

EFFET DU SABLE DE DUNES ET DE LA CHAUX SUR LES PROPRIETES GEOTECHNIQUES DES SOLS ARGILEUX

EFFECT OF DUNE SAND AND LIME ON THE CLAYEY SOILS GEOTECHNICAL PROPERTIES

KH. HARICHANE¹, M. GHRICI¹, H. BELHIRECHE¹, Y. ABDELGHANI¹

¹Laboratoire Géomatériaux, Université Hassiba Benbouali de Chlef, kharichane@yahoo.fr, m_ghrici@yahoo.fr

Date de réception : 2016/03/15 / Date d'acceptation : 2016/11/09 / Date de publication : 2017/04/30

RÉSUMÉ

Aujourd'hui, dans un contexte de développement durable, les enjeux économiques et environnementaux incitent, lors des travaux de terrassement, à valoriser les matériaux locaux présentant parfois des caractéristiques mécaniques inadéquates pour être employés. La stabilisation des sols en les mélangeant avec des additifs tels que le ciment et la chaux est une solution potentielle pour atteindre cet objectif, puisqu'elle permet de modifier le comportement mécanique et la maniabilité des sols afin de les rendre aptes au terrassement. Le but de cet article est d'étudier l'effet de l'utilisation de la chaux, du sable de dunes ou la combinaison des deux sur les caractéristiques géotechniques des sols argileux instables. Les échantillons ont été soumis aux essais des limites d'Atterberg, aux essais de compactage et aux essais de compression non confinée. La chaux ou le sable de dunes a été ajouté au sol argileux aux teneurs de 0-8% et de 0-20% respectivement. En outre, des combinaisons de chaux-sable de dunes ont été formulées aux mêmes teneurs. Les échantillons ont été soumis à la cure pendant 1, 7 et 28 jours. Après ces échéances, ils sont testés à la compression non confinée. En se basant sur les résultats expérimentaux, il peut être conclu qu'il y a une diminution importante de l'indice de plasticité pour les échantillons stabilisés avec la combinaison chaux-sable de dunes. En outre, l'utilisation de la combinaison chaux-sable de dunes modifie la classification du sol argileux selon le diagramme de plasticité de Casagrande. De plus, en se basant sur les résultats favorables obtenus des résistances de compression, il peut être conclu que le sol argileux peut être stabilisé avec succès par l'action combinée de la chaux et des sables de dunes. Finalement, l'addition de sable de dunes dans le mélange sol-chaux peut en particulier devenir attractive et peut avoir comme conséquence la réduction des coûts de la construction.

MOTS-CLÉS: Argile, Chaux, Sable de dunes, Stabilisation, Résistance.

ABSTRACT

Today, in the context of durable development, economic and environmental issues motivate, during earthworks, to promote local materials which sometimes present inadequate mechanical properties to be used. Soils stabilization by mixing soils with additives such as cement, lime and fly ash is a potential solution to achieve this goal, since it allows modifying the mechanical behavior and handling of soils to make them suitable for earthworks. The aim of this project is to study the effect of using lime, dune sand or a combination of both on the geotechnical characteristics of clayey soil. Test specimens were subjected to Atterberg limits tests, compaction tests and unconfined compression tests. Lime or dunes sand were added to clayey soil at ranges of 0-8% and 0-20% respectively. In addition, combinations of lime-dune sand were added to clayey soil at the same ranges. Specimens were cured for 1, 7, and 28 days after which they were tested for unconfined compression tests. Based on the experimental results, it was concluded that an important decrease of plasticity index was observed for the samples stabilized with the combination lime- dune sand. In addition, the use of the combination lime-dunes sand modifies the clayey soil classification according to the Casagrande plasticity chart. Moreover, based on the favourable result of compression strength obtained, it can be concluded that clayey soil can be successfully stabilized by the combined action of lime and dune sand. Finally, since dune sand are much cheaper than lime, the addition of dune sand to lime-soil mixture may particularly become attractive and can result in cost reduction of construction.

KEYWORDS: Clay, Lime, Sand dune, Stabilization, Strength.

1. INTRODUCTION

Certains sols en raison de leurs propriétés géotechniques sont considérés comme des sols instables créant donc un handicap économique et technique pour les différentes parties impliquées dans ce domaine. Ces sols donc nécessitent une certaine amélioration pour augmenter leur stabilité mécanique et améliorer leur performance. A l'époque, les ingénieurs pouvaient éviter de construire sur des sites inappropriés chaque fois que les conditions requises pour la construction n'étaient pas remplies. Par conséquent, la facilité de construire et d'obtenir les matériaux appropriés étaient les conditions qui régissaient le choix du site plutôt que les facteurs économiques. Il est évident que les projets de construction nécessitent des sols de bonnes propriétés géotechniques. Toutefois, il a été difficile de trouver des sites adéquats pour la construction ou encore les matériaux de bonne qualité répondant à une exigence économique acceptable. Les sols mous avec des propriétés géotechniques médiocres sont fréquemment rencontrés et par conséquent il est nécessaire d'améliorer leurs propriétés afin de rendre ces sols acceptables pour d'éventuels projets de construction [1]. Par ailleurs, les premiers essais impliquant la stabilisation des sols ont été effectués aux Etats Unis en 1904. Ce processus a été largement utilisé pendant la seconde guerre mondiale pour la construction des routes.

L'amélioration des propriétés du sol appelée aussi stabilisation des sols est une technique introduite depuis de nombreuses années avec le but principal de rendre les sols capables de satisfaire les exigences des projets techniques spécifiques. La stabilisation des sols argileux a été pratiquée longtemps en utilisant des ajouts cimentaires seuls ou combinés à la chaux et/ou le ciment [2]. La chaux comme additif apporte plusieurs changements bénéfiques des propriétés géotechniques des sols traités [3-18]. Plusieurs études ont été effectuées par différents chercheurs sur l'utilisation des ajouts cimentaires tels que le calcaire, les cendres volantes, les cendres des gousses de riz, la fumée de silice et la poussière de ciment [8, 12, 19-29].

Cependant, il y a un manque d'investigation expérimentale sur l'utilisation du sable de dunes seul ou combiné avec la chaux pour les applications d'amélioration des sols. Il est à noter que les ajouts cimentaires ainsi que le sable de dunes sont disponibles en Algérie en grandes quantités et à faible coût qui laissent prévoir que l'utilisation de ces ajouts reste prometteuse. De plus le sable de dunes se trouve en abondance dans les zones étendues du Sahara au sud de l'Algérie. L'utilisation du sable de dunes seul ou combiné à la chaux doit faire l'objet d'une investigation expérimentale approfondie. Comme le sol est une bonne source d'alumine alors les effets de traitement par la chaux peuvent être améliorés dans une large mesure si le manque apparent en silice peut être adéquatement complété par l'ajout du sable de dunes qui contient une teneur élevée en silice réactive.

Ce travail présente les résultats de l'effet de l'utilisation de la chaux, du sable de dunes ainsi que leurs combinaisons sur la plasticité, les caractéristiques du compactage et la résistance à la compression non confinée.

2. INVESTIGATION EXPÉRIMENTALE

2.1- Matériaux utilisés

A travers la géologie des terrains de la région de Chlef, des sols peu convenables présentant une faible capacité de portance, une plasticité élevée couplées à une stabilité faible et un tassement élevé ou un gonflement excessif sont fréquemment rencontrés. De plus, le choix des ajouts minéraux utilisés s'est porté sur leur disponibilité à travers le territoire national.

2.1.1- Sols

Le sol utilisé dans cette étude a été obtenu à partir d'un site (projet de remblai) situé approximativement à 18 km au Nord-Est de la ville de Chlef (Fig. 1). Le sol a été extrait à une profondeur d'environ 4 à 5m. Après l'extraction, le sol a été placé dans des sachets en plastique et transporté au laboratoire pour préparation et exécution des essais géotechniques d'identification et de caractérisation. Au laboratoire, nous avons procédé au concassage et broyage des échantillons des sols prélevés à l'aide d'un broyeur à disque pour avoir une mouture 0/2 mm.



Figure 1 : Sol gris. / Figure 1 : Grey soil.

Les différentes caractéristiques physiques et mécaniques du sol argileux utilisé ainsi que sa classification ont été déterminées suivant les normes américaines ASTM (Tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques géotechniques du sol
Table 1 : Soil geotechnical characteristics

Caractéristiques de base	Sol
Couleur	gris
Profondeur	4m
Teneur en eau naturelle (%)	32.87
Densité spécifique	2.71
Eléments passant au tamis 80 μ m (%)	85
Limite de liquidité (%)	78.42
Limite de plasticité (%)	30.73
Indice de plasticité (%)	47.69
Classification (USCS)	CH
Teneur en eau optimale (%)	26.47
Densité sèche maximale (KN/m ³)	14.65
Résistance à la compression (KPa)	71.46

2.1.2- Sable de dunes

Le sable de dunes choisi pour l'étude se trouve à Boudda, soit à 20 km à l'Ouest de la ville d'Adrar. Les coordonnées géographiques de ce site sont : 28°02'31.90" N et 00°27'12.90" E.

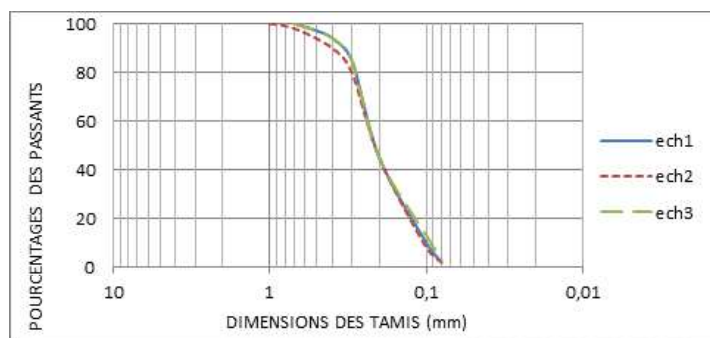
Les caractéristiques physiques du sable de dunes sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Caractéristiques physiques du sable de dunes

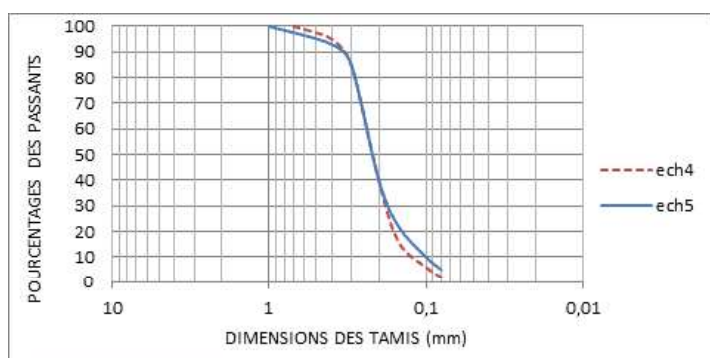
Table 2: Physical characteristics of sand dune

ECH.	Granulométrie			Limites d'Atterberg		VBS	ES (%)
	Dmax (mm)	< 2mm (%)	< 0.08mm (%)	W _L (%)	IP (%)		
E1	1	100	3	18	N.M	-	75
E2	1	100	4	20	N.M	0.05	72
E3	1	100	3	20	N.M	0.05	-
E4	0.5	100	2		N.M	0.08	78
E5	1	100	3	18	N.M	-	70

Les courbes granulométriques des échantillons du sable de dunes sont présentées sur la Fig. 2.



(a) Echantillons 1-2-3



(b) Echantillons 4-5

Figure 2 : Courbes granulométriques
Figure 2 : Particle size Curves

2.1.3- Chaux

La chaux est obtenue par cuisson de roches calcaires dans des fours droits ou rotatifs à une température variable de 900 à 1250°C. On distingue plusieurs natures de chaux, selon la composition chimique de la roche d'origine. La chaux utilisée dans cette étude est une chaux vive produite par une société locale. Les propriétés

physiques et chimiques de cette chaux sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Propriétés physiques et chimiques de la chaux

Table 3: Physical and chemical properties of lime

Nom chimique	Chaux (%)
Apparence physique	Poudre blanche sèche
CaO	83.3
MgO	0.5
Fe ₂ O ₃	2
Al ₂ O ₃	1.5
SiO ₂	2.5
SO ₃	0.5
Na ₂ O	0.4 - 0.5
CO ₂	5
CaCO ₃	10
Densité spécifique	2
Plus de 90 µm (%)	10
Plus de 630 µm (%)	0
Matériau insoluble (%)	1
Densité apparente (g/l)	600-900

2.2- Déroulement des essais

2.2.1- Détermination des Limites d'Atterberg

La consistance d'un sol peut varier dans de larges limites avec la quantité d'eau interstitielle que contiennent ses pores et l'épaisseur des couches d'eau adsorbées qui enrobent ses grains. Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques conventionnelles qui marquent les seuils entre le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique (limite de liquidité) et le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide (limite de plasticité). Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considéré, exprimée en pourcentage du poids du matériau sec. La différence entre la limite de liquidité et de plasticité qui définit l'étendue du domaine plastique est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité. Les limites d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité) ont été déterminées selon la norme ASTM D4318 [27]. Les sols préalablement broyés (mouture 0/2) et séchés à l'air (passant au tamis N°40) ont été initialement mélangés à l'état sec avec des quantités prédéterminées de sable et de la chaux ou de la combinaison des deux ajouts. Ensuite, l'eau distillée a été ajoutée au mélange. Pour améliorer la diffusion de l'eau dans le mélange, la pâte a été placée dans un récipient hermétique pendant 24 heures avant l'essai.

2.2.2- Détermination des caractéristiques de compactage

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un sol dénommées respectivement la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale, sont des caractéristiques très utilisées pour identifier les sols et pour définir les spécifications de compactage qui leurs sont applicables lorsqu'ils sont utilisés dans la construction des remblais, des couches de forme et des assises de chaussées. Les caractéristiques de compactage Proctor ont été déterminées selon la norme ASTM D698 [28].

2.2.3- Détermination de la résistance à la compression non confinée

Afin d'évaluer l'effet des ajouts (sable et chaux) ainsi que leur combinaison sur la capacité de portance des sols fins argileux, des essais de la résistance à la compression non confinée ont été effectués sur les échantillons du sol conformément à la norme ASTM D2166 [29]. Chaque échantillon est compacté dans un moule cylindrique à la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale déduites des essais de compactage. Après démoulage, les échantillons sont stockés dans des boîtes en plastique pour prévenir d'éventuelles pertes d'humidité. Il s'agit d'une cure qui concerne la conservation des échantillons dans des conditions de température ambiante ($T = 20^{\circ}\text{C}$) et d'hygrométrie constante. Les échantillons confectionnés sont stockés pour une durée déterminée avant les essais de la résistance à la compression non confinée. La durée de cure est de 1 jour, 7 jours et 28 jours. A la fin de la durée de cure, les échantillons sont soumis aux essais de la résistance à la compression.

2.3- Combinaisons des échantillons étudiés

Plusieurs combinaisons de la chaux et du sable de dunes ont été utilisées pour la stabilisation du sol. Les teneurs de la chaux sont de 0, 4, et 8%, tandis que celles du sable de dunes sont de 0, 5, 10, 15 et 20%. Un total de 15 combinaisons a été étudié (tableau 4).

Tableau 4: Combinaisons des échantillons du sol stabilisé
Table 4: Combinations of the stabilized soil samples

Code éch.	Sol (%)	Chaux (%)	Sable (%)
S0L0	100	0	0
S0L4	96	4	0
S0L8	92	8	0
S5L0	95	0	5
S10L0	90	0	10
S15L0	85	0	15
S20L0	80	0	20
S5L4	91	4	5
S10L4	86	4	10
S15L4	81	4	15
S20L4	76	4	20
S5L8	87	8	5
S10L8	82	8	10
S15L8	77	8	15
S20L8	72	8	20

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1- Limites d'Atterberg

3.1.1- Variation de la limite de liquidité

La limite de liquidité (w_L) est la teneur en eau du sol qui correspond conventionnellement à une fermeture sur 1 cm des lèvres de la rainure après 25 chocs. La limite de liquidité du sol naturel est de 78,42%. Par ailleurs, la limite de plasticité (w_p) est

la teneur en eau conventionnelle d'un rouleau de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint 3mm. Elle est obtenue sur la base de la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues à partir de 03 essais. La limite de plasticité du sol naturel est de 30,73%. Enfin, l'indice de plasticité est calculé à partir de la différence entre les valeurs des limites de liquidité et de plasticité. Pour le sol naturel, l'indice de plasticité est évalué à 47,69%. La Fig. 3 montre la variation de la limite de liquidité en fonction de la teneur des stabilisants.

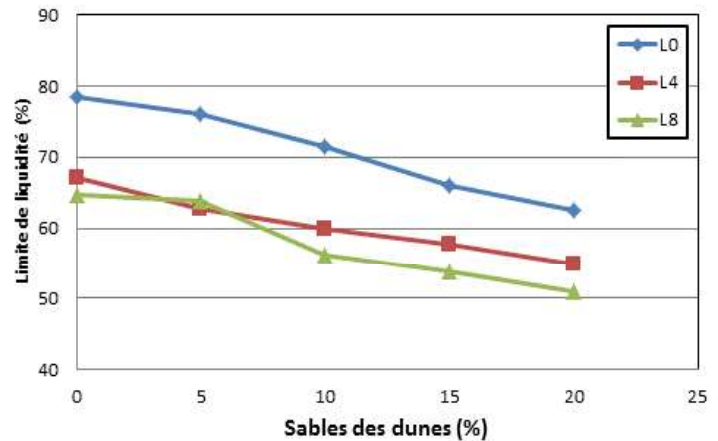


Figure 3: Variation de la limite de liquidité.
Figure 3: Variation of the liquid limit.

La limite de liquidité a diminué de 78,42% à 64,77% pour une teneur de la chaux de 8%. Le même comportement a été observé par différents chercheurs [30, 31]. Kavak et al. [30] ont montré que la limite de liquidité diminue de 71% à 58% pour une teneur de la chaux de 6%. En outre, Osula [31] a observé que la limite de liquidité a diminué de 40% à 30% avec l'augmentation de la teneur en chaux. La diminution ou l'augmentation des limites de liquidité dépendent du type de sol. De plus, La diminution de la limite de liquidité se produit pour les sols argileux montmorillonitiques tandis que l'augmentation de la limite de liquidité se produit pour les sols argileux kaolinitiques [3, 32]. La réduction de la limite de liquidité est attribuée à l'échange cationique provoqué dans le sol par les ions divalents de Calcium [12]. D'ailleurs, les argiles présentant des cations de valence inférieure tels que le Sodium montrent un échange cationique significatif et par conséquent une réduction notable de la limite de liquidité pour une augmentation de la teneur de la chaux [33-35]. L'addition de sable de dunes fait diminuer considérablement la limite de liquidité de 78,42% à 62,41% pour une teneur en sable de 20%. Des tendances semblables de ce comportement ont été rapportées par plusieurs chercheurs [36-38]. Ashis Kumar Bera [39] a remarqué que l'addition de 20% de sable de dunes a diminué la limite de liquidité de 58% à 48%. Pour la combinaison 4% chaux + sable de dunes, on remarque qu'il y a une diminution de la limite de liquidité de 66,54% jusqu'à 54,8% pour une teneur en sable de 20%. Le même comportement est observé pour la combinaison 8% chaux + sable de dunes. Une diminution de la limite de liquidité de 64,77% à 50,93% est notée.

3.1.2- Variation de la limite de plasticité

La variation de la limite de plasticité en fonction de la teneur des stabilisants est montrée sur la Fig. 4.

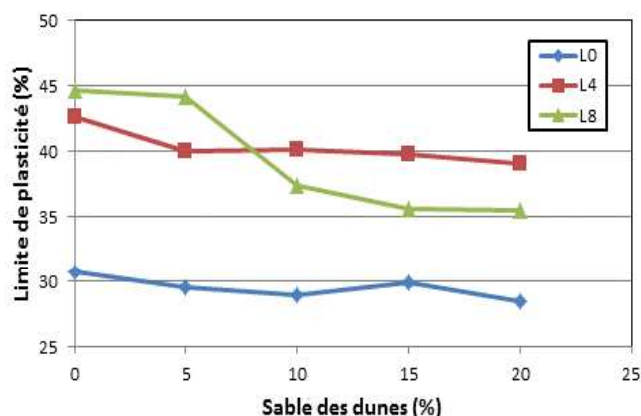


Figure 4: Variation de la limite de plasticité.

Figure 4: Variation of the plastic limit.

La limite de plasticité a augmenté de 30.73% à 44.65% pour une teneur de la chaux de 8%. Le même comportement est observé par Osula [31] où la limite de plasticité a augmenté de 16,5% à 21% pour une teneur de la chaux de 3%. Une augmentation considérable a été mentionnée dans les travaux de Kavak et al. [30]. L'augmentation immédiate de la limite de plasticité est due à la floculation des particules du sol. Par conséquent, la limite de plasticité est le meilleur indicateur de la valeur du seuil de la chaux nécessaire pour atteindre la modification requise [12].

Concernant le sable de dunes, la limite de plasticité a diminué de 30.73% à 28,43% pour une teneur en sable de 20%. La même tendance est observée par plusieurs chercheurs [36, 37] qui ont montré que la stabilisation des sols argileux médiocres par l'ajout du sable seul provoque une diminution considérable de la limite de plasticité. Ashis Kumar Bera [39] a remarqué que l'addition de 20% de sable de dunes a fait diminuer la limite de plasticité de 33% à 29%. Il a conclu que cette diminution est due probablement à l'augmentation des grains de sable par rapport au sol fin, le sol devient donc plus friable en provoquant une diminution de la limite de plasticité.

Pour l'effet de la combinaison de sable de dunes et de la chaux sur la limite de plasticité du sol à améliorer, nous avons constaté que le sable de dunes aux différentes teneurs avait un effet notable sur la limite de plasticité. Pour la combinaison 4% chaux+ sable de dunes on a remarqué une diminution considérable de la limite de plasticité de 42,67% à 39,11%, de même pour la combinaison 8% chaux+sable de dunes où une diminution notable de la limite de plasticité de 44,65% à 35,46% a été observée.

3.1.3- Variation de l'indice de plasticité

La variation de l'indice de plasticité du sol fin traité avec les différents stabilisants est présentée sur la Fig. 5.

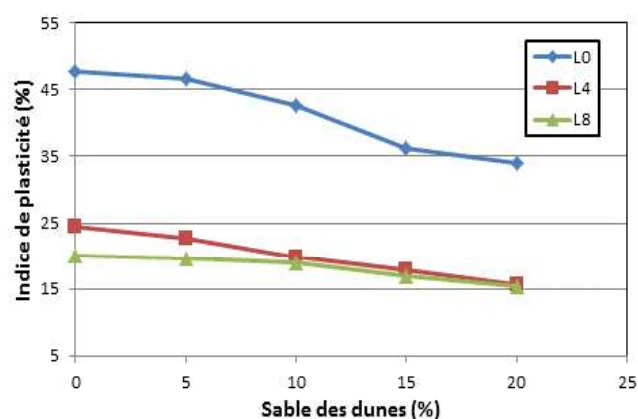


Figure 5: Variation de l'indice de plasticité.

Figure 5: Variation of the plasticity index.

La diminution de l'indice de plasticité indique une amélioration dans la maniabilité du sol. Comme indiqué sur la figure, l'indice de plasticité pour le sol argileux étudié a diminué immédiatement après addition de la chaux. Il est évident qu'une addition de 8% de chaux est suffisante pour augmenter la maniabilité du sol en réduisant l'indice de plasticité de 47,69% à 20,12%. Le même comportement est observé par Harichane et al. [40] où l'indice de plasticité a diminué de 52,02% à 19,92% pour une teneur en chaux de 8%. De plus, la même tendance est observée par Nalbantoglu [14] où l'indice de plasticité a diminué de 45,6% à 13,5% pour l'addition d'une teneur en chaux de 7%. Plusieurs chercheurs ont montré la même tendance dans leurs travaux de recherche [5, 10, 13, 34, 35, 41]. Concernant l'utilisation de sables de dunes, l'indice de plasticité a diminué considérablement de 47,69% à 33,98% pour une teneur de 20% de sable. Des résultats semblables ont été observés par certains chercheurs [38, 39].

L'utilisation de la combinaison chaux et sable de dunes a montré un effet notable dans la réduction de l'indice de plasticité comparé à la chaux utilisée seule. On remarque que l'indice de plasticité minimal est obtenu pour une teneur en sable de 20% combiné à 4% ou 8% de chaux. Par conséquent, on peut conclure que la teneur en chaux de 4% présente un dosage optimal.

3.1.4- Effet des stabilisants sur la classification du sol fin

Les résultats des essais des limites d'Atterberg ont été reportés sur le diagramme de plasticité de Casagrande afin de déterminer la nouvelle classification du sol traité dans le système unifié de classification (USCS). La Fig. 6 montre le changement de classe du sol après l'addition des différentes teneurs de la chaux et/ou du sable de dunes.

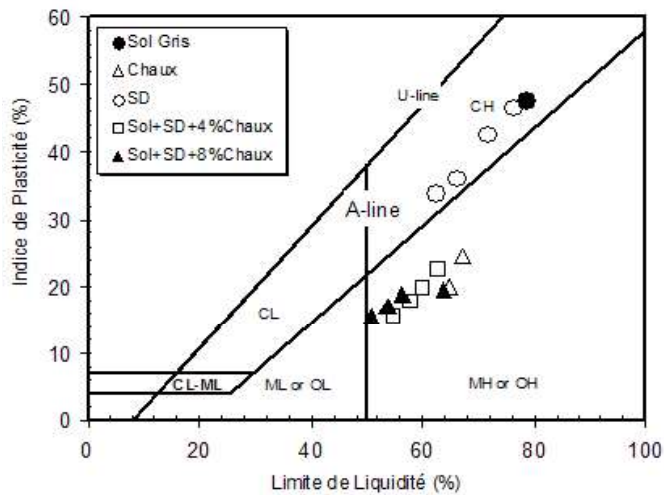


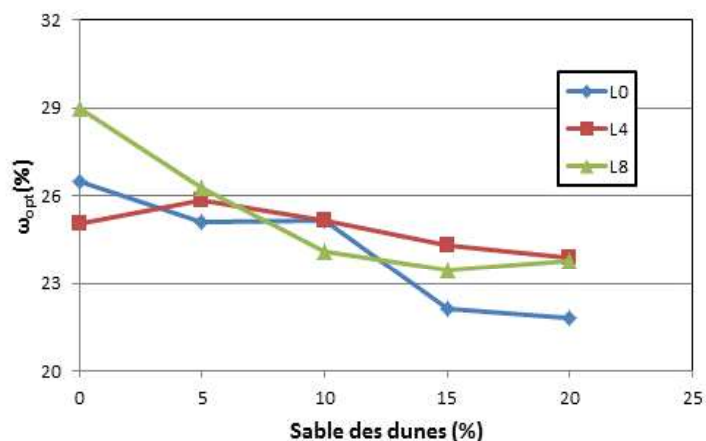
Figure 6: Evolution du classement du sol argileux gris amélioré.

Figure 6: Evolution of the classification of the stabilized grey clayey soil.

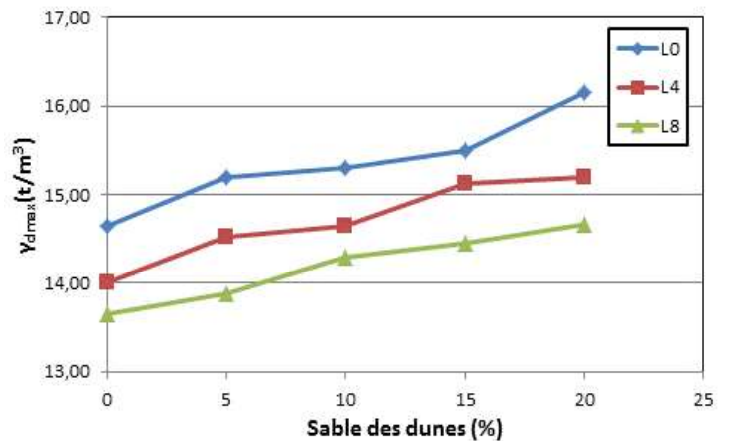
On voit clairement sur la Fig. 6 que le sol fin gris est classé en tant qu'argile de classe CH, le point représentant la classe de ce sol était au-dessus de la ligne A. L'ajout du sable de dunes au sol gris ne modifie pas la classe du sol et reste dans la classe CH et puis passe sous la ligne A quand la teneur de tous les stabilisants est augmentée. Par conséquent, l'argile de classe CH a été transformée en un sol de classe MH. Les changements des classes des sols sont attribués à la floculation des argiles stabilisées avec la chaux et le sable de dunes. En d'autres termes, la modification des caractéristiques de plasticité du sol argileux gris provoquée par l'influence du sable de dunes et la chaux est susceptible d'être adéquate pour que la plupart des opérations de construction continuent à s'exécuter dans des conditions environnementales sévères.

3.2- Caractéristiques du compactage

La Fig. 7 montre l'effet de la chaux, du sable de dunes et de leurs combinaisons sur les caractéristiques de compactage (densité sèche maximale et teneur en eau optimale) du sol argileux gris traité.



(a) - Variation de la teneur en eau optimale



(a) Variation de la densité sèche maximale

Figure 7: Variation des caractéristiques du compactage.

Figure 7: Variation of characteristics of compaction.

En ajoutant la chaux, la densité sèche maximale diminue et la teneur en eau optimale augmente. Un comportement similaire a été observé par différents chercheurs qui ont effectué des essais de compactage sur des sols argileux améliorés par la chaux [3, 4, 6, 15, 18, 30, 32, 34, 35, 40-43]. L'explication de ce comportement est probablement une conséquence des raisons suivantes :

- 1) la chaux entraîne l'agrégation des particules par le procédé complexe d'échange cationique aboutissant à une modification de la granulométrie du sol et provoquant par conséquent les particules du sol à occuper de plus grands espaces (structure plus ouverte).
- 2) la densité spécifique de la chaux est généralement faible par rapport à celle du sol naturel testé.
- 3) les réactions pouzzolaniques entre les particules d'argile et la chaux dans le sol sont responsables de l'augmentation de la teneur en eau optimale vu que ce processus augmente l'affinité du sol à l'eau.

Concernant l'addition du sable de dunes au sol à traiter, la figure 7 montre qu'il y'a une influence considérable du sable de dunes sur les caractéristiques de compactage. Généralement, on remarque une diminution de la teneur en eau optimale et une augmentation de la densité sèche maximale. Ce comportement est semblable à un sol fin traité avec du ciment. Globalement, la stabilisation du sol argileux gris par l'addition de sable de dunes combiné à la chaux a montré une diminution de la teneur en eau optimale et une augmentation de la densité sèche maximale. Cette observation reste valable pour les combinaisons 4% chaux+sable et 8% chaux+sable avec les différentes teneurs de sable [36-39]. Plusieurs chercheurs ont révélé que le changement de la densité sèche maximale se produit en raison de la dimension des particules et des densités spécifiques du sol et des ajouts.

3.3- Résistance à la compression

La résistance à la compression du sol naturel est de l'ordre de 71.5 kPa. Les résultats de l'effet de la chaux, du sable de dunes et de leurs combinaisons sur la résistance à la compression sont présentés sur la Fig. 8.

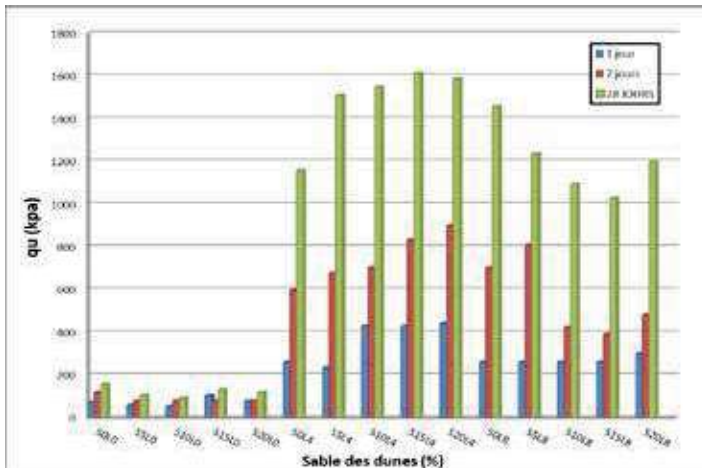


Figure 8: Effet des ajouts sur la résistance à la compression.

Figure 8: Effect of additions on the compressive strength.

L'addition de la chaux fait augmenter la résistance à la compression des échantillons du sol argileux stabilisé. Ceci est en parfaite concordance avec d'autres résultats des travaux de recherche antérieurs effectués par différents chercheurs [3-5, 15, 18, 34, 35, 41, 44-47]. Cette augmentation de la résistance à la compression est attribuée à la réaction de la chaux avec les particules du sol argileux ce qui se traduit par la formation d'agents de cimentation liant ainsi les particules du sol entre elles. En général, la résistance à la compression augmente avec la durée de cure, cela est dû à l'activité pouzzolanique du mélange sol-chaux. Par exemple et pour une teneur de la chaux de 4%, le sol argileux gris a développé une résistance à la compression d'environ 600 kPa après 7 jours de cure. Cette résistance reste presque constante malgré l'augmentation du dosage de la chaux ce qui signifie que l'optimum de la résistance à la compression est atteinte pour une teneur en chaux de 4%. Cette remarque est notée pour les échantillons de jeune âge (1 jour). En revanche, l'addition du sable de dunes n'a pas influé notablement sur la résistance à la compression du sol amélioré pour les différentes périodes de cure. Par contre, l'ajout du sable de dunes combiné avec la chaux (4% et 8%) a abouti à une augmentation significative de la résistance à la compression. Par exemple et pour une teneur de la chaux de 4%, le sol argileux gris atteint une résistance à la compression d'environ 1.6 MPa pour une période de cure de 28 jours. En revanche, une diminution de la résistance à la compression a été remarquée pour les échantillons traités à 8% de chaux pour les différentes périodes de cure. Ce comportement est dû principalement aux densités spécifiques du sol et des ajouts cimentaires (chaux, sable de dunes). Par conséquent, la combinaison 4% chaux + sable de dunes représente le dosage optimal pour avoir des valeurs considérables de la résistance à la compression. Le traitement des sols par la combinaison sable de dunes + chaux produit des résistances à la compression plus élevées que le traitement par le sable de dunes ou

la chaux seuls. Par conséquent, le sable de dunes ne peut être utilisé seul pour la stabilisation des sols mous argileux. Cette performance des sols stabilisés avec la combinaison sable de dunes + chaux est due aux propriétés pouzzolaniques du mélange et à l'utilisation de la silice du sable de dunes par le calcium de la chaux pour former des agents de cimentation qui vont lier ensemble les particules du sol. Vu que la chaux est plus chère que le sable de dunes (prix de fabrication et de transport), l'utilisation de la combinaison sable de dunes + chaux mène à des travaux d'amélioration de faibles coûts.

4. CONCLUSIONS

Plusieurs essais ont été effectués au laboratoire pour étudier l'effet de la chaux, du sable de dunes et de leurs combinaisons sur les propriétés physiques et mécaniques d'un sol argileux instable. A partir des résultats obtenus durant cette étude, les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

Les limites d'Atterberg du sol peuvent changer considérablement par l'addition de la chaux seule. Pour le sol argileux gris classé en tant qu'argile de classe CH, on a observé une diminution de la limite de liquidité et une augmentation de la limite de plasticité. Une diminution significative de l'indice de plasticité a été constatée. L'addition au sol du sable de dunes seul modifie dans une certaine mesure les limites d'Atterberg. On a observé une diminution des limites de liquidité et de plasticité. Une réduction de l'indice de plasticité est notablement remarquée. Quand le sable de dunes et la chaux sont ajoutés au sol, le résultat est un changement appréciable dans le comportement de plasticité. Pour le sol argileux gris, on peut constater pour la combinaison 4% chaux+sable de dunes une diminution de la limite de liquidité et une augmentation de la limite de plasticité. Une réduction significative de l'indice de plasticité est observée. L'utilisation de la chaux, du sable de dunes et de la combinaison de ces deux ajouts change la classification du sol dans le système USCS. Le sol argileux de classe CH a été transformé en un sol argileux de classe MH.

La chaux fait diminuer la densité sèche maximale ce qui n'est pas le cas quand le sable de dunes est utilisé où on remarque une influence considérable. Pour la combinaison chaux et sable de dunes, le même comportement est observé que pour le sable utilisé seul. Le sable de dunes fait augmenter la densité sèche maximale et diminuer la teneur en eau. Une influence peu significative est observée quand le sable est combiné avec la chaux.

L'addition de la chaux améliore la résistance à la compression particulièrement à long terme alors que le développement de la résistance à la compression est faible avec l'addition du sable de dunes utilisé seul. La combinaison chaux et sable de dunes améliore considérablement la résistance à la compression du sol argileux stabilisé. De plus, cette combinaison produit des résistances plus élevées que celles où la chaux ou le sable de dunes sont utilisés seuls.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Kolias, S., Kasselouri-Rigopoulou, V., Karahalios, A., *Stabilization of clayey soils with high calcium fly ash and cement*, Cement and Concrete Composites, Vol. 27, 2005.
- [2] Al-Rawas, A.A., Goosen, M.F.A., *Expansive soils-Recent advances in characterization and treatment*, Taylor & Francis, Balkema, London, 2006.
- [3] Ola, S.A., *The potentials of lime stabilization of lateritic soils*, Engineering Geology, Vol. 11, 1977.
- [4] Rahman, M.D.A., *The potentials of some stabilizers for the use of lateritic soil in construction*, Building and Environment, Vol. 21, 1986.
- [5] Attoh-Okine, N.O., *Lime treatment of laterite soils and gravels-revisited*, Construction and Building Materials, Vol. 9, 1995.
- [6] Bell, F.G., *Lime stabilization of clay minerals and soils*, Engineering Geology, Vol. 42, 1996.
- [7] Osula, D.O.A., *A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite*, Engineering Geology, Vol. 42, 1996.
- [8] Muntohar, A.S., Hantoro, G., *Influence of rice husk ash and lime on engineering properties of a clayey subgrade*, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 5, 2000.
- [9] Okagbue C.O., Yakubu J.A., *Limestone ash waste as a substitute for lime in soil improvement for engineering construction*, Bulletin of Engineering Geology and Environment, Vol. 58, 2000.
- [10] Bagherpour, I., Choobbasti, A. J., *Stabilization of fine-grained soils by adding micro silica and lime or micro silica and cement*, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 8, 2003.
- [11] Al-Rawas, A.A., Hago, A.W., Al-Sarmi, H., *Effect of lime, cement and sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman*, Building and Environment, Vol. 40, 2005.
- [12] Goswami R.K., Singh B., *Influence of fly ash and lime on plasticity characteristics of residual lateritic soil*, Ground Improvement, Vol. 9, 2005.
- [13] Ansary, M.A., Noor, M.A., Islam, M., *Effect of fly ash stabilization on geotechnical properties of Chittagong coastal soil*, Proc. of the geotechnical symposium on soil stress-strain behavior, Roma, Italy, 2006.
- [14] Nalbantoglu Z., *Lime stabilization of expansive clay*. In: Al Rawas A.A., Goosen M.F.A., *Expansive soils-recent advances in characterization and treatment*, Taylor & Francis, London, 2006.
- [15] Hossain, K.M.A., Lachemi, M., Easa, S., *Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua New Guinea*, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 51, 2007.
- [16] Kavak, A., Akyarlı, A., *A field application for lime stabilization*, Environmental Geology, Vol. 51, 2007.
- [17] Lasledj A., Al-Mukhtar M., *Effect of hydrated lime on the engineering behaviour and the microstructure of highly expansive clay*, Proc. of the 12th international conference on computer methods and advances in geomechanics, Goa, 2008.
- [18] Manasseh J. Olufemi A.I., *Effect of lime on some geotechnical properties of igumale shale*, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 13, 2008.
- [19] Basha, E.A., Hashim, R., Muntohar, A.S., *Effect of the cement-rice husk ash on the plasticity and compaction of soil*, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 8, 2003.
- [20] Nalbantoglu, Z., *Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer*, Construction and Building Materials, Vol. 18, 2004.
- [21] Prabakar, J., Dendorkar, N., Morchhale, R.K., *Influence of fly ash on strength behavior of typical soils*, Construction and Building Materials, Vol. 18, 2004.
- [22] Parsons, R.L., Kneebone, E., *Field performance of fly ash stabilized subgrade*, Ground Improvement, Vol. 9, 2005.
- [23] Basha, E.A., Hashim, R., Mahmud, H.B., Muntohar, A.S., *Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement*, Construction and Building Materials, Vol. 19, 2005.
- [24] Senol, A., Edil, T.B., Bin-Shafique, M.S., Acosta, H.A., Benson, C.H., *Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes*, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 46, 2006.
- [25] Sezer, A., Inan, G., Yilmaz, H.R., Ramyar, K., *Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay*, Building and Environment, Vol. 41, 2006.
- [26] Kalkan E., *Influence of silica fume on the desiccation cracks of compacted clayey soils*, Applied Clay Science, Vol. 43, 2009.
- [27] ASTM D4318-00. Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils. Annual book of ASTM Standards, Vol. 04-08, 2000.
- [28] ASTM D698-00. Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. Annual book of ASTM Standards, Vol. 04-08, 2000.
- [29] ASTM D2166-00. Standard test methods for unconfined compressive strength of cohesive soil. Annual book of ASTM Standards, Vol. 04-08, 2000.
- [30] Kavak A., Akyarlı A., *A field application for lime stabilization*, Environmental Geology, Vol. 51, 2007.
- [31] Osula, D.O.A., *Lime modification of problem laterite*, Engineering Geology, Vol. 30, 1991.
- [32] George, S.Z., Ponniah, D.A., Little, J.A., *Effect of temperature on lime-soil stabilization*, Construction and Building Materials, Vol. 6, 1992.
- [33] Miller, G.A., Azad, S., *Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust*, Construction and Building Materials, Vol. 14, 2000.
- [34] Khattab S.A.A., Al-Juari K.A.K., Al-Kiki I., *Strength, durability and hydraulic properties of clayey soil stabilized with lime and industrial waste lime*, Al-Rafidain Engineering, Vol.16, 2008.
- [35] Bozbeý, I., Garaisayev, S., *Effects of soil pulverization quality on lime stabilization of an expansive clay*, Earth and Environmental Science, Vol. 60, 2010.
- [36] Gueddouda M.K., Lamara M., Aboubaker N., Taibi S. *Hydraulic conductivity and shear strength of dune sand -bentonite mixtures*, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 13, 2008.
- [37] Louafi, B., Bahar, R., *SAND: An Additive for Stabilization of Swelling Clay Soils*, International Journal of Geoscience, Vol. 3, 2012.
- [38] Panwar, E.P., Ameta, N.K., *Stabilization of dune sand with bentonite and lime*, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 18, 2013.
- [39] Ashis Kumar, B., *Effect of Sand Content on Engineering Properties of Fine-Grained Soil Mixed with Sand*, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 16, 2011.
- [40] Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S., Grine, K., *Use of natural pozzolana and lime for stabilization of cohesive soils*, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 29, 2011.
- [41] Sivapullaiah, P.V., Lakshmikantha, H., Kiran, K.M., *Geotechnical properties of stabilised Indian red earth*, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 21, 2003.
- [42] Gay, G., Schad, H., *Influence of cement and lime additives on the compaction properties and shear parameters of fine grained soils*, Otto-Graf Journal, Vol. 11, 2000.
- [43] Solanki, P., Khoury, N., Zaman, M.M., *Engineering properties and moisture susceptibility of silty clay stabilized with lime, class C fly ash, and cement kiln dust*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 21, 2009.
- [44] Osinubi, K.J., *Influence of compactive efforts on lime-slag treated tropical black clay*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, 2006.
- [45] Khattab S.A.A., Al-Mukhtar M., Fleureau J.M., *Long-term stability characteristics of a lime-treated plastic soil*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 19, 2007.
- [46] Lin, D.F., Lin, K.L., Hung, M.J., Luo, H.L., *Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil*, Journal of Hazardous Materials, Vol. 145, 2007.
- [47] Sharma, R.S., Phanikumar, B.R., Rao, B.V., *Engineering behaviour of remoulded expansive clay blended with lime, calcium chloride, and rice-husk ash*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 20, 2008.