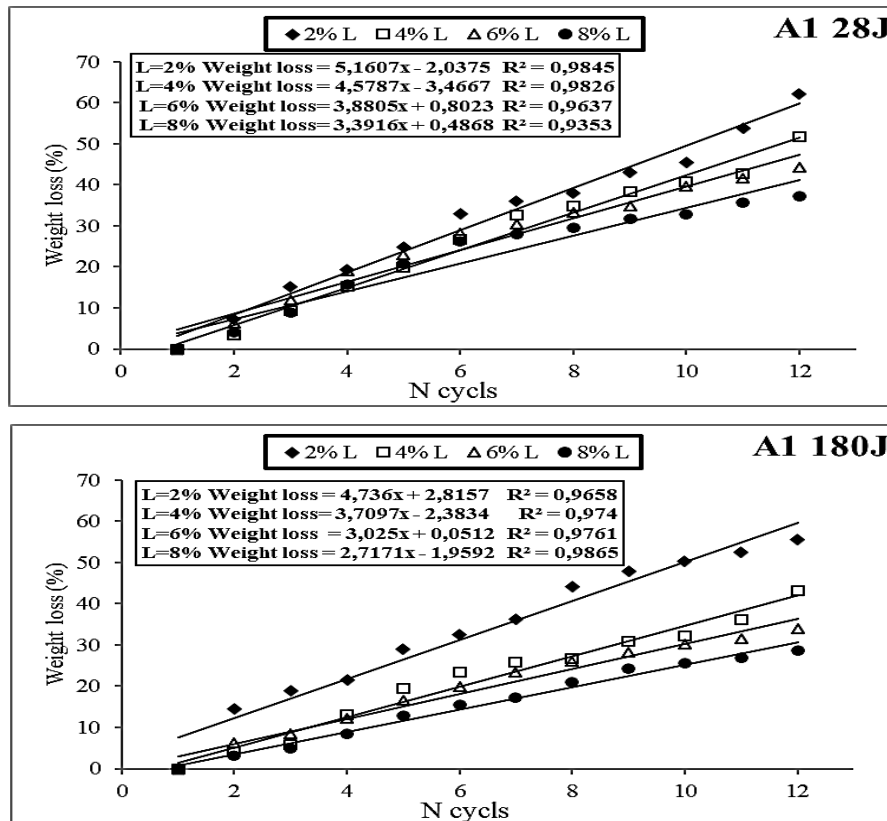


Figure IV. 3 : Évolution de la perte de masse du sol A1 soumis au cycle séchage-humidification

La de la perte de masse du sol A2 traité et non-traité à différentes périodes de cure 28 et 180 jours soumis à des cycles de séchage-humidification sont présenté dans la figure IV.4.

Après 28 et 180 jours de cure ; une réduction de la masse pour les sols traités et non traités ont été remarquées.

Après 28 jours de traitement pour le sol A2 traité avec 2 et 8% de chaux, les échantillons ont perdu près de (61 et 29%) de la masse après 28jours, une perte près de (54 et 27%) de la masse pour les sols A2 traités avec 2 et 8% de chaux respectivement après 180 jours a aussi été remarqué.

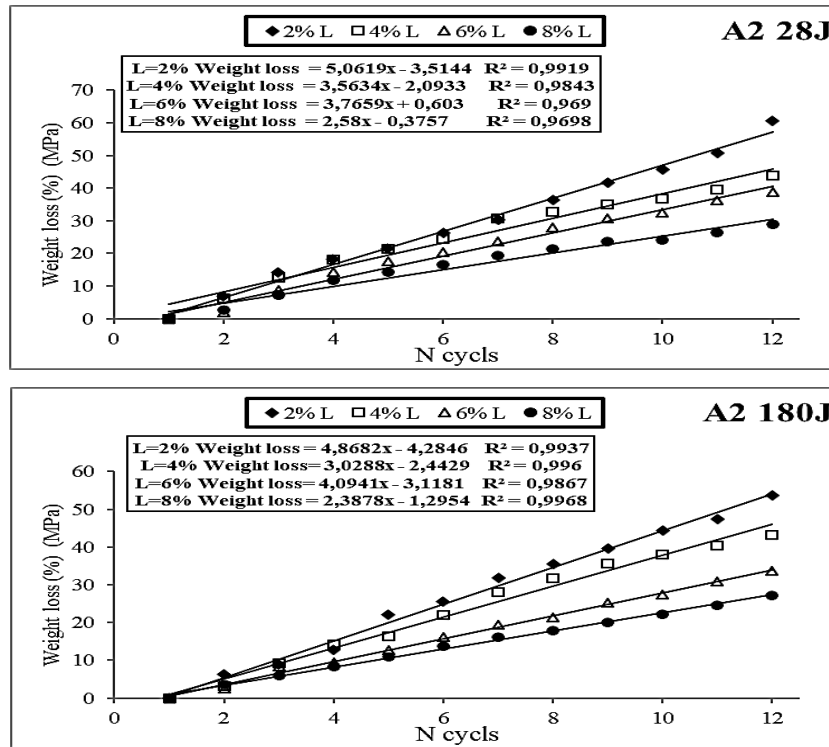
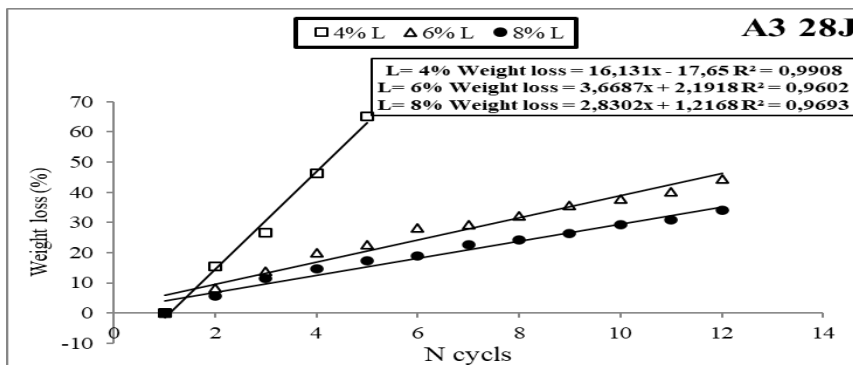


Figure IV. 2: Évolution de la perte de masse du sol A2 soumis au cycle séchage-humidification

La variation du volume et de la perte de masse du sol A3 étudiées à différentes périodes pendant 28 et 180 jours de cure est présentée dans la figure IV.5.

Après 28 et 180 jours de cure ; on a remarqué une réduction de la masse pour le sol traité et non traité. Le même comportement a été observé avec des sols non traités. Le sol A3 traité avec 4% de chaux a perdu près de (65 et 77%) de la masse respectivement après 28 et 180 jours de traitement respectivement. Cependant, les sols à 8% donnent un bon comportement aux cycles de séchage-humidification avec une perte de masse d'environ (34 et 32%) après 28 et 180 jours de traitement respectivement.





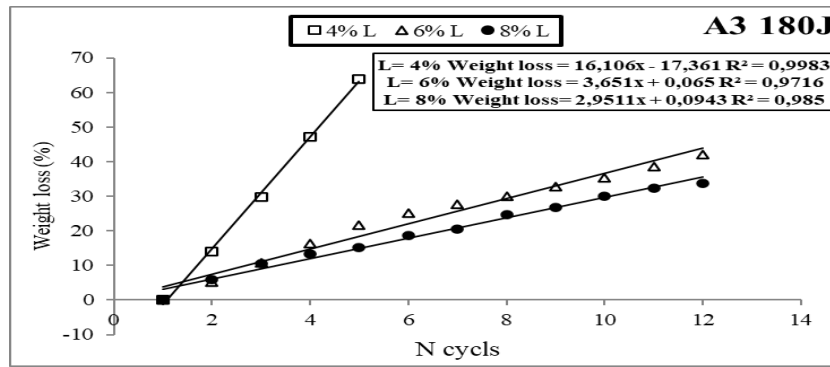


Figure IV. 3: Évolution de la perte de masse du sol A3 soumis au cycle séchage-humidification

La variation de volume et de la perte de masse du sol B5 traité et non-traité à différentes périodes de cure 28 et 180 jours soumis à des cycles de séchage-humidification est présenté dans la figure IV. 6. Après 7 jours de cure ; on a noté une augmentation de la perte de masse pour tous les sols traités et non traités à la chaux.

Après 28 et 180 jours de cure ; on a constaté une réduction de la masse pour les sols traités et non traités. Une légère amélioration pour le sol B5 avec 2% de chaux, qui a résisté au 12<sup>ème</sup> cycle. Après 28 jours de traitement pour le sol B5 traité avec 2 et 8% de chaux, les échantillons ont perdu près de de (61 et 29%) de la masse, les sols B5 traités avec 2 et 8% de chaux montrent une perte de (54 et 27%) de masse respectivement après 180 jours.

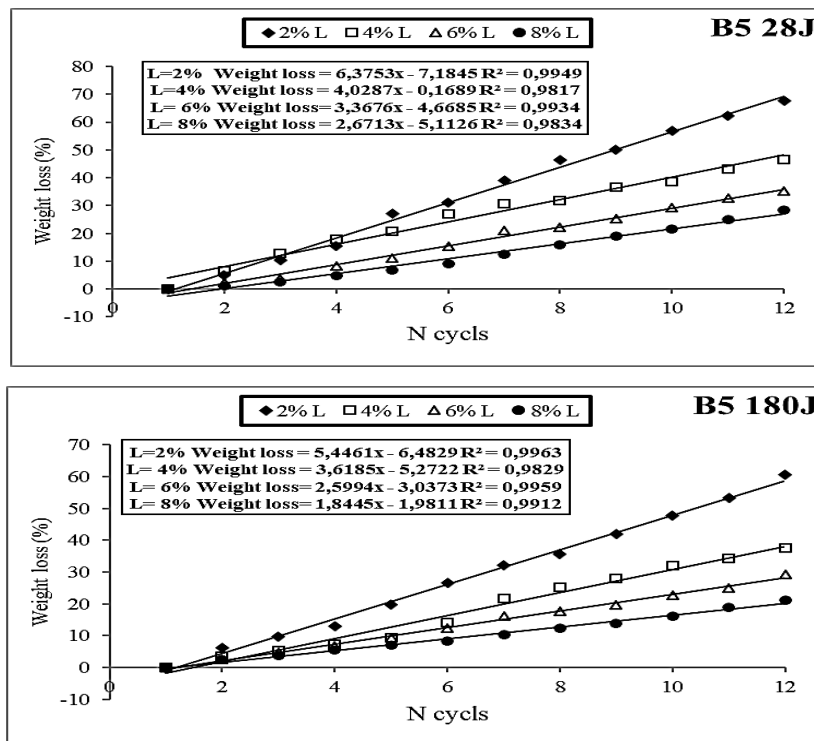


Figure IV. 4: Évolution de la perte de masse du sol B5 soumis au cycle séchage-humidification

Généralement, dans les quatre types de sols au début du deuxième cycle d'humidification, après la création des fissures par le retrait, ces dernières ne se ferment pas ou partiellement fermer sur la surface, de sorte que les fissures ne sont pas complètement réversibles (rebondissement) au cours des cycles de séchage-humidification, des fissures se produiront probablement au même endroit. La propagation des fissures provoque une perte de résistance et accélère ensuite la dégradation des échantillons avec une augmentation de l'absorption d'eau. Cette dégradation diffère selon le taux de chaux utilisé lors du traitement de ces sols, les sols traités présentant une faible propagation de fissures en raison de la formation de nouveaux hydrates qui limitent et réduisent le développement de fissures, lorsqu'ils sont soumis au cycle de séchage-humidification par rapport aux sols non traités. Le traitement à la chaux des sols étudiés a pour effet d'améliorer la résistance lorsque ces sols ont été exposés au cycle séchage-humidification, cet effet est très remarquable surtout avec les périodes de cure (supérieures à 28 jours), permettant ainsi le développement des réactions pouzzolaniques et de la formation de nouveaux hydrates (C-S-H), qui participent à la réduction de la porosité et par conséquent à la réduction de la capacité d'absorption d'eau des sols traités à la chaux, de sorte que nous obtenons finalement des sols stables;

**Sol + chaux + conservation à long terme → faible absorption → stabilisation.**

### **IV.5. Évolution de la résistance à la compression simple des sols soumis au cycle séchage-humidification**

La figure IV.7 montre que la résistance à la compression (UCS) du sol A1 traité à la chaux diminue avec l'augmentation du nombre de cycles de séchage-humidification. Pour le sol non traité (0%) de chaux, on remarque une détérioration totale dans le premier cycle. Les résistances maximums à la compression (UCS) ont été enregistrées avec un sol traité contenant 6 à 8% de chaux. Ces résultats expérimentaux montrent que la chaux joue un rôle important dans la durabilité des propriétés du sol. En condition de séchage, après 180 jours, les valeurs (UCS) diminuent avec 30% pour 4% de chaux, et augmentent avec 49% pour le sol A1 traité à 8% de chaux entre le premier et le dernier cycle. À l'état de séchage, les valeurs (UCS) étaient inférieures à l'état initial pour tous les sols traités avec un faible pourcentage de chaux (Aldaood, À 2014).

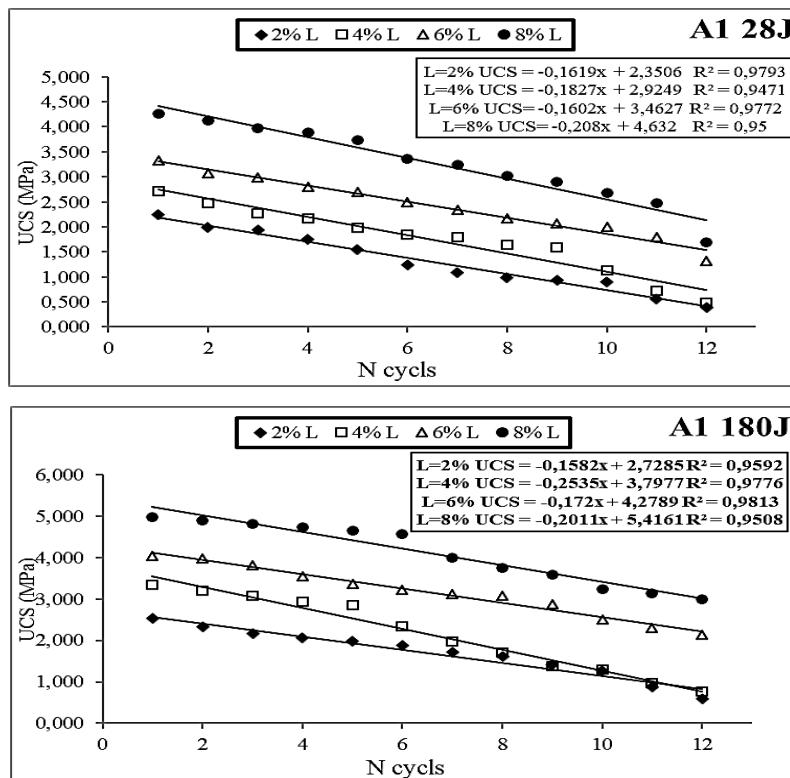
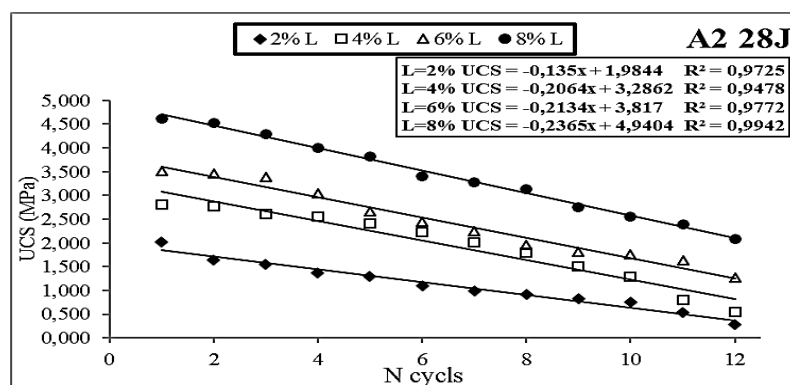


Figure IV. 5: Évolution de la résistance à la compression simple du sol A1 soumis au cycle séchage-humidification

La résistance à la compression du sol A2 traité à la chaux diminue avec l'augmentation du nombre de cycles de séchage-humidification, comme le montre la figure IV.8. Ces résultats expérimentaux montrent que la chaux joue un rôle important dans la durabilité des propriétés du sol. En condition de séchage, après 180 jours, les valeurs de résistance à la compression diminuent avec 39% pour 4% de chaux, et augmentent avec 40% pour les sols traités avec 8% de chaux entre le premier et le dernier cycle.



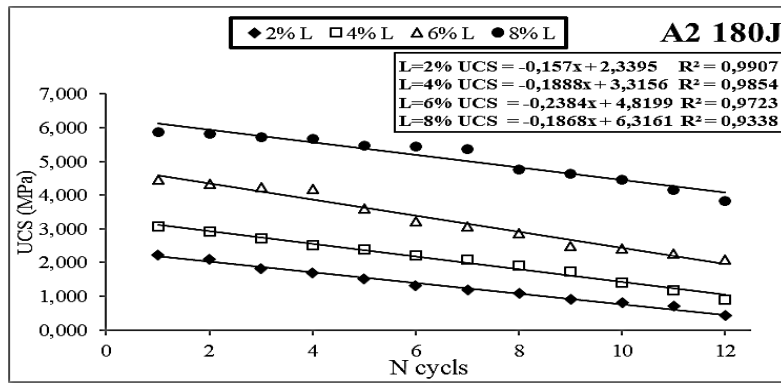


Figure IV. 8 : Évolution de la résistance à la compression simple du sol A2 soumis au cycle séchage-humidification

La figure IV.9 montre que la résistance à la compression (UCS) du sol A3 traité à la chaux diminue avec l'augmentation du nombre de cycles de séchage-humidification. La réduction la plus importante a été enregistrée après le premier cycle pour les sols traités en état mouillant et a progressivement atteint des valeurs minimales aux deuxième et quatrième cycles pour les sols traités avec 3 et 4% de chaux après 28 jours de cure et les septième et huitième cycle après 180 jours de cure pour le sol A3, tandis que la réduction s'étend jusqu'au 12ème cycle, pour le reste, le sol avec 0% se détériore dans le premier cycle.

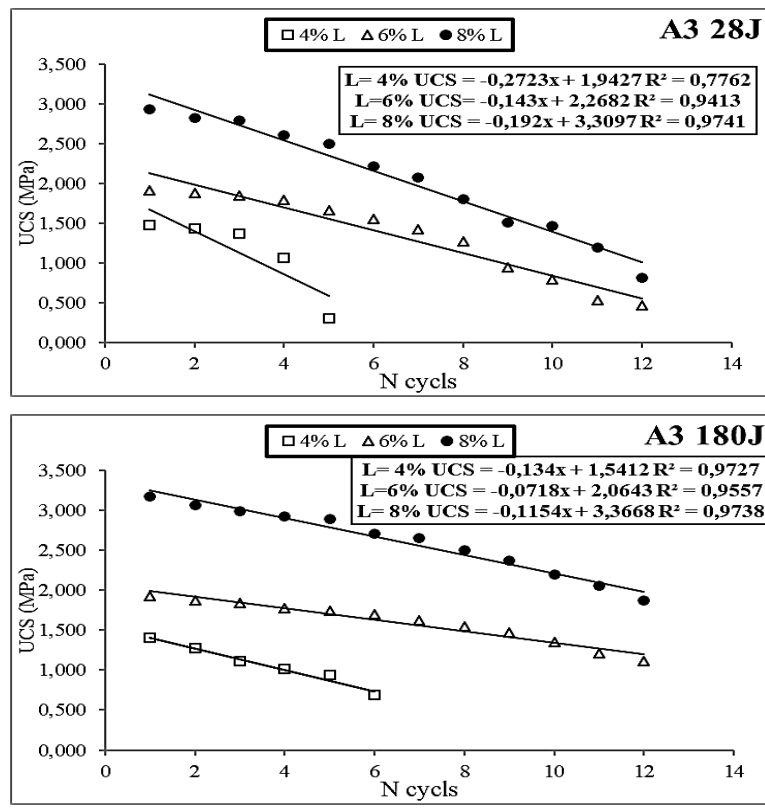


Figure IV. 9 : Évolution de la résistance à la compression simple du sol A3 soumis au cycle séchage-humidification

#### IV. Les résultats expérimentaux

La figure IV.10 montre que la résistance à la compression (UCS) du sol B5 traité à la chaux diminue avec l'augmentation du nombre de cycles de séchage-humidification. Pour le sol non traité (0%) de chaux, on constate une détérioration dans le premier cycle. Les valeurs de (UCS) du sol traité en état de séchage étaient supérieures à celles de l'état d'humidification et ces valeurs réduisaient également le nombre de cycles.

En condition de séchage, après 180 jours, les valeurs (UCS) diminuent avec 59% pour 4% de chaux, et augmentent avec 30% pour le sol B5 traité à 8% de chaux entre le premier et le dernier cycle. À l'état de séchage, les valeurs (UCS) étaient inférieures à l'état initial pour tous les sols traités avec un faible pourcentage de chaux (Aldoood. À 2014).

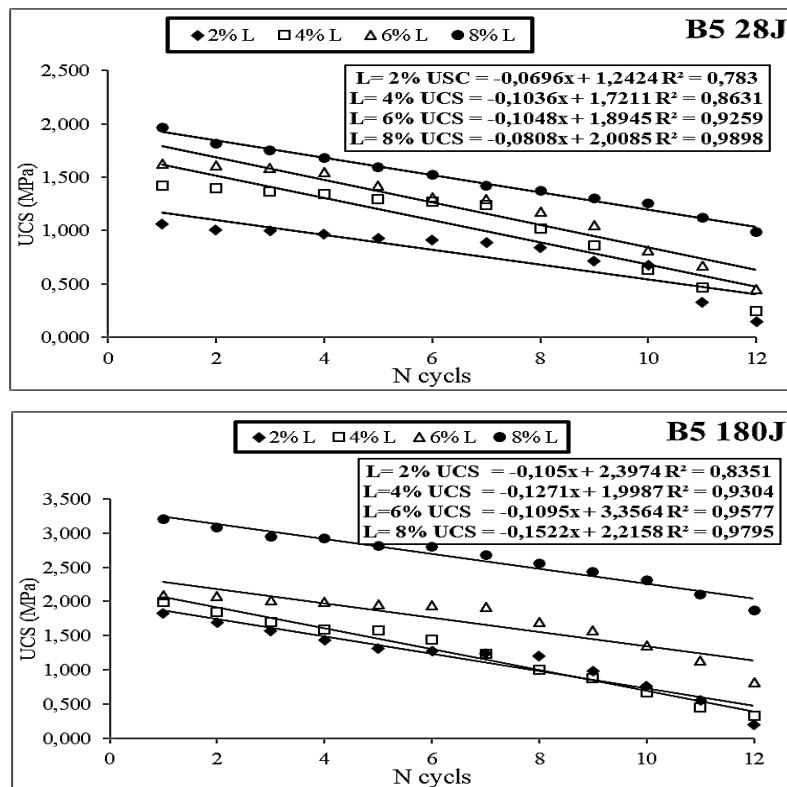
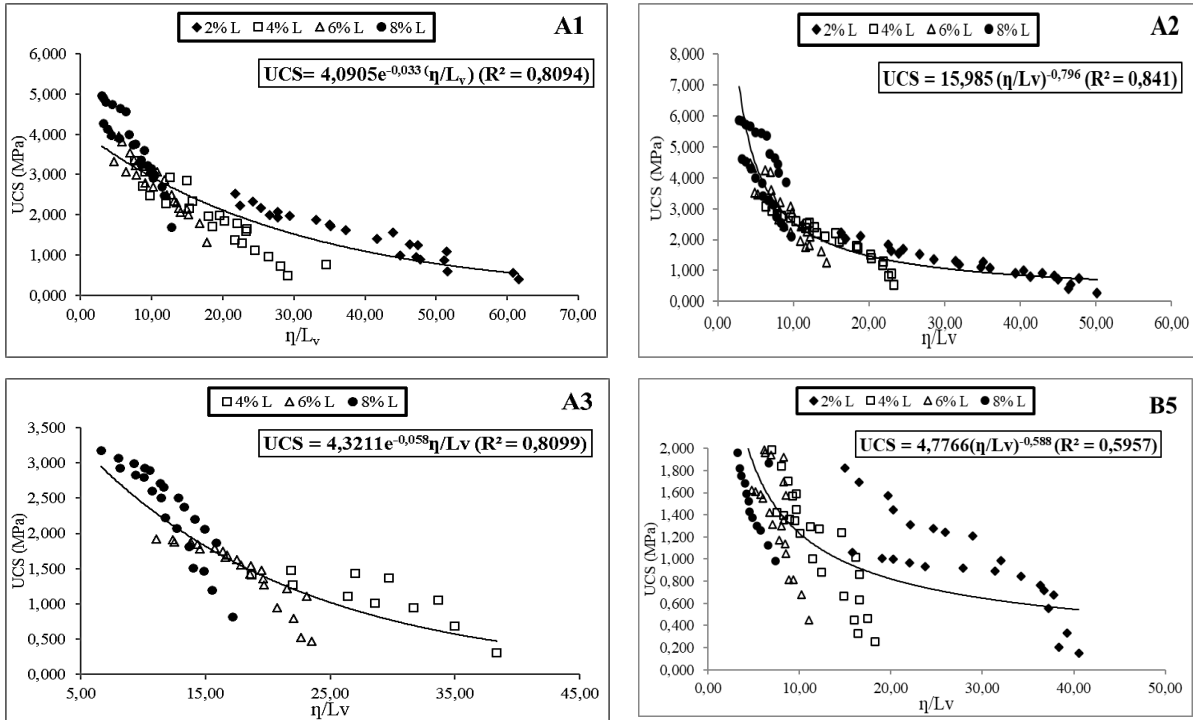


Figure IV. 10 : Évolution de la résistance à la compression simple du sol B5 soumis au cycle séchage-humidification

IV.6. Effet du rapport vides-chaux



*Figure IV. 11 : Variation de la résistance à la compression non confinée en fonction de la porosité/teneur volumétrique de chaux*

Les corrélations basées sur les mesures observées et la propriété souhaitée pour améliorer la fiabilité de l'évaluation de la propriété de résistance mécanique du sol traité. De nombreuses études ont mis au point des modèles théoriques pour observer les relations entre les essais destructifs et les propriétés physique du sol traité.

La figure IV.11 montre les courbes de corrélation entre la résistance à la compression (UCS) et le rapport entre la porosité et le volume de la chaux ( $\eta/L_v$ ). Les expressions de ces corrélations sont des relations de forme exponentielle présentée par les équations :

$$UCS = 4,0905e^{-0,033 (\eta/L_v)} \quad (R^2 = 0,8094) \quad (\text{Sol A1})$$

$$UCS = 15,985 (\eta/L_v)^{-0,796} \quad (R^2 = 0,841) \quad (\text{Sol A2})$$

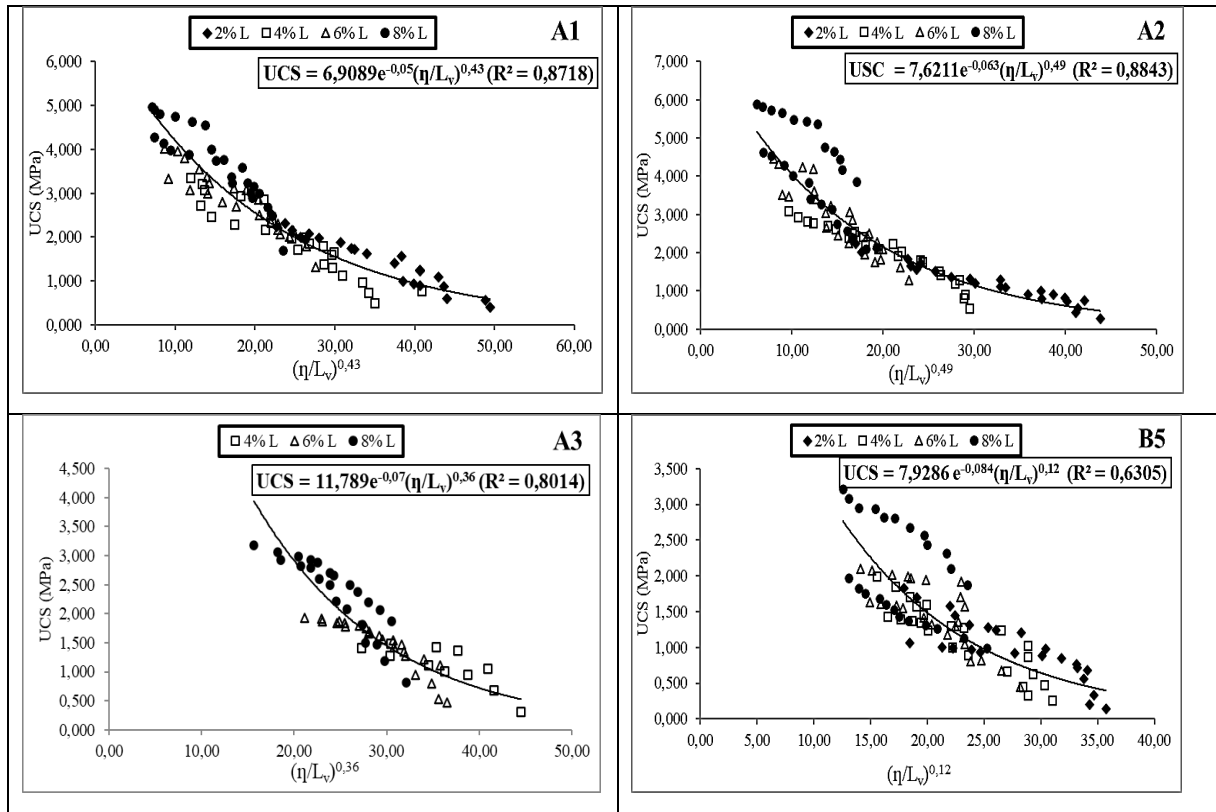
$$UCS = 4,3211e^{-0,058\eta/L_v} \quad (R^2 = 0,8099) \quad (\text{Sol A3})$$

$$UCS = 4,7766(\eta/L_v)^{-0,588} \quad (R^2 = 0,5957) \quad (\text{Sol B5})$$

Avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 0.8094, 0.841$  et  $0.8099$ . Après la figure IV.11, nous pouvons dire qu'il existe une très bonne corrélation entre la résistance à la compression (UCS) et le rapport entre la porosité et le volume de la chaux ( $\eta/L_v$ ).

## IV. Les résultats expérimentaux

Avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 0,5957$ , après la figure IV.11, nous pouvons dire qu'il existe une acceptable corrélation entre la résistance à la compression (UCS) et le rapport entre la porosité et le volume de la chaux ( $\eta/L_v$ ).



**Figure IV. 12 : Variation de la résistance à la compression unitaire avec porosité/teneur volumétrique ajustée de chaux**

Les corrélations basées sur les mesures observées et la propriété souhaitée pour améliorer la fiabilité de l'évaluation de la propriété de résistance mécanique du sol traité. De nombreuses études ont mis au point des modèles théoriques pour observer les relations entre les essais destructifs et les propriétés physique du sol traité.

La figure IV.12 montre les courbes de corrélation entre la résistance à la compression (UCS) et le rapport entre la porosité et le volume de la chaux ( $\eta/L_v$ )<sup>X</sup>. Les expressions de ces corrélations sont des relations de forme exponentielle présentée par les équations :

$$\text{UCS} = 6,9089e^{-0,05(\eta/L_v)^{0,43}} \quad (R^2 = 0,8718) \quad (\text{Sol A1})$$

$$\text{USC} = 7,6211e^{-0,063(\eta/L_v)^{0,49}} \quad (R^2 = 0,8843) \quad (\text{Sol A2})$$

$$\text{UCS} = 11,789e^{-0,07(\eta/L_v)^{0,36}} \quad (R^2 = 0,8014) \quad (\text{Sol A3})$$

$$\text{UCS} = 7,9286 e^{-0,084(\eta/L_v)^{0,12}} \quad (R^2 = 0,6305) \quad (\text{Sol B5})$$

Avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 0.8718, 0.8843$  et  $0.8014$ . Après la figure IV.12, nous pouvons dire qu'il existe une très bonne corrélation entre la résistance à la compression (UCS) et le rapport entre la porosité et le volume de la chaux  $(\eta/L_v)^X$ .

Avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 0,5957$ , après la figure IV.11, nous pouvons dire qu'il existe une acceptable corrélation entre la résistance à la compression (UCS) et le rapport entre la porosité et le volume de la chaux  $(\eta/L_v)^X$ .

Figures. IV 11 et IV 12 montrent comment la porosité affecte le UCS. Le UCS augmente de façon exponentielle avec la réduction de la porosité pour tous les mélanges compactés. Plusieurs chercheurs ont signalé cet effet bénéfique lié à une diminution de la porosité (**Ingles et Metcalf, 1972 ; Consoli et al., 2006 et 2007**). Le mécanisme par lequel la réduction de la porosité influence la résistance du sol à la chaux est lié à l'existence d'un plus grand nombre de contacts. Il est possible que les réactions impliquées dans le durcissement de la chaux modifient l'indice de vide initial et, en outre, il est difficile de savoir dans quelle mesure le produit durci initial a réellement construit de nouvelles connexions de liaison entre les particules.

### IV.7. Effet du traitement sur la microstructure

Le sol traité présente une nouvelle structure beaucoup plus rigide. Dans ce cas, les produits cimentaires précipités continuent à remplir les pores des sols. L'utilisation de la chaux dans le sol diminue et réduit la propagation des fissures en formant de nouveaux hydrates par réaction pouzzolanique (**Aldaood. À, 2014**). En raison du milieu fortement alcalin (pH atteignant 12,4) activé par la dissolution de la chaux ajoutée dans l'eau libre du sol traité, les réactions pouzzolaniques résultent de l'association de la silice et de l'alumine du sol  $SiO_2, Al_2O_3$  et de la chaux calcique  $CaO$  en présence d'eau. Ces réactions entraînent la formation d'hydrates de calcium en raison de la présence d'ions  $Ca^{+2}, OH^-$  et  $SiO_4$  et  $Al_2O_6$  (**Nowamooz. H et al, 2013 ; Lemaire. K et al. 2013**) qui assure les liens entre les particules dans les sols traités. Cette réaction pouzzolanique dépend de la minéralogie du sol traité, de la température du milieu ; plus la température est élevée, plus la prise est rapide selon (Bell et al., 1996 ; Maubec et al., 2010), les conditions de compactage tel que la teneur en eau et l'homogénéité du mélange sol-chaux (**Estéoule et al., 1979 ; Locat et al., 1990 ; Locat et al., 1996 ; Maubec et al., 2010**).



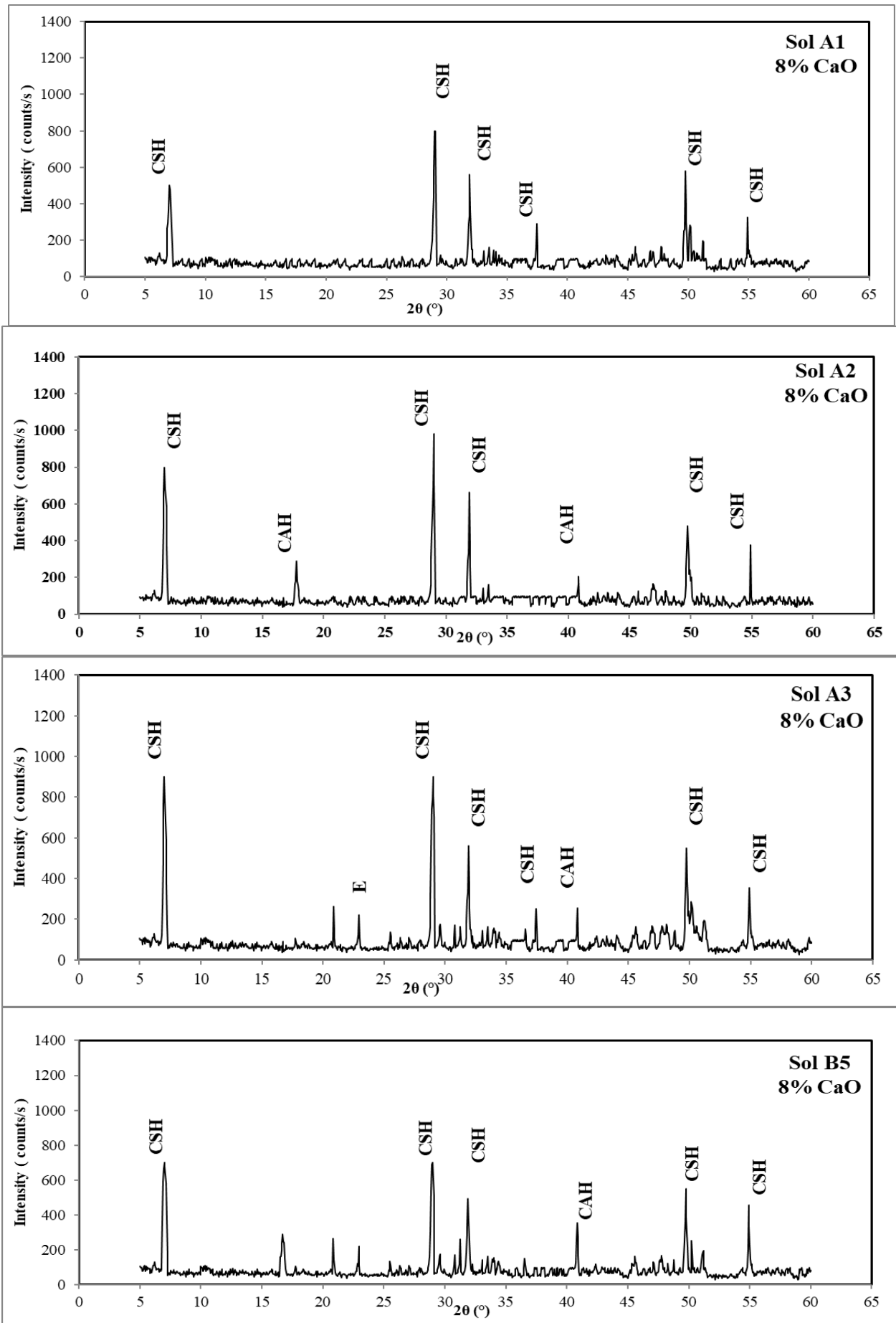


Figure IV. 13: DRX des sols traités soumis au cycle séchage-humidification après 180 jours

#### **IV. Les résultats expérimentaux**

---

La figure IV.13 présente une analyse DRX du sol traité après 180 jours et soumis au cycle séchage-humidification, montrant la formation de nouveaux hydrates de calcium (CSH et CAH) dans tous les échantillons traités à la chaux et d'ettringite ont été détectés dans les échantillons contenant du gypse tels que le sol A2 et A3 traité contenant 4% de chaux. Ceci est attribué à davantage de réactions se produisant entre le gypse et la chaux au cours des cycles de séchage-humidification en plus de la température de séchage de 60°C. L'effet de l'addition de chaux est visible dans les sols durcis pendant 180 jours.

---

## **Conclusion Générale**

---

## Conclusion Générale et Perspectives

L'objet de ce travail est de fournir des réponses concernant l'influence du traitement par la chaux avec différents dosages sur les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des sols soumis aux cycles de séchage-humidification, quelques conclusions ont été tirées.

Sur le plan mécanique ; la résistance à la compression des sols étudiés est fortement affectée par la période de cure à différents âges (2, 7, 14, 28, 90 et 180 jours), les sols traités conservés à long terme offrent une résistance mécanique supérieure à ceux conservés à court terme, plus la période de conservation est importante plus l'évolution de la résistance est appréciable et considérable. De même, la résistance mécanique dépend également du dosage de chaux utilisé pendant le traitement, la combinaison des deux facteurs (temps de durcissement et teneur en chaux) à un effet bénéfique sur le comportement mécanique des sols étudiés, ce qui permet le développement de réactions pouzzolaniques entre le sol et la chaux. La formation de nouveaux hydrate (C-A-H et C-S-H) au cours de la période de conservation et en fonction du dosage de chaux, contribuant à améliorer le comportement mécanique.

Sur le plan de durabilité ; l'exposition cyclique séchage-humidification des sols étudiés permet de suivre deux indicateurs déterminants de la durabilité (variation / dilatation volumique et le taux d'eau absorbé pendant l'immersion) en fonction du taux de chaux et de la période de cure du sol étudié. L'évaluation des déformations volumétriques de différents échantillons soumis à la sollicitation cyclique séchage-mouillage indique l'influence du pourcentage de chaux pendant le traitement de ces sols. Nous trouvons que, avec des teneurs en chaux supérieures à la PFC, la majorité des sols étudiés peuvent résister aux cycles séchage-humidification imposés, et cela pour différentes périodes de durcissement (28 et 180 jours). Cependant, les sols traités avec des pourcentages de chaux inférieurs à la PFC présentent un comportement médiocre lors de l'exposition cyclique en fonction de la période de cure.

Les sols conservés à court terme avec une teneur en chaux inférieure à celle de la PFC ; indiquent une faible résistance par rapport à celles conservées à moyen et à long terme. La conservation des mêmes sols (avec une teneur en chaux <PFC) à moyen et long terme (28 et 180 jours) montre une légère amélioration qui indique l'effet positif du temps de cure sur le développement de la résistance en limitant la modification de volume lorsque les sols sont en contact avec de l'eau, même à des niveaux de chaux inférieurs à PFC.

La mesure du taux d'absorption d'eau des sols étudiés au moment des sollicitations cycliques permet d'observer une relation disproportionnée entre le taux d'absorption d'eau et la chaux.

Pour des niveaux de chaux supérieurs à PFC ; sols traités présentant un faible taux d'absorption d'eau, cela confirme leur faible variation de volume, le même comportement a été observé pour tous les sols ayant des périodes de cure différentes. Pour les niveaux de chaux inférieurs à PFC, les sols étudiés indiquent un comportement opposé, d'où leur grande variation de volume. Les deux comportements distinctifs sont dus à la faible perméabilité, causés par la diminution de la porosité due à la cimentation suite à la réaction pouzzolanique sol-calcaire par la formation des nouveaux hydrates qui réduisent les pores et la propagation des fissures.

La microstructure du sol est un paramètre important dans l'établissement des échanges hydrauliques, susceptibles de conditionner le comportement du sol dans les cycles séchage-humidification. L'analyse DRX est la clé pour élucider les réactions de stabilisation de la chaux dans le sol. L'analyse des sols traités à la chaux a révélé la formation de nouveaux hydrates C-S-H et C-A-H. La saturation en CH dans les sols traités réduite par échange de cations, si la CEC est plus élevée, la CH dans la solution interstitielle du sol traité peut être insaturée. Ainsi, la quantité de C-S-H produite par la chaux diminuée par tout échange de cations supplémentaires peut consommer les ions  $Ca^{2+}$  et  $OH^-$  qui devraient être utilisés pour produire du C-S-H, ce qui abaisse la résistance du sol.

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'elle peut offrir en termes de ressources de temps et de 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 chaux et de l'effort de compactage approprié pour obtenir un mélange qui permet de répondre à la force requise par le projet avec les meilleures performances et à moindre coût.

---

# **Référence bibliographique**

---

**Référence bibliographique**

- Adams, A.G., Dukes, O.M., Tabet, W., Cerato, A.B., Miller, G.A., (2008). Sulfate induced heave in Oklahoma soils due to lime stabilization. *Geo-Congress, Conference Proceedings. ASCE*, pp. 444–451.
- 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*
- Ahnberg, H., S.-E. Johanson, H. Pihl and T. Carlsson (2003). "Stabilising effects of different binders in some swedish Soils." *Ground Improvement* 7(1): 9-23.
- Aiban, S.A., Al-Abdul Wahhab, H.I., Al-Amoudi, O.S.B., Ahmed, H.R., 1998. Performance of a stabilized marl base: a case study. *Constr. Build. Mater.* 12 (6–7), 329–340.
- Aldood M. Bouasker M. AL-MUKHTARET (2014). Impact of wetting–drying cycles on the microstructure and mechanical properties of lime-stabilized gypsums soils, *Engineering Geology* 174, 11–21.
- Aldood, A., Bouasker, M., Al-Mukhtar, M., (2014). Impact of freeze–thaw cycles on mechanical behaviour of lime stabilized gypseous soils. *Cold Reg. Sci. Technol.* 99, 38–45.
- Al-Kiki, I.M., Al-Atalla, M.A., Al-Zubaydi, A.H., (2011). Long term strength and durability of clayey soil stabilized with lime. *Eng. Technol. J.* 29 (4), 725–735.
- Allam, M.M., Sridharan, A., (1981). Effect of wetting and drying on shear strength. *J. Geotech. Eng. ASCE* 107 (GT4), 421–438.
- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., Alcover, J.F., (2010 a). Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C. *Appl. Clay Sci.* 50 (2), 191–198.
- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., Alcover, J.F., (2010b). Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 50 °C. *Appl. Clay Sci.* 50 (2), 199–203.
- Al-Obaydi, M.A., Al-Kiki, I.M., Al-Zubaydi, A.H., (2010). Strength and durability of gypseous soil treated with waste lime and cement. *J. Al-Rafidain Eng.* 18 (1), 28–42.
- Al-Taie, A., Disfani, M., Evans, R., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S (2018). Impact of curing on behaviour of basaltic expansive clay. *Road Materials and Pavement Design*, 19(3), pp. 624-645

- 
- Al-Taie, A., Disfani, M.M., Evans, R., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S. (2016). Swell-shrink Cycles of Lime Stabilized Expansive Subgrade, *Procedia Engineering*, 143, pp. 615-622
- 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/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)). 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 D4546-14, Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- ASTM D5102-09, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures (Withdrawn 2018), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.
- ASTM D559, Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- 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](http://www.astm.org).
- Balasubramaniam, A. S., et Buensuceso, B. R. (1989). On the overconsolidated behaviour of limetreated soft clay. *Actes de la 11ème Conférence internationale sur la Mécanique des Sols et les Fondations*, Rio de Janeiro, Brésil, 30-35.
- Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils . *Engineering Geology* 42 , 223- 237.
- Bin, S., Zhibin, L., Yi, C., et Xiaoping, Z. (2007). Micropore structure of aggregates in treated soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, vol. 19, 99-105.



- 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.
- Brandl, H. (1981). Alteration of soil parameters by stabilization with lime. Actes de la 10ème Conférence internationale sur la Mécanique des Sols et les Fondations, Stockholm, Suède, 587-594.
- Bujulu, P. M. and G. Grimstad (2009). An Innovative Binder Study and Constitutive Model for Deep-Mix Stabilized Quick Clay. Deep Mixing '09, Okinawa.
- Cabane, N. (2005). Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation. St-Etienne: Ecole des Mines d'Alès.
- Cabane, N. (2005). Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation. St-Etienne: Ecole des Mines d'Alès.
- Celik, E., Nalbantoglu, Z., 2013. Effects of ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-stabilized sulfate-bearing soils. *Eng. Geol.* 163, 20–25.
- 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)
- Choquette, M., Berube, M.A., Locat J. (1987). Mineralogical and microtextural changes associated with lime stabilization of marine clays from eastern Canada. *Applied Clay Science* 2, 215-232.
- 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.
- Cuisinier, O., Le Borgne, T., Deneele, D., Masrouri, F., (2011). Quantification of the effects of nitrates, phosphates and chlorides on soil stabilization with lime and cement. *Eng. Geol.* 117, 229–235.
- Czurda, K.A., Hohmann, M., 1997. Freezing effect on shear strength of clayey soils. *Appl. Clay Sci.* 12 (1–2), 165–187.

- De Bel, R., Bollens, Q., Duvigneaud, P. H., et Verbruge, J. C. (2005). Influence of curing time, percolation and temperature on the compressive strength of a loam treated with lime. Colloque International TREMTI, papier n°C022, 10p.
- Delage, P., et Pellerin, M. (1984). Influence de la lyophilisation sur la structure d'une argile sensible du Québec. *Clay Miner* 19, 151–160. Osula., 1996)
- Dempsey, B. J., et Thompson, M. R. (1968). Durability Properties of lime-soil mixtures. Record No. 235, Highway Research Board.
- Deneele, D., Cuisinier, O., et Auriol, J. C. (2009). Etude microstructural du limon traité à la chaux. Paris: LCPC.
- Diamond, S. (1970). Pore size distributions in clays. *Clays Clay Miner.* 18, No. 1, 7-23.
- 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.
- Droesbeke. J ; Saporta. G (1997) : Plan d'expériences – Application à l'entreprise", Ed. Technip.
- 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.
- Eades, J. L., et Grim, R. E. (1966). A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. Highway Research Board Bulletin, n°139, 61-72.
- 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.
- Frédéric. G (1995) : modélisation et optimisation par plan d'expériences d'un moteur à commutation électronique'. Thèse de doctorat de l'université des sciences et technologie de Lille, France.
- GB/T 50123-1999, Standard for soil test method.
- Gerressen, F.-W., M. Schöpf and E. Stötzer (2009). CSM-Cutter Soil Mixing - Worldwide
- Goupy. J ; L. Creighton (2007) : Introduction to Design of Experiments with JMP® Examples Third Edition SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Goupy. J (1996) : La méthode des plans d'expériences – Optimisation du choix des essais et de l'interprétation des résultats", Ed. Dunod.

- GTR (1992). Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Paris: SETRA - LCPC.
- GTS (2000). Guide technique du Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Paris: Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Herzog, A., Michell, J. K. (1963). Reactions accompanying stabilization of clays with cement. Highway Research Record, No. 36, 146-171.
- Hilt, G. H., et Davidson, D. T. (1960). Lime fixation on clayey soils. Highway Research Board Bulletin 262, 20-32.
- Holm, G. (2000). "Deep Mixing." Soft Ground Technology, ASCE, Geotechnical Special Publication 112: pages 105–122.
- Holm, G., Trank, R., Ekstrom, A., (1977). Improving lime column strength with gypsum. Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, 3, pp. 903–907.
- Huang, X., Zhou, G.J. (1994). Hardening mechanism of cement stabilized soil. Chin.J.Geotech.Eng. 16(1), 62-68.
- Hunter, D., (1988). Lime-induced heave in sulfate-bearing clay soils. J. Geotech. Eng. ASCE 114 (2), 150–167.
- Ingles O.G. et Metcalf J.B. (1970): Soil stabilization: principals and practice. Butterworths, Sidney.
- Ingles, O.G., Metcalf, J.B., 1972. Soil Stabilization Principles and Practice. Butterworth, Sydney.
- Jegandan, S., M. Liska, A. A.-M. Osman and A. Al-Tabbaa (2010). "Sustainable binders for soil stabilisation". ICE Journal of Ground Improvement 163(1), 53-61.
- Kawamura, M., Hasaba, S., Sugiura, S., 1971. Influence of exchange able cations (Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) held on bentonite on the bentonite–cement interaction. Proc.JpnSoc.Civ.Eng.192,123–129.
- Khatab, S.A.A., Al-Mukhtar, M., Fleureau, J.M., (2007). Long-term stability characteristics of a lime-treated plastic soil. J. Mater. Civ. Eng. 19 (4), 358–366.
- Kolias, S., Kasselour I-Rigopoulou, V. & Karahalios, A., (2005). Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. Cement & Concrete Composites, vol. 27, pp.301–313.
- Kujala, K., (1977). The use of gypsum in deep stabilization. Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3. International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMFE), London, pp. 925–928.

- Kujala, K., Nieminen, P., (1977). On the reactions of clays stabilized with gypsum lime. Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3. International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMFE), London, pp. 929–936.
- Larsson, S. (2005). State of Practice Report – Execution, monitoring and quality control. Deep Mixing '05, Stockholm, Sweden, 732-786.
- Lasledj, A., et Al-Mukhtar, M. (2008). Effect of hydrated lime on the engineering behaviour and the microstructure of highly expansive clay. The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG).
- 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.
- Lemaire, K., Deneele, D., Bonnet, S., Legret, M., (2013). Effects of lime and cement treatment on the physicochemical, microstructural and mechanical characteristics of a plastic silt. Eng. Geol. 166 (8), 255–261.
- Little, D. N. (1987). Fundamentals of the stabilization of soil with lime. Bulletin of National Lime Association, 1987, 322, 17.
- Little, D. N. (1995). Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. National Lime Association, Arlington, 219.
- Little, D.N., Nair, S., Herbet, B., (2010). Addressing sulfate-induced heave in lime treated soils. J. Geotech. Geoenviron. 136 (1), 110–118.
- Liu, M.D., Indraratna, B., Horpibulsuk, S., Suebsuk, J (2012). Variations in strength of lime-treated soft clays, (2012) Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement, 165 (4), pp. 217-223.
- Louafi, B. Hadeif, B. Bahar, R., (2015). Improvement of Geotechnical Characteristics of Clay Soils Using Lime. Advanced Materials Research, V 1105, pp. 315-319.
- 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.

- Locat, J., Trembley, H., et Lerouil, S. (1996). Mechanical and hydraulic behavior of a soft inorganic clay treated with lime. *Canadian Geotechnical Journal*, 33 (4), 654-669.
- Malo, P. (2009). BTS IPM L'épreuve E52 traitée par les plans d'expériences, techno méca.
- Maafi, N. (2020). Comportement des sols trités à la chaux à long terme. USTHB Algerie.
- 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.
- Maubec, N. (2010). Approche multi-échelle du traitement des sols à la chaux. Etude des interactions avec les argiles. Nantes: UNIVERSITÉ DE NANTES FACULTÉ DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES.
- McIntire, P., (1991). Nondestructive testing handbook, Vol. 7: Ultrasonic testing American Society for Nondestructive Testing, Columbus.
- Mohamed Kh, Mahamedi Ab (2013). Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay. *Applied Clay Science*, Volume 95, June 2014, Pages 104-110. M'sila University, Faculty of Technology, Civil Engineering Department, Geomaterials Development Laboratory.
- 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).
- Mtallib, M., et Bankole, G. (2011). The Improvement of the Index Properties and Compaction Characteristics of Lime Stabilized Tropical Lateritic Clays with Rice Husk Ash (RHA) Admixtures. *EJGE Vol. 16 [2011], Bund. I*, 983-996.
- 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.
- NECMI, Y., EKREM, K. & SUAT, A., (2007). Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives. *Cold Regions Science and Technolog*, vol, 48, pp.44-54.
- NF EN 12504-4 (2002). Détermination de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores en laboratoire. NF P 94-411. AFNOR.

- NF EN 13286-41 (July 2003). Test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures. European Standard - French Standard.
- NF EN 13286-42 (September 2003). Test method for the determination of the indirect tensile strength of hydraulically bound mixtures. European Standard - French Standard.
- NF EN 1744-1/IN1 (2014) : Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 1 : analyse chimique.
- 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 P 98-234-2 (1996). Essai de gonflement au gel des sols et matériaux granulaires traités ou non de  $D < 20$  mm. Paris: AFNOR.
- 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.
- Ormsby, W. C. (1973). Strength Development and reaction products in lime treated montmorillonite water system. Public Road Research, vol. 37, n°4, 136-148.
- Osula, D. (1996). A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. Engineering Geology, vol 42, n°1, 71-81.
- Perret, P. (1979). Application pratique des nouvelles données expérimentales relatives à la stabilisation des sols fins par la chaux. Bulletin de liaison des Laboratoires Ponts et Chaussées, n°99, 110-118.

- 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.*
- Razouki, S.S., El-Janabi, O.A., (1999). Decreasing in the CBR of a gypsiferous soil due to longterm soaking. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 31 (1), 87–89.
- Robert, J., A. Deniau and Y. N. R. Iagolnitzer (1994). Le COLMIX, amélioration de sol par colonnes traitées in situ. XIII ICSMFE, New Delhi, 1215-1218.
- Rogers, Glendenning. (1996). Modification of clays soils using lime. In *Lime stabilization*. Thomas Telford, London, 99-112.
- Rollings, R.S., Burkes, J.P., Rollings, M.P., (1999). Sulfate attack on cement-stabilization sand. *J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE* 125 (5), 364–372.
- Saetersdal, R., 1981. Heaving conditions by freezing of soils. *Eng. Geol.* 18 (1–4), 291–305.
- Saitoh, S. Suzuki, Y. (1986). Hardening of soil improved by deep mixing method. *Proceedings of the 11th International Conference SMFE*, pp. 1745-1748.
- Sapora. G (1990) : *Probabilité, analyse des données statistiques*, Eds Technip, 1990.
- Shihata, S.A., Baghdadi, Z.A., (2001). Long-term strength and durability of soil cement. *J. Mater. Civ. Eng.* 13 (3), 161–165.
- Smith, R., Robertson, V.S., (1962). Soil irrigation classification of shallow soils overlying gypsum beds, northern Iraq. *J. Soil Sci.* 13, 106–115.
- Sobhan, K., Das, B.M., (2007). Durability of soil–cements against fatigue fracture. *J. Mater. Civ. Eng.* 19 (1), 26–32.
- Stephane. V, vauquelin aurélien, vilain jean-paul (2007); configuration d'une structure « halbach » par plans d'expériences treillis, Conférence EF 2007 ENSEEIHT, Toulouse.
- Tang, A.M., Ngoc, M., Cui, Y.J., (2011). Effects of the maximum soil aggregates size and cyclic wetting–drying on the stiffness of a lime-treated clayey soil. *J. Geotech.* 61 (5), 421–429.
- Terashi, M. (2003). *The state of practice in Deep Mixing Methods*. ASCE, Geotechnical Special Publication No. 120, 1, 25-49.

- Thi Thanh Hang Nguyen, (2015). Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel. Université Paris-Est, 2015. French. <NNT : 2015PEST1064>. <tel-01191696> .
- Thompson, M. R. (1968). Lime stabilisation of soils for highway purposes. Illinois: Illinois Highway Engineering Series, No. 25.
- Tinsson. W (2010): Plans d'expérience : constructions et analyses statistiques, MATH EMATIQUES & APPLICATIONS, Springer Heidelberg Dordrecht London New York.
- US EPA 9081, Test Method 9081: Cation-Exchange Capacity of Soils (Sodium Acetate), 1986.
- Wild, S., Arabi, M., et Rowlands, G. O. (1986). Relation between pore size distribution, permeability, and cementitious gel formation in cured clay-lime systems. *Material Science and Technology*, vol. 3, n°12, 1005-1011.
- Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G.I., Higgins, D.D., (1999). Suppression of swelling associated with ettringite formation in lime stabilized sulphate bearing clay soils by partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag. *Eng. Geol.* 51, 257–277.
- Yarbasi, N., Kalkan, E., Akbulut, S., (2007). Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze–thaw, of granular soil with waste additives. *Cold Reg. Sci. Technol.* 48 (1), 44–54
- YI, C., BIN, S., CHARLES, W. & CHAO-SHENG, T., (2006). Effect of polypropylene fiber and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering Geology*, vol 87, pp. 230–24.



