
Soumis le: 07/09/2019

Forme révisée acceptée le: 19/01/2020

Auteur correspondant : amine18gc@yahoo.com



Revue
Nature et Technologie

<http://www.univ-chlef.dz/revuenatec>

ISSN: 1112-9778 – E-ISSN: 2437-0312

Comportement mécanique du schiste traité par des ajouts du ciment et de la chaux

Mohammed-Amin BOUMEHRAZ^{a,*}, Mekki MELLAS^a, Farida BOUCETTA^b, Nour El-Houda MEGHAICHI^c, Meriem CHEBAH^c

^aLaboratoire de Recherche en Génie Civil (LRGC), Département de génie civil, Faculté des sciences et technologie à l'université de Biskra, Algérie

^bLaboratoire de Physique des Couches Minces et Applications (LPCMA), Faculté des sciences et technologie à l'université de Biskra, Algérie

^cDépartement de génie civil et d'hydraulique, Université de Jijel, Algérie

Résumé:

La stabilité des infrastructures est un souci majeur pour différentes raisons économiques, écologiques ou, plus important, la sécurité des bâtiments. Ceci peut se faire par différentes techniques, mécanique, chimique ou les deux à la fois, afin d'améliorer les propriétés géotechniques des sols instables. Les techniques utilisées sont les ajouts, dont les plus courants sont la chaux et le ciment. Cette étude a pour objet de déterminer l'évolution des propriétés géotechniques d'un sol schisteux du pôle universitaire d'El-Aouana dans la wilaya de Jijel (Algérie). L'échantillon prélevé sur site a été modifié avec des proportions d'additifs avec 0, 1 %, 3 % et 7 % du remplacement du ciment et de la chaux en poids sec afin de tester les différentes propriétés de la pâte fraîche du sol argileux. On conclut que l'addition d'un liant (Ciment ou chaux) au sol schisteux provoque une réduction de la plasticité, une amélioration des caractéristiques de compactage au Proctor, une augmentation rapide de l'indice de portance immédiat en fonction du traitement et une augmentation de la cohésion et de l'angle de frottement.

Mots-clés: Chaux, Ciment, Schiste, Limites, Cisaillement.

Study of Schist Treatment with Cement and Lime.

Abstract:

The stability of infrastructure is a major concern for various economic, ecological or, more importantly, the security of buildings. This can be done by different techniques, mechanical, chemical or both, to improve the geotechnical properties of unstable soils. The techniques used are the additions, of which, the most common are lime and cement. The purpose of this study is to determine the evolution of the geotechnical properties of a shale soil of the university center of El-Aouana in the wilaya of Jijel (Algeria). The sample taken on site was modified with additives proportions, 0, 1 %, 3% and 7% of the replacement of cement and lime in dry weight in order to test the different properties of the fresh paw of clay soil. Finally, on conclude that the addition of a binder (Cement or lime) to shale soil causes a reduction in plasticity, an improvement in compaction characteristics with Proctor, a rapid increase in the immediate lift index depending on the treatment. and an increase in cohesion and the angle of friction.

Keywords: Lime, Cement, Shale, Limits, Shear.

1. Introduction

Les argiles désignent la fraction des particules du sol dont la taille est inférieure à 4 μm . Ils se distinguent par une structure en feuillets formés de cristaux en arrangement octaédrique (O) ou tétraédriques (T) capable d'intégrer des cations hydratés (Ca, Na, Fe, Al ...etc.) dans les espaces

interfoliaires [1]. Ces sols argileux sont très sensibles à l'eau qui, à certains degrés d'humidité, peut transformer le sol argileux en un matériau plastique et malléable [2]. Couramment, le phénomène de retrait-gonflement des argiles, qui touche les sols, contient des fines argileux en présence d'humidité. Ces sols peuvent se rétracter de manière importante et entraîner localement des



Cet article est mis à disposition selon les termes de la licence [Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

This article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

mouvements de terrain non uniformes pouvant aller jusqu'à provoquer la fissuration de certaines habitations ou certaines routes [3]. Les techniques de stabilisation des sols argileux peuvent être mécaniques, chimiques, ou les deux. La chaux a été l'agent de stabilisation le plus largement utilisé pour l'argile, cependant, le ciment Portland pour a été promu et utilisé dans certaines applications [4]. Le traitement chimique par des ajouts est dû essentiellement à des impératifs économiques associés à un souci écologique croissant qui exige d'utiliser au maximum les matériaux situés dans l'emprise des nouveaux projets d'infrastructure [5]. En effet, une méthode de stabilisation réussie dépend de nombreux facteurs tels que le type et les propriétés du sol, l'agent stabilisant, la teneur en stabilisant, l'utilisation potentielle du sol stabilisé et les méthodes de mélanges sur le terrain [6, 7].

L'ajout du ciment et de la chaux au sol provoque l'augmentation de la taille des particules due à la cimentation, celle de la résistance au cisaillement, la modification des propriétés de plasticité, la réduction du potentiel de déformation, l'absorption et liaison chimique de l'humidité qui faciliteront le compactage [8, 9]. Plus encore, la chaux vive provoque un abaissement de la teneur en eau du sol d'environ 1 % de la chaux ajoutée par une consommation de l'eau par hydratation de la chaux vive, un apport de produit sec qui réduit le rapport, et une évaporation favorisée par la réaction d'hydratation fortement exothermique [10].

Contrairement à la chaux, la minéralogie et la granulométrie des sols traités au ciment peuvent influencer sur la réaction car la poudre de ciment contient en elle-même tout ce dont elle a besoin pour réagir et former des produits cimentaires. Généralement, les réactions d'hydratation des ciments sont plus rapides que celles de la chaux, mais dans les deux cas, la résistance finale résulte de la formation de silicates de calcium hydratés (CSH) [11]. Selon la règle d'Ingles, on ajoute dans le sol 1 % en poids de chaux pour 10 % d'argile bien que sa teneur dans un sol dépasse les 80 %, mais il n'est pas autorisé d'ajouter plus de 8 % de chaux [12].

Melbouci *et al.* [8] ont trouvé, d'une part, que la marne présente une sensibilité à l'eau mais que le traitement à la chaux permet de limiter cette sensibilité, et d'autre part, que l'incorporation du ciment améliore les liaisons mécaniques, et donc améliore sa portance. Le sol marneux

à 2 % d'ajout atteint sa stabilité avec un gonflement très faible. Toutefois, le pourcentage de 2 à 5 % améliore nettement la résistance ciment-marne et la chaux reste le liant le plus stabilisant que le ciment.

Okagbue et Ochulor [13] ont obtenu que l'addition du ciment améliore et modifie les caractéristiques du sol, menant à un compactage performant avec une augmentation de la densité sèche. L'agglomération du ciment autour des grains de sol cause une augmentation de la taille des particules fines et peut aussi avoir une légère réduction de la teneur en eau optimale. L'addition du ciment affecte la distribution des particules du sol en augmentant la taille des particules fines, et de ce fait, réduit l'attraction d'eau. D'autre part, l'augmentation des limites de liquidité et de plasticité a été observée avec l'augmentation du dosage du ciment, cependant l'indice de plasticité diminue. Ces résultats sont justifiés par la dissolution des silicates et aluminates de particules d'argile due à un pH élevé produit par la réaction de la chaux et l'hydratation du ciment. Les matières dissoutes vont s'associer avec Ca^{2+} pour produire des agents de cimentation. C'est de cette façon que les particules d'argile adjacentes seront liées [13].

Cet article présente les résultats d'une étude expérimentale réalisée sur un sol schisteux de la ville d'El-Aouana dans la wilaya¹ de Jijel. Cette étude vise à déterminer les paramètres physico-chimiques et mécaniques de cette argile naturelle traitée avec des pourcentages de (0, 1 %, 3 % et 7 %) du ciment et de la chaux dans le but d'améliorer les propriétés géotechniques faibles du schiste aux fins de l'appliquer dans les couches de forme des chaussées.

2. Dispositif et programme d'essais

Afin de comparer les propriétés du sol humide traité avec de la chaux hydratée et du ciment portland, le programme expérimental comprend un sol argileux, deux agents stabilisants (Chaux hydratée et ciment Portland), quatre pourcentages de traitement avec un seul niveau de compactage.

2.1. Sol utilisé

Le sol utilisé dans cette étude est le schiste de classe granulaire 0/2 mm. Les échantillons de schiste sont

¹Subdivision administrative algérienne

prélevés à des profondeurs allant de 50 cm à 3 m au niveau du site de réalisation du nouveau pôle universitaire de la wilaya. Les caractéristiques d'identification sont regroupées dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 01
Caractéristiques physiques du sol schisteux.

| Caractéristiques | γ_s (KN/m ³) | W (%) | VBS |
|------------------|---------------------------------|-------|------|
| Valeurs | 27,80 | 12,33 | 3,16 |

Tableau 2
Limites d'Atterberg et les caractéristiques de l'essai Proctor du schiste

| Caractéristiques | W _L (%) | W _P (%) | I _P (%) | γ_{dopt} (t/m ³) | W _{Opt} (%) |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------------|----------------------|
| Valeurs | 41,20 | 21,39 | 19,81 | 1,80 | 14,80 |

Les résultats de l'analyse granulométrique du schiste de masse initiale 1 500 g sont présentés dans la figure 1. D'après la courbe granulométrique: $D_{10} = 0,001$ mm, $D_{30} = 0,03$ mm et $D_{60} = 0,07$ mm. Donc, les coefficients d'uniformité (Cu) et de courbure (Cc) sont: $Cu = 70$ (Courbe étalée) et $Cc = 30$ (Courbe mal graduée).

Les résultats DRX du schiste sont présentés dans la figure 2. L'analyse spectrale indique que le schiste utilisé est composé des minéraux suivants: Quartz² (Q), Calcite³(C), Dolomite⁴(D), Smectite (S), Montmorillonite (M) et de Bentonite (B). Selon la figure 2, le quartz est l'élément le plus abondant dans le schiste avec une intensité comprise entre 1 500 et 2 000 correspondants à $2\theta = 26^\circ$, suivis par la Montmorillonite qui a une intensité d'environ 500 à $2\theta = 21^\circ$. La Calcite est de très faible intensité et les autres composants correspondent à un mélange moins intense, ce qui implique que ce sol argileux est hétérogène. La fraction argileuse de schiste est constituée de montmorillonite et de quartz comme impuretés majeures dans notre échantillon.

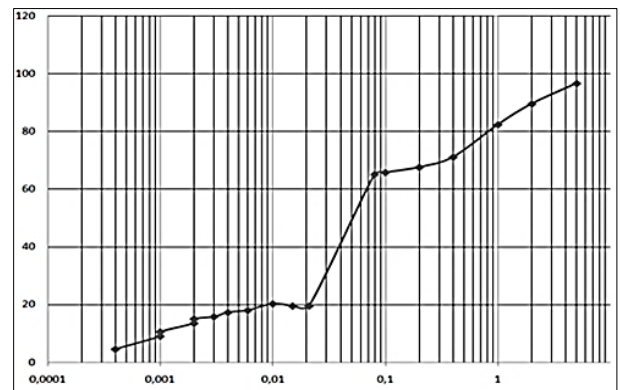


Figure 1 : Courbe granulométrique du schiste.

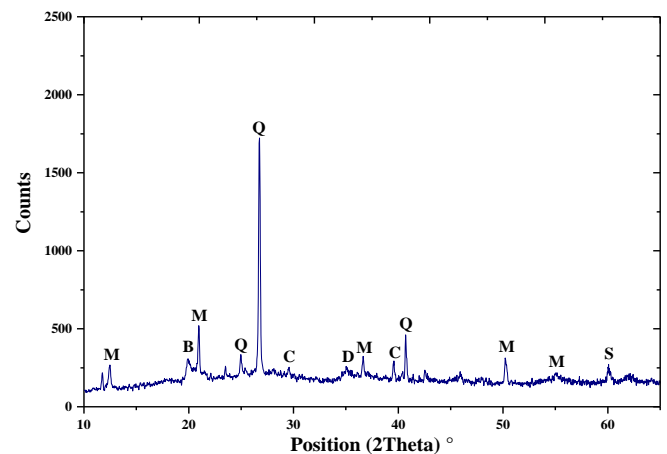


Figure 2 : Analyses DRX du schiste. Quartz (SiO₂), Calcite Ca (CO₃), Dolomite (CaMg(CO₃)₂), Smectite (S), Montmorillonite (M), Bentonite (B)

2.2. Ciment

Le ciment utilisé est le ciment de type ciment portland artificiel CEM I 42,5 N provenant de l'usine de Lafarge de la wilaya de M'sila, dont les caractéristiques physiques,

²SiO₂
³Ca(CO₃)

⁴CaMg(CO₃)₂

chimiques et minéralogiques sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 03
Analyse chimique du ciment.

| Composition chimique (%) | | Constituants des minéraux du clinker | | |
|--------------------------------|-------|--|----------------------|-----|
| SiO ₂ | 22,70 | Silicate tricalcique C3S (%) | 53,14 | |
| Al ₂ O ₃ | 4,90 | Silicate bi calcique C2S (%) | 22,51 | |
| Fe ₂ O ₃ | 4,01 | Aluminate tricalciques C3A (%) | 6,79 | |
| CaO | 63,85 | Aluminoferrite tétracalcique C4AF (%) | 12,13 | |
| MgO | 1,34 | Gypse (%) | 5 | |
| K ₂ O | 0,69 | Résistance à la compression à 28 jours (MPa) | 48,05 | |
| Na ₂ O | 0,47 | Retrait à 28 jours en (µm/m) | 830,28 | |
| SO ₃ | 1,29 | Expansion (Chaud) en (mm) | 0,75 | |
| CaO libre | 0,47 | Temps de prise à 20 °C | Début de prise (min) | 145 |
| | | | Fin de prise (min) | 276 |

2.3. Chaux

La chaux (Hydroxyde de calcium Ca(OH)₂) est une matière, généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Le tableau 4 présente les caractéristiques physiques et chimiques de la chaux utilisée selon la fiche technique de l'unité de production de la wilaya de Tébessa.

Tableau 04
Analyse chimique de la chaux.

| Composition chimique (%) | | | |
|--------------------------------|-------|-------------------|-------|
| SiO ₂ | 1,35 | MgO | 1,83 |
| Al ₂ O ₃ | 10,63 | K ₂ O | 0,151 |
| Fe ₂ O ₃ | 3,27 | Na ₂ O | 0,064 |
| CaO | 82,77 | SO ₃ | 0,11 |

3. Résultats et interprétations

Les propriétés étudiées à savoir : les limites d'Atterberg, la résistance au cisaillement, les caractéristiques du compactage (densité et la teneur en eau optimale) et les indices CBR sont représentés par les courbes qui suivent et ce, après avoir tenu compte des différents ajouts de chaux ou de ciment dont les proportions sont (0, 1 %, 3 % et 7 %).

3.1. Essai des limites d'Atterberg

Cet essai effectué au Laboratoire de Recherche en Génie Civil (LRGC) à l'université de Biskra (Algérie), par l'utilisation de l'appareil de Casagrande, a pour but de déterminer l'effet du ciment et de la chaux sur le schiste (Figure 3) selon la norme européenne NF P94-051. Les figures 4, 5 et 6 montrent l'évolution des limites de liquidité et de plasticité, et de l'indice de plasticité en fonction des différents pourcentages de ciment et de la chaux.



Figure 03 : Essai des limites d'Atterberg sur le schiste.

On remarque d'après la figure 4, que les valeurs de la limite de liquidité du schiste avec différents pourcentages de l'ajout du ciment sont supérieures à celles avec l'ajout de la chaux, et que cette limite diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage du ciment ou de la chaux. D'après la figure 5, les valeurs de la limite de plasticité du schiste avec ajout de la chaux sont supérieures à celles avec l'ajout du ciment. La limite de plasticité augmente jusqu'à la teneur 3 % de la chaux et atteint sa valeur maximale de 31,34 %, mais au-delà de 3 %, la valeur de W_p décroît linéairement jusqu'à 7 % de la chaux. La limite de plasticité du schiste augmente jusqu'au pourcentage de 1 % de ciment, puis diminue à 3 %, et enfin augmente de nouveau jusqu'à 7 % de l'ajout de ciment.

La figure 6 montre que l'indice de plasticité du sol schisteux diminue en fonction de l'augmentation de pourcentages de la chaux et du ciment. On peut justifier ces résultats par la réduction de l'argilosité par floculation (sol rigide, frottant) ou l'action des liants ajoutés sur les charges électriques des particules fines du schiste [10]. La floculation et l'agglomération sont les conséquences de l'échange cationique qui change la texture de l'argile d'une matière plastique et grains fins à un sol granulaire. Selon Boardman *et al.* [14], la floculation est attribuée à la forte teneur en électrolyte, au pH élevé et à la réduction de l'épaisseur à double couche à travers l'échange de cations.

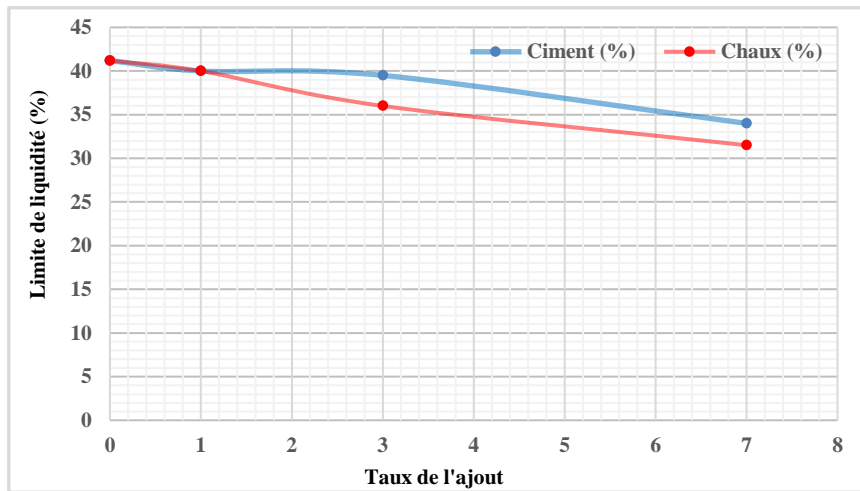


Figure 4 : Evolution de la limite de liquidité en fonction du pourcentage d'ajout des liants (Ciment et chaux).

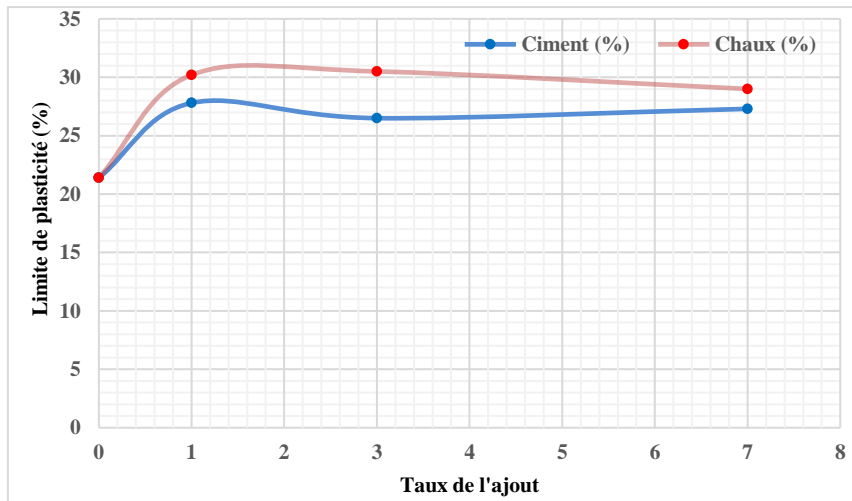


Figure 5: Evolution de la limite de plasticité en fonction du pourcentage d'ajout du ciment et de la chaux.

D'après les résultats obtenus dans les figures 3,4 et 5, on peut dire que l'addition du ciment à notre type de sol, avec des pourcentages de 1, 3 et 7 %, provoque une diminution de la limite de plasticité à cause de la floculation des particules d'argile. L'ajout du ciment a engendré une diminution de l'indice de plasticité. Cette diminution indique une amélioration de la maniabilité du sol. On constate aussi une augmentation de l'indice de consistance ce qui démontre une amélioration dans le comportement plastique du matériau. La réaction chimique

du ciment avec le sol est la cause principale de cette modification d'état. Plus encore, l'addition de la chaux à notre type de sol avec les mêmes pourcentages provoque une réduction de la limite de liquidité, une augmentation de la limite de plasticité, et donc une diminution de la sensibilité à l'eau. L'indice de plasticité décroît avec l'ajout de la chaux comme résultat de l'augmentation de la limite de plasticité. Ces évolutions provoquent un déplacement du domaine de plasticité vers l'état sec.

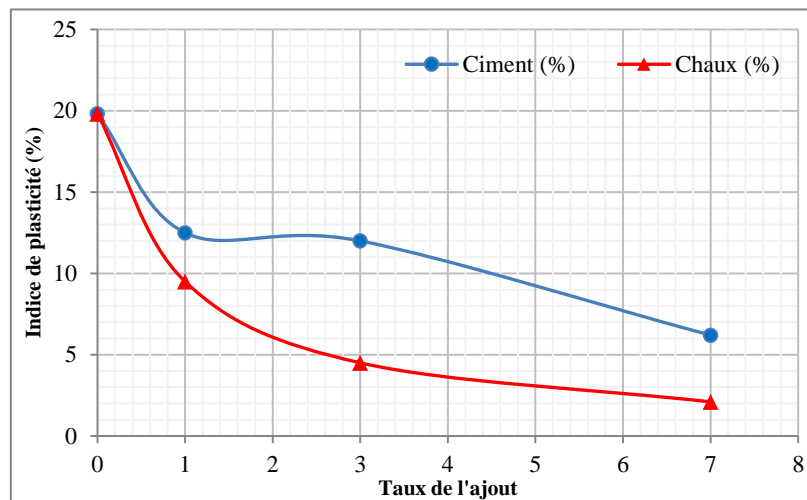


Figure 6 : Evolution de l'indice de plasticité en fonction du pourcentage d'ajout des liants (Ciment et chaux).

3.2. Essai de Proctor modifié

L'essai de Proctor modifié a été effectué au laboratoire par l'utilisation d'une mole Proctor CBR. Le compactage dans cet essai est beaucoup plus intense et il s'effectue en cinq couches successives avec la dame Proctor modifié par

l'application de 55 coups de dame dans chaque couche avec les teneurs en eau suivantes: 10 %, 12 %, 14 %, 16 % et 18 % selon la norme européenne NFP 94-093. Les résultats dans cet essai sont présentés dans les figures 7 et 8.

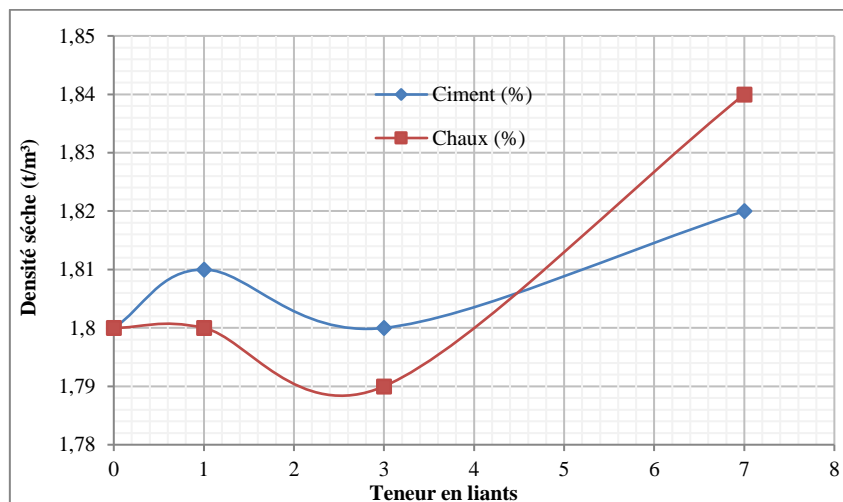


Figure 7: Evolution de la densité sèche optimale en fonction du pourcentage d'ajout des liants (Ciment et chaux).

La figure 7 montre que la densité sèche optimale la plus élevée est obtenue à 7 % d'ajout de chaux et du ciment correspond à la teneur en eau optimale la plus basse (sauf pour 3 % d'ajout). On peut dire que le retard au compactage du sol diminue la densité sèche pour 3% de l'ajout du ciment ou de la chaux car les produits d'hydratation commencent à relier des particules dans un état lâche et l'interruption de ces agglomérations est nécessaire pour densifier le sol qui ne pourrait pas retrouver sa pleine résistance. Par conséquent, une partie de l'énergie de

compactage est utilisée pour briser des cimentations. Donc, des densités maximales sont réduites aux retards de compactage accrus [14]. Pour les pourcentages de 3 % et 5 %, le ciment rigidifie mieux et plus rapidement les sols schisteux comparativement à la chaux. En outre, les ciments portland sont plus efficaces comparativement à la chaux [8]. L'augmentation de la densité sèche s'accompagne toujours d'une augmentation de la résistance mécanique, l'ajout de 7 % de la chaux amplifie

l'effet de la densité sèche sur la résistance à la compression avec une relation quasi-linéaire croissante [15].

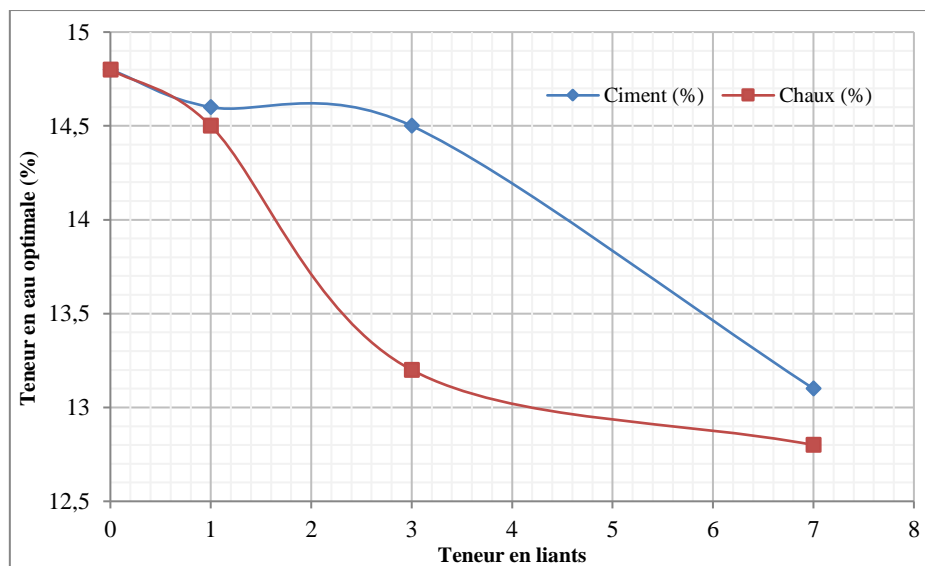


Figure 8: Evolution de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage d'ajout des liants (Ciment et chaux).

D'après la figure 8, on constate que la teneur en eau optimale diminue avec l'augmentation de pourcentages des teneurs en liants (Chaux ou ciment). On peut justifier cela que la diminution de la teneur en eau revient à la diminution de la surface spécifique des particules argileuses des mélanges traités par les grains fins de la chaux ou du ciment. Ces résultats sont en accord avec celle trouvés par Attima *et al.* [16]. Globalement, l'incorporation de 1 % de chaux ou du ciment provoque un abaissement de la teneur en eau de 1 % [10].

3.3. Essai des indices de CBR

Cet essai est effectué en utilisant une presse standard ou CBR d'une vitesse constante de 1,27 tr/mn et un piston de 19,6 cm de diamètre. Les échantillons du sol sont préparés avec différentes teneurs en eau (10 %, 12 %, 14 %, 16 % et 18 %) et de trois types de compactage (10 coupes, 25 coupes et 55 coupes) par couche dans le moule CBR selon la norme européenne NFP 94-078. La figure 9 présente la variation de l'indice de portance immédiat (IPI) en fonction du pourcentage des ajouts du ciment et de la chaux.

Selon la figure 9, l'addition de la chaux à notre type de sol avec différents pourcentages provoque une augmentation des valeurs de l'IPI. Donc, l'amélioration de la portance de l'argile traitée est expliquée par la diminution du volume des vides dans le sol due à la bonne

distribution des particules du sol avec les particules fines de la chaux. En effet, lors du mélange de la chaux avec une matière contenant des silicates et des aluminates, il se forme des aluminates et des silicates de calcium hydratés, qui en cristallisant, entraînent une véritable "prise" des matières en contact, tel est le cas de la prise du ciment.

Cette réaction, dite pouzzolanique, se traduit par une augmentation de la résistance à la compression simple, de l'indice CBR ou IPI et de la stabilité au gel [16]. La figure 9 montre que l'ajout de ciment dans notre type de sol avec différents pourcentages provoque une augmentation des valeurs de l'IPI, et on peut dire que l'amélioration de la portance de l'argile traitée est due à la diminution du volume des vides dans le sol et de l'augmentation de leur résistance mécanique à la compression. La portance des sols schisteux est améliorée après le traitement puisque l'indice CBR obtenu est de 4 à 5 fois plus élevé que pour un sol non traité, compte tenu de la rapidité de prise de la chaux comparativement au ciment CPA [8].

Selon Croisé [17], les ciments CPA sont caractérisés par un dégagement de la chaux libre au cours du durcissement. Ce dégagement, dont l'intensité va en décroissant, se prolonge pendant une longue période. Cette dernière propriété, qui joue un rôle important dans certains cas, améliore progressivement dans le temps les résistances mécaniques d'un sol traitée par CPA.

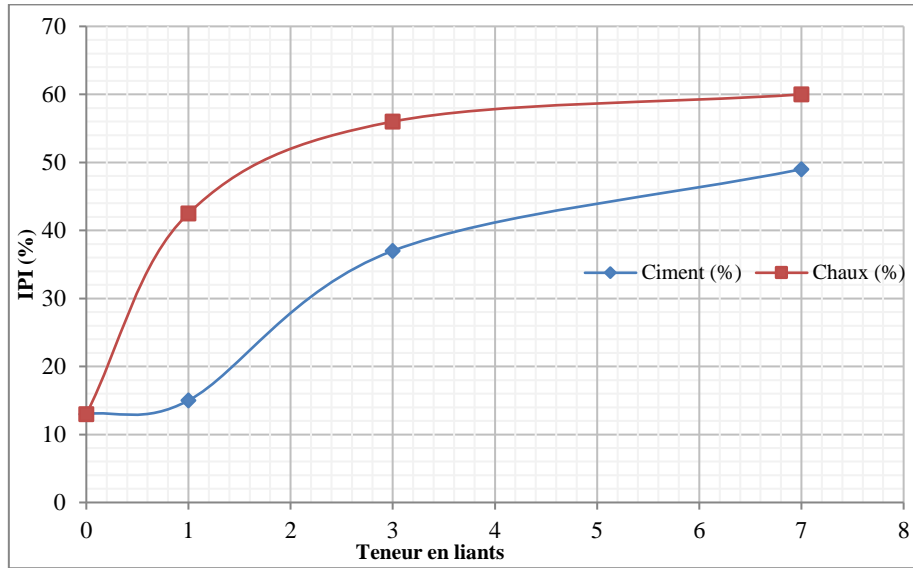


Figure9 : Evolution de l'IPI en fonction du pourcentage d'ajout des liants (Ciment et chaux).

3.4. Essai de cisaillement a la boite

La boite de Casagrande utilisée dans cet essai est placée sur un chariot, tel que le présente l'image ci-après (Figure 10), et est animé par un moteur d'un mouvement de translation à vitesse constante de (1mm/min). On applique sur l'échantillon du sol des contraintes normales 1, 2 et 3 bars, et on arrête la manipulation à 6 mm de déplacement. Les échantillons sont préparés avec différents pourcentages des liants (0, 1 %, 3 % et 7 %) et de ses teneurs en eau optimales équivalents. Cet essai est réalisé afin de déterminer l'évolution au cours du temps de l'angle de frottement et de la cohésion du sol avant et après le traitement selon la norme européenne NFP 94-071. Les

résultats de mesure de la cohésion (C) et de l'angle de frottement (ϕ) sont présentés par les figures 11 et 12.

D'après ces figures, nous remarquons que la cohésion et l'angle de frottement du sol traités au liants (Ciment ou chaux) augmentent de façon continue et en fonction de pourcentage de liants. Donc, on peut dire que les liants changent significativement les paramètres de cisaillement du sol, notamment pour la cohésion. Cette amélioration correspond à l'effet des phénomènes de floculation et agglomération qui résultent de l'échange cationique. Ces résultats sont confirmés par les travaux de Metcchell [8] qui a rapporté que le pourcentage d'ajout de l'ordre de 2 à 5% améliore nettement la résistance du sol traité par du ciment, donc la chaux est le liant le plus stabilisant.



Figure 10: essai de cisaillement à la boite.

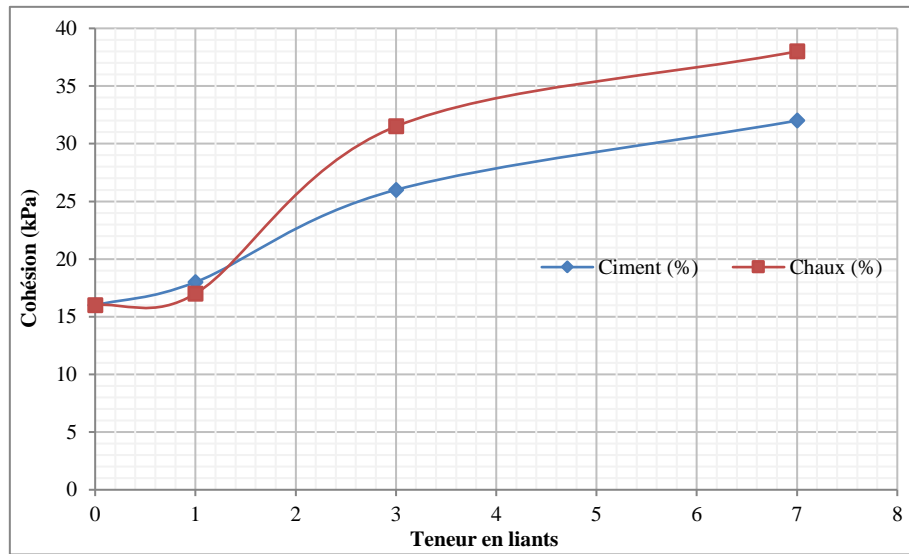


Figure 11: Evolution de la cohésion en fonction de la teneur de ciment et de la chaux.

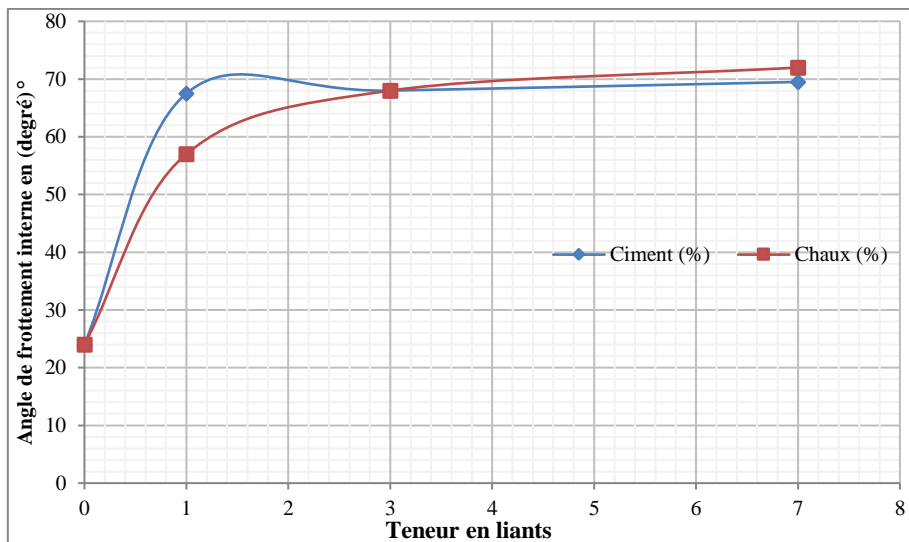


Figure 12: Evolution de l'angle de frottement en fonction de la teneur de ciment et de la chaux.

4. Conclusion :

D'après cette étude, on conclut ce qui suit :

- L'addition d'un liant (Ciment ou chaux) au sein du sol provoque une réduction de sa teneur en eau. Cette réduction peut s'expliquer par la réaction de floculation à cause de la présence de Ca^{+2} et OH^- qui entraîne une amélioration de la consistance et se traduit par une augmentation de la plasticité et, par la suite, un passage de l'état plastique vers l'état solide ;
- Des caractéristiques de compactage au Proctor modifiées ont été déterminées pour le sol naturel et pour les sols traités aux liants (Ciment ou chaux). D'après ces résultats,

il y a une amélioration de ces caractéristiques (augmentation de la densité sèche, et diminution de la teneur en eau). Les liants diminuent la densité sèche du sol schisteux sauf pour un ajout de 7 %. Plus la densité sèche augmente, plus la teneur en eau optimale diminue ;

- L'addition des liants (Ciment ou chaux) provoque une augmentation rapide de l'indice de portance immédiat en fonction du traitement. L'amélioration de cet indice est expliquée par la diminution du volume de vide entre les particules de notre sol.
- L'addition des liants (Ciment ou chaux) provoque une augmentation de la cohésion et de l'angle de frottement. L'amélioration de ces paramètres est expliquée par l'effet

du phénomène de floculation et d'agglomération qui résulte de l'échange cationique.

Références

- [1] Document technique, « Système Canadien de classification de sols », Direction Générale de la Recherche, Agriculture et Agro-alimentaire Canada, troisième édition, ISBN 0-660-96059-1, 2003.
- [2] Medjnoun A., Bahar R. et Khiatine M., Caractérisation et estimation du gonflement des argiles algériennes, cas des argiles de Médéa, MATEC Web of Conferences 11, 2014. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20141103004>
- [3] Mathon D., « Le retrait-gonflement des sols : les recherches récentes entreprises par le Cerema », 5^{ème} Congrès Maghrébin en Ingénierie Géotechnique (CMIG'16), Marrakech, 26-28 Octobre 2016. Disponible sur le compte ResearchGate de l'auteur : https://www.researchgate.net/profile/David_Mathon
- [4] Thomas W.K., Robert S., Richard J.H. and Maghsoud T., An evaluation of lime and cement stabilization, Transportation research record 1119 (1987): 11-25, Engineering. Disponible en ligne sur URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/01d1>
- [5] Bouasker M., Kharrat A., Al-Mukhtar M., « Comportement hydromécanique des argiles traitées à la chaux : Effet de la variation du poids volumique et de la teneur en eau », 29^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil, Tlemcen, Algérie, 29 au 31 mai 2011. Version électronique disponible en ligne sur URL : <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/619>
- [6] Masoud K., Ghorbani A., Daghigh Y., Saeed K.A. and Parham R., "Stabilization of silty sand soils with lime and microsilica admixture in presence of sulfates", Pan-Am CGS geotechnical conference, 2011. Version électronique disponible en ligne sur URL : <https://www.researchgate.net/publication/318635540>
- [7] Forat A. and Erdini M., Study of selected soil stabilization material and the cost impact, OSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE, 16 (05) (2019): 56-61. Version électronique disponible en ligne sur URL : <http://iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol16-issue5/Series-2/H1605025661.pdf>.
- [8] Melbouci B., Etude comparative du traitement du sol marneux à la chaux et au ciment dans les couches de forme des chaussées, Communication Science and technology, COST, ENSET Oran, 18 (2017) 79-98. Disponible sur le compte ResearchGate de l'auteur : https://www.researchgate.net/profile/Bachir_Melbouci
- [9] Bayat M., Asgari M.R. and Mousivand M., "Effects of cement and lime treatment on geotechnical properties of a low plasticity clay", International conference on civil engineering architecture and urban sustainable development, 27-28 November 2013, Tabriz, Iran. Disponible sur le compte ResearchGate de l'auteur : https://www.researchgate.net/profile/Meysam_Bayat
- [10] Brabet I., « Le traitement des sols pour la couche de forme, plateforme de chaussée », Mémoire d'ingénieur CNAM, conservatoire national des arts et métiers, Paris, 2012. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01103974/document>
- [11] Afolayan O.D., Evaluation of the effect of lime and cement on the engineering properties of selected soil in a university in southwestern Nigeria, Journal of advancement in engineering and technology, 5 (04) (2017). Version électronique disponible en ligne sur URL : <http://scienceq.org/Journals/JAET.php>
- [12] Bell F.G., Lime stabilization of clay minerals and soils, Engineering geology, 42 (1996): 223 - 237. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- [13] Okagbue C.O. and Ochulor O.H., The potential of cement-stabilized coal-reject as a construction material, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66 (2) (2007): 143-151. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0033-y>
- [14] Tran V.D., « Étude de l'amélioration des sols par traitement à la chaux », Mémoire de master en génie civil, université de Liège, Belgique, 2013. Version électronique disponible sur URL : https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/2340/1/2012_2013_TRA_N-Van_Duy.pdf
- [15] Bouasker M., Kharrat A. et Al-Mukhtar M., « Comportement hydromécanique des argiles traitées à la chaux : effet de la variation du poids volumique et de la teneur en eau », XXIXe rencontres universitaires de génie civil, Tlemcen, Algérie, 29-31 mai 2011.
- [16] Attima Z., Dekayir A., Doss Bennani M.A., Elhammouti K., « Stabilisation des sols argileux par la chaux », Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur JNGG2014, Beauvais, 8-10 juillet 2014. Version électronique disponible sur URL : <https://www.cfm-roches.org/sites/default/files/jngg/192.pdf>
- [17] Croisé R., Traitement des sols aux liants hydrauliques, Revue Forestière Française, 5 (1964) : 427-438. <https://doi.org/10.4267/2042/24658>