

Utilisation du laitier granulé broyé des hauts fourneaux dans la stabilisation des sols

Use of ground granulated blast furnace slag in soils stabilization

Samira Zemouli* & Noureddine Chelghoum

Laboratoire Matériau, Géotechnique et Environnement (LMGE), Faculté des sciences de l'ingénieur
Université Badji Mokhtar-Annaba, BP12, Annaba, 23000, Algérie

Soumis le : 07/05/2017

Révisé le : 15/01/2018

Accepté le : 05/02/2018

ملخص

أكثر من 500000 طن من خبث الحديد والصلب ينتج سنويا في الجزائر. هذه النفايات الصناعية، إذا لم تستخدم سيتم تكديسها على الأرض مسببة مشاكل بيئية خطيرة هذا المنتج هو أسمنتي بشكل طبيعي ويمكن أن يستخدم كموثق هيدروليكي لتحسين الخواص الجيوتقنية للأتربة الناعمة و تخفيض تكلفة بناء المنشآت الترابية. يقدم هذا المقال دراسة عن تأثير الخبث المحبب المنتج محليا على الخواص الجيوتقنية للأتربة الناعمة. النتائج المتحصل عليها تبين أن خلافا إستعمالالخبثالمحببولوحده كموثق هيدروليكي، تفعيله من خلال إضافة الجير المطفأ يحسن خصائص اللدونة، خصائص رص ومقاومة التربة مما يؤدي الى تحسين اللبونة والزيادة في معامل السلامة وقدرة التربة للتحميل.

الكلمات مفتاحية: تحسين التربة-حبيبات خبث-اللدونة- الرص ،مقاومة

Résumé

Plus de 500 000 tonnes de laitier issu de la fabrication du fer et de l'acier sont produites chaque année en Algérie. Ces déchets industriels sont souvent stockés à l'air libre provoquant de sérieux problèmes environnementaux. Ce produit naturellement cimentaire, peut être utilisé comme liant hydraulique pour améliorer les propriétés géotechniques des sols fins en place et réduire le coût de construction des ouvrages enterrés. Cet article présente une étude sur l'effet du laitier granulé produit localement sur les propriétés d'un sol fin. Les résultats obtenus montrent que contrairement à l'utilisation du laitier granulé seul comme liant hydraulique, le laitier granulé activé à la chaux hydratée améliore la plasticité, le compactage et les caractéristiques de résistance, ce qui se traduit en pratique par une amélioration de la maniabilité, du facteur de sécurité et la portance du sol.

Mots clé: stabilisation des sols-laitier granulé-plasticité-compactage-résistance

Abstract

More than 500,000 tons of slag from iron and steel production is produced each year in Algeria. These industrial wastes are often sent to open air land fill causing serious environmental problems. This naturally cementitious product can be used as a hydraulic binder to improve the native soft fine soil geotechnical properties and reduce the cost of civil engineering earth works. This paper presents a study on the effect of granulated slag produced locally on the engineering properties of soft engineering soil. The results obtained show that unlike the use of granulated slag alone as a hydraulic binder the granulated slag activated by hydrated lime improves plasticity, compaction and strength characteristics resulting in a better workability, an increase in factor of safety and bearing capacity.

Keywords: soil stabilization-granulated slag-plasticity-compaction- Strength

* Auteur correspondant : Zemouli_Samira@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Le développement de tout pays se reflète en grande partie par ses infrastructures routières. Ces derniers temps, l'Algérie a initié plusieurs grands projets de constructions linaires tels que les routes, les autoroutes, les chemins de fer, les barrages et les réseaux aéroportuaires afin de faciliter le développement de l'agriculture, du commerce et de l'industrie. Malheureusement, les sols de bonnes qualités nécessaires pour mener à bien ces projets ne sont pas toujours disponibles sur les sites de construction. Certains sols fins sur place sont associés à des changements volumétriques importants lorsqu'ils sont soumis à des variations de teneur en eau en raison des fluctuations saisonnières de l'eau et leur faible résistance, en particulier dans les régions arides et semi-arides [1]. Les régions arides et semi-arides couvrent une grande partie de l'Algérie. Ces régions, délimitées par l'Atlas tellien au Nord et l'Atlas saharien au Sud, s'étendent de la frontière Tunisienne à l'Est à la frontière Marocaine à l'Ouest du pays. Les sols provenant de ces zones, lorsqu'ils sont utilisés dans la réalisation des ouvrages de construction importants, en particulier les infrastructures utilisant d'énormes quantités de remblai, entraîneront des dommages considérables [2], [3], [4]. La solution à ce problème est de traiter ces sols pour obtenir les propriétés géotechniques souhaitées. Plusieurs méthodes ont été proposées pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols médiocres, parmi elles leur stabilisation chimique, une technique principalement utilisée pour améliorer la maniabilité, la capacité portante, le potentiel de gonflement/rétrécissement et la perméabilité des sols à problèmes. Pendant plusieurs décennies, divers produits industriels tels que la chaux (CaO) ou le ciment Portland ont été utilisés dans la stabilisation des sols. La chaux est en général utilisée pour les argiles et les limons alors que le ciment est par contre utilisé pour les argiles, les limons et les sables [5].

Le ciment Portland est composé essentiellement de silicate de calcium et d'aluminate de calcium hautement réactifs. Une fois le ciment introduit dans le sol argileux, ces composants s'hydratent avec de l'eau de sol pour produire du silicate d'hydrate de calcium (CSH) et de l'aluminate d'hydrate de calcium (CAH). Ces derniers engendrent de fortes liaisons inter particules dans la matrice de sol. Ces composants cimentaires sont caractérisés par leur grande résistance et leur faible variation de volume. Le processus de cimentation est assez rapide et exothermique. L'amélioration significative de la résistance est obtenue rapidement et même des fois en quelques heures. En plus, au cours du processus d'hydratation, la chaux libre Ca(OH)_2 est produite en tant que sous-produit, ce qui permet à la fois l'échange de cations et la réaction pouzzolanique. Bien que le gain substantiel en résistance soit l'objectif principal dans certaines applications en génie civil, il peut être aussi un inconvénient dans certaines situations nécessitant la stabilisation de sol telles que la réalisation de routes, autoroutes et les constructions de pistes d'aéroport où le tassement différentiel peut se produire dans le sol sous la structure. Les fissures naissent alors dans le sol stabilisé au ciment et se propagent à la structure de construction à la surface superficielle, entraînant des dommages importants [6]. En outre, la stabilisation du ciment est de nos jours moins appréciée en raison du coût croissant du ciment et des préoccupations environnementales liées à sa production qui a un impact très important sur les émissions de CO_2 .

L'addition de la chaux à un sol moyen, modérément fin ou fin initie plusieurs réactions. La première réaction, qui est immédiate, est le processus de séchage par absorption et évaporation. Cette réaction réduit la teneur en eau du sol humide à cause de l'hydratation de la chaux, ce qui le rend plus maniable. Le processus suivant est la réaction d'échange ionique entre la chaux et les minéraux argileux. Cette réaction rapide provoque la floculation et l'agglomération des minéraux argileux conduisant ainsi à la réduction de la plasticité du sol. Une réduction du potentiel rétrécissement/gonflement et augmentation de la résistance peuvent aussi en résulter. Toutefois, cette amélioration qui est réversible dépend des ions de calcium dans l'eau entourant les particules de sol. Le second mécanisme de stabilisation des sols est la réaction pouzzolanique. Cette réaction produit des hydrates de silicate de calcium (CSH) et des hydrates d'aluminate de calcium (CAH) stables au fur et à mesure que le calcium provenant du sol réagit avec les aluminates et les silicates solubles dans le sol pour former des matières cimentaires pour lier les particules de sol et finit par engendrer un gain de résistance élevé et durable. La réaction pouzzolanique à long terme peut se poursuivre pendant une très longue période, et même des décennies tant que la réactivité du sol et la chaux reste disponible et que le PH reste élevé supérieur à 10 [7]. Contrairement à l'échange cationique, la réaction pouzzolanique est une réaction permanente. Le problème de la stabilisation des sols à la chaux est sa faible réaction pouzzolanique qui se traduit probablement par un lent et faible gain de résistance. En outre, tout excès de chaux nécessaire au processus de stabilisation se dissout et s'infiltré dans le sol

environnant, affectant toute source d'eau souterraine ainsi que les racines des plantations au voisinage de la structure de construction. La chaux contribue également à l'émission du CO₂ portant ainsi atteinte à l'environnement et au changement climatique.

Avec toutes ces preuves croissantes comme mentionnées ci-dessus, l'exigence de trouver une alternative au ciment et à la chaux a été rendue plus pressante ces dernières années. L'accent est mis sur l'utilisation de déchets industriels comme le laitier granulé, broyé, fabriqué à partir du laitier de haut fourneau (LGBHF), un sous-produit de la fabrication du fer et acier. Le LGBHF est obtenu par trempage immédiat de laitier de haut fourneau de fer et acier fondu dans de l'eau ou de la vapeur, pour produire un produit granulaire vitreux qui est ensuite séché et broyé en poudre fine. L'utilisation bénéfique de ces déchets industriels dans la réalisation des ouvrages géotechniques est non seulement une solution prometteuse pour réduire et éventuellement éliminer les dépôts énormes des déchets industriels mais aussi d'économiser les coûts de construction. Le laitier granulé des hauts fourneaux est un mélange de plusieurs composants, mais il s'agit essentiellement d'une combinaison de CaO et de silice non cristalline hautement réactive. Ce matériau permet à la fois l'échange de cations, ce qui donne une amélioration quasi immédiate des propriétés géotechniques du sol comme obtenue lors de la stabilisation à la chaux mais aussi la réaction pouzzolanique, qui donne un gain de résistance à long terme [8]. Son modeste et lent gain de résistance réduit les dommages ou la propagation des fissures aux constructions de génie civil linéaires à la surface superficielle qui sont fréquemment observées dans la stabilisation des sols au ciment [9]. En outre, le laitier granulé s'est avéré être plus efficace dans le traitement des sols riches en sulfates que la chaux ou le ciment Portland [7]. Ces caractéristiques font de ce produit un candidat idéal pour la stabilisation chimique des sols.

Une des principales caractéristiques du laitier granulé est sa réaction lente et par conséquent son gain de résistance sera aussi lent [10]. Bien que cela puisse être considéré comme un avantage dans certaines applications en géotechnique comme indiqué précédemment, un gain de résistance lent peut également être excessivement lent pour certains projets de construction pratiques. L'ajout d'une petite quantité de ciment Portland ou de chaux comme activateur aide à surmonter ce problème et à atteindre les propriétés géotechniques souhaitées du sol. Dans la littérature, la quantité de ces activateurs hydrauliques est généralement limitée à 25% du poids de laitier granulé utilisé de sorte que le comportement du sol stabilisé est celui du laitier et non du ciment Portland ou de la chaux. La réaction exothermique de ces activateurs avec de l'eau dans le sol, entraîne une augmentation de la température interne de la matrice de sol qui à son tour accélère la réaction du laitier granulé. De plus, la chaux se transforme en chaux vive et la réaction de ciment Portland produit de la chaux libre, les deux initient la réaction pouzzolanique.

Au cours des dernières décennies, le laitier de fer a été largement utilisé dans la stabilisation chimique des sols fins à travers le monde, en particulier au Royaume-Uni [11] [12], en Finlande [13], Chine [14], Australie [15], Turquie [16], Inde [17] [18], Etats-Unis d'Amérique [19] et Sultanat d'Oman [8]. En Algérie, la revue bibliographique a révélé que la plupart des laitiers de fer ou d'acier sont utilisés comme agrégats dans les ouvrages de construction linéaires surtout pour les revêtements en béton bitumineux. Les raisons pour lesquelles la stabilisation chimique des sols, en particulier avec les laitiers locaux n'ont pas été utilisés, sont probablement l'absence de directives concernant les agents de cimentation (et/ou les activateurs, le cas échéant) et les quantités à utiliser. L'utilisation de laitiers de fer ou d'acier comme composant de cimentation devrait faire l'objet de beaucoup d'attentions en raison de considérations techniques, économiques et environnementales. Dans cet article, l'étude porte sur l'aspect technique du laitier de fer local produit par l'usine de fer et d'acier El Hadjar. Une série d'essais géotechniques en laboratoire a été entreprise pour élucider l'influence de ce dernier seul (100% LGBHF) ou activé à la chaux hydratée (85% LGBHF + 15% CaO), sur les propriétés de plasticité, de compactage et de résistance à la compression simple d'un sol fin représentatif confectionné au laboratoire. L'influence du temps de cure sur la résistance à la compression non confinée a également fait l'objet d'étude. Les résultats sont présentés, analysés et commentés dans les sections suivantes.

2. PROGRAMME EXPERIMENTAL

2.1. Matériel et Matériaux d'essais

Le sol utilisé lors de cette étude a été préparé en laboratoire en mélangeant 85% de kaolin disponible dans le commerce ($G_s = 2,69$) et 15% de bentonite ($G_s = 2,39$) par masse sèche. Ce sol artificiel est représentatif des sols réactifs disponibles dans de nombreux endroits à travers le monde

[15].L'utilisation de ce sol artificiellement confectionné a pour but d'éliminer l'incohérence des éprouvettes d'essai et assurer la répétabilité des tests, qui sont des facteurs importants pour toute étude comparative avec des contenus d'additifs et des durées de durcissement variables. Le kaolin DD3 extrait des hautes montagnes de Roknia à Guelma (Est de l'Algérie) est commercialisé par la Société algérienne de Kaolin (SOALKA).La bentonite provient de la Société algérienne de Bentonite ENOF de Mostaganem (Ouest de l'Algérie).

Le Laitier Granulés Broyé des hauts fourneaux et la chaux hydratée ont été utilisés comme liants hydrauliques. Le choix de cette dernière est justifié par le fait que le laitier réagit mieux lorsqu'il est activé avec de la chaux hydratée [11] [12] [20].La chaux hydratée provient de la société ERCO de Hassasna dans la wilaya de Saïda Alors que le laitier est fabriqué par l'usine d'El Hadjar (Annaba-Algérie). Les propriétés physiques et chimiques de tous les matériaux utilisés dans cette étude sont résumées dans les tableaux 1 et 2.Les résultats de l'analyse chimique du laitier granulé (Tableau 2) montrent des quantités appréciables de CaO.

Tableau 1. Propriétés physiques de la chaux hydratée et du laitier granulé broyé

Caractéristiques	Valeurs
Laitier granulé	
PH	11,45
Densité Spécifique	3,01
Masse volumique absolue	3g/cm ³
Surface spécifique de Blaine SSB	5632cm ² /g
Chaux hydratée	
Masse volumique absolue	600-900g/l
Coefficient d'absorption	<5
Sensibilité au gel	<30
Volume d'extinction	2,73cm ³
Supérieure à 630µm	0%
Supérieure à 90µm	>83,3%

Tableau 2. Propriétés chimiques des matériaux utilisés

Constituants	Kaolin DD ₃	Bentonite (Mostaganem)	Sol préparé	Laitier granulé (El Hadjar)	Chaux hydratée (Saïda)
MgO	0,63	2,27	1,04	1,30	<0,5
SiO ₂	44,41	65,50	48,47	42,15	<2,5
MnO	0,454	0,03	0,388	0,568	-
Fe ₂ O ₃	0,6	2,91	1,02	1,20	<2
TiO ₂	0,195	0,27	0,113	0,572	-
CaO	1,087	1,86	1,059	42,890	>83,3
Al ₂ O ₃	40,568	13,85	37,418	10,00	<1,5
Na ₂ O	-	2,22	-	-	<4,7-0,5
K ₂ O	0,186	0,97	0,424	0,563	-
SO ₃	-	0,02	-	-	<2,5
H ₂ O ⁺	-	3,27	-	-	-
H ₂ O ⁻	-	6,06	-	-	-
P ₂ O ₅	-	0,06	-	-	-
CO ₂	-	-	-	-	<2
CaCO ₃	-	-	-	-	<10
Matériau insoluble dans HCL	-	-	-	-	<1
Sulfites (pyrites)	-	-	-	-	-
Perte au feu	11,2	-	7,51	Néant	-

2.2. Préparation des éprouvettes

Les composants constituant les éprouvettes de sol ont d'abord été séchés au four à 60°C et broyés. Le laitier granulé des hauts fourneaux à l'état brut a été pulvérisé par un broyeur mécanique KHD Humboldt WedagAG à une finesse de 4 000 cm²/g comme recommandé par [21]. Après avoir pesé les constituants, la bentonite et la kaolinite ont été mélangées à l'aide d'une truelle. Puis le mélange a été tamisé à travers le tamis N°30 (0,600 mm) pour obtenir un mélange plus homogène [22]. Le laitier granulé broyé a ensuite été ajouté en petites quantités allant de 5, 10, 15, 20 et 25% par masse sèche. Le mélange de laitier, Bentonite et Kaolin tous secs ont par la suite été imbibés graduellement avec de l'eau distillée pour atteindre une teneur en eau prédéterminée et laissés dans des sacs en plastique scellés pendant 24 heures (temps d'adoucissement). Ces mélanges ont ensuite été utilisés pour conduire les essais des limites d'Atterberg et de compactage. La teneur en eau optimale et la densité sèche maximale respectives du sol traité et non traité déterminées à partir des essais de compactage ont été utilisées pour la préparation des éprouvettes de sol pour la conduction des essais de compression non confinée et l'étude de l'influence de temps de cure sur la résistance à la compression simple.

2.3 Programme des essais

Afin d'étudier l'influence du laitier granulé sur les propriétés physiques et mécaniques du sol, des éprouvettes de sol traitées et non traitées ont été soumises aux mêmes essais de laboratoire. Ces derniers englobent la détermination de la densité spécifique (Gs) des échantillons, la granulométrie par sédimentation pour déterminer la distribution granulométrique, les essais de plasticité pour évaluer les limites d'Atterberg, le compactage afin d'obtenir la teneur en eau Optimale et la densité sèche max; l'essai de compression non confiné pour déterminer la résistance. L'effet du temps de cure sur la résistance du sol a également fait l'objet d'étude. La première étape dans la stabilisation du sol a été de déterminer la proportion minimale de laitier granulé requise pour l'amélioration des propriétés à long terme en utilisant la méthode Eades et Grim développée pour la chaux [23].

La méthode appropriée pour déterminer la densité spécifique du sol est celle du pycnomètre tel que décrite par [24]. Le poids spécifique des particules de sol est le rapport du poids d'un volume donné des solides du sol au poids d'un volume égal d'eau à 4°C. La densité spécifique en tant que telle ne reflète pas le comportement d'une masse de sol sous une charge externe, néanmoins, c'est un facteur important utilisé dans le calcul des autres paramètres du sol.

L'analyse granulométrique par tamisage est effectuée pour déterminer la distribution des particules de plus grande taille dans un sol, et la méthode de l'hydromètre est utilisée pour déterminer la distribution des particules les plus fines selon [22].

Les limites d'Atterberg ont été déterminées selon la méthode d'essai standard pour la limite de liquidité et la limite de plasticité [25]. La limite de liquidité du sol (W_L), dans la méthode de l'appareil Casagrande, est la teneur en eau qui aboutit à une fermeture de 13 mm d'une rainure standard dans un échantillon de sol remanié en utilisant 25 coups (hauteur de chute de 10 mm). A cette teneur en eau, le sol devient très doux. La limite de plasticité (W_p) est la teneur en eau à laquelle le sol commence à se fissurer lorsqu'il est roulé entre les doigts sur une plaque de verre pour former un fil de 3 mm de diamètre, à ce stade le sol possède une consistance rigide. La différence entre la limite de liquidité W_L et la limite de plasticité W_p est définie comme étant l'indice de plasticité I_p .

La teneur en eau optimale et la densité sèche maximale du sol préparé ont été déterminées en utilisant l'essai de compactage Proctor Modifié selon [26]. L'essai a été effectué en compactant le sol à une teneur en eau fixe dans un moule Proctor standard en trois couches approximativement égales. Chaque couche a été compactée par un nombre standard de coups (27 coups) distribué uniformément par une dame de 4,5 kg tombant librement d'une hauteur égale à 457 mm

L'essai de compression non confinée a été réalisé selon la méthode d'essai standard pour la résistance à la compression simple du sol cohésif [27]. Pour cet essai, des échantillons de sol préparé non traité et traité au laitier granulé ont été compactés, à leurs teneurs en eau optimales respectives obtenues lors de l'essai de compactage, en trois couches d'épaisseurs égales. Ensuite, les éprouvettes de sol ont été retirées de leurs moules puis enveloppées d'un film plastique et conservées dans une chambre humide à 100% et une température moyenne de 20°C pendant 1, 7, 14, 21, 28 et 90 jours. Après avoir atteint le temps de cure spécifié, les éprouvettes cylindriques ont été soumises à une charge de compression axiale graduelle jusqu'à la rupture. Tous les échantillons ont été testés à une vitesse de déformation axiale constante de 1% par minute.

3. RESULTATS ETDISCUSSIONS

3.1. Influence du laitier granulé sur le PH du sol

La variation du PH corrigée à 25°C en fonction des proportions de liant hydraulique est présentée sur la Figure 1. Celle-ci montre que l'ajout de laitier granulé broyé seul ou activé avec de la chaux hydratée jusqu'à 5% entraîne une augmentation graduelle du PH jusqu'à 10,41 et 12,44 respectivement. Au-delà de 5%, le taux de variation du PH devient moins significatif donnant ainsi une courbe pratiquement constante indépendamment de la quantité de liant hydraulique ajouté. Par conséquent, dans la présente étude, 5% de stabilisant (laitier seul ou activé) en poids sec du sol préparé est le pourcentage initial utilisé pour le traitement de ce sol fin constitué.

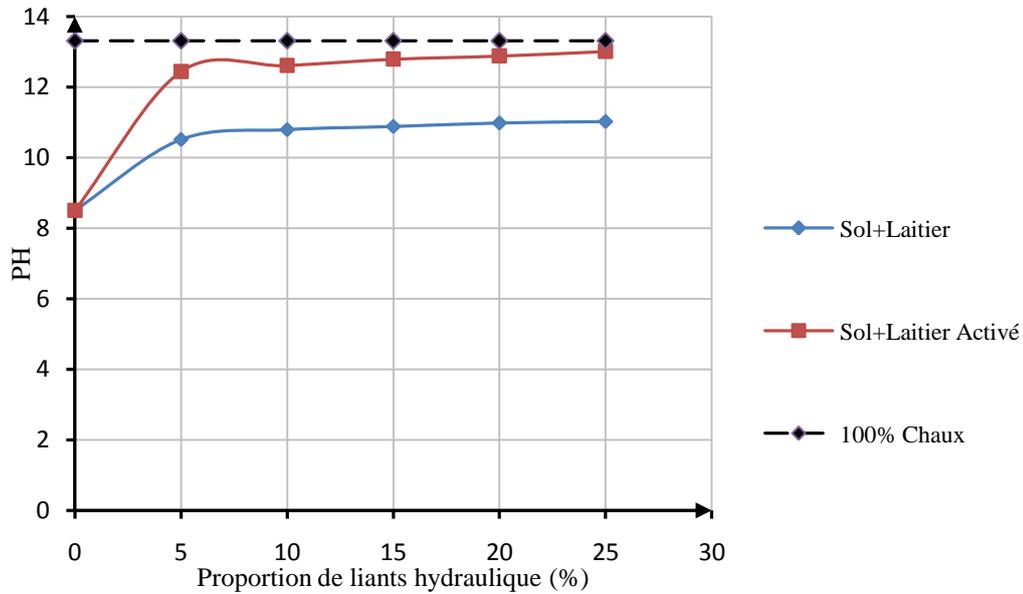


Figure 1. Détermination de la proportion initiale du laitier

3.2. Influence du laitier granulé sur la densité spécifique du sol

L'influence des additifs sur la densité spécifique du sol est illustrée sur la figure 2 où les augmentations de pourcentage du laitier granulé, lorsqu'il est utilisé seul a entrainé une augmentation de la densité spécifique. Mieux encore, l'activation du laitier granulé, broyé de haut fourneau avec de la chaux hydratée a donné des valeurs de densité spécifique plus élevées qu'avec l'addition du laitier non activé (100% LGBHF) et cela pour tous les pourcentages de stabilisant utilisés, rendant ainsi le sol beaucoup plus dense. Des observations similaires ont été rapportées auparavant par d'autres auteurs[28].

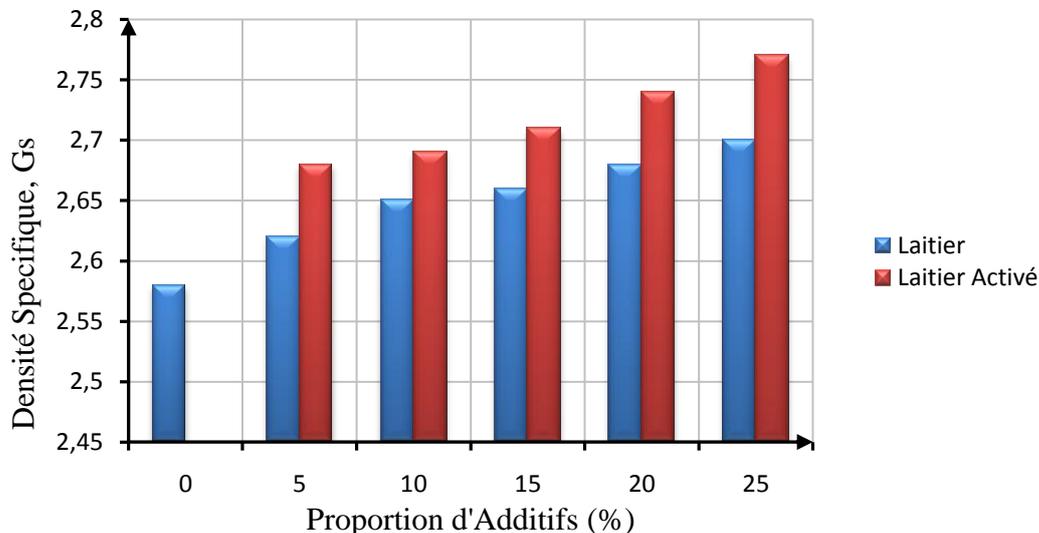


Figure 2. Influence du laitier seul et Activé sur la densité spécifique du sol

3.3. Influence du laitier granulé sur la granulométrie du sol

Les courbes granulométriques des échantillons traités à différents pourcentages de laitier sont représentées sur la figure 3 ensemble avec les courbes granulométriques pour l'échantillon de sol non traité et de l'additif hydraulique à 100%LGBHF. L'addition de laitier granulé broyé a provoqué une translation des courbes granulométriques des échantillons traités, loin de l'échantillon non traité vers le côté plus grossier. Cette translation des courbes est plus importante lorsque le pourcentage d'additif est plus élevé. Elle semble être principalement due à l'addition de grosses particules du laitier granulé broyé des hauts fourneaux qui renforcent le sol et une réaction physico chimique due à l'adsorption d'eau et l'échange ionique entre le laitier et les particules plus fines de la fraction d'argile pour former des particules grosses. Une observation similaire a été rapportée dans la littérature par [17].et [28].

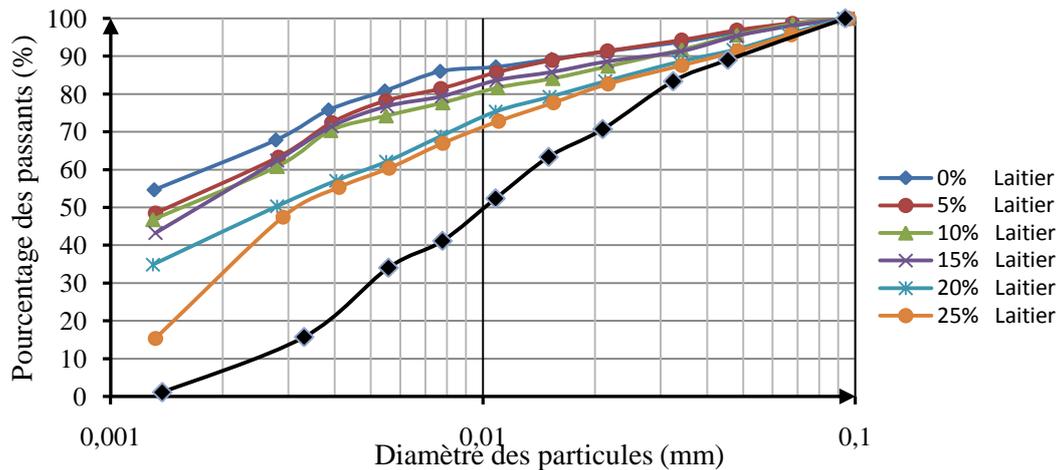


Figure 3. Courbes granulométriques du sol traité et non traité au laitier

3.4 Influence du laitier granulé sur les limites d'Atterberg

L'influence du laitier granulé broyé sur les limites d'Atterberg des échantillons traités et non traités a été étudiée et les résultats sont donnés sur les figures 4 et 5 respectivement. Les échantillons traités avec le laitier seul ont montré une réduction aussi bien de la limite de liquidité (W_L) que de la limite de plasticité (W_P) alors que l'indice de plasticité (I_P) obtenu par la différence des deux limites semble pratiquement invariable (Figure 4). Cette réduction des limites d'Atterberg est essentiellement due à la translation des courbes granulométriques du sol traité au laitier vers le côté grossier due à l'augmentation des particules grosses et la réduction des particules fines.

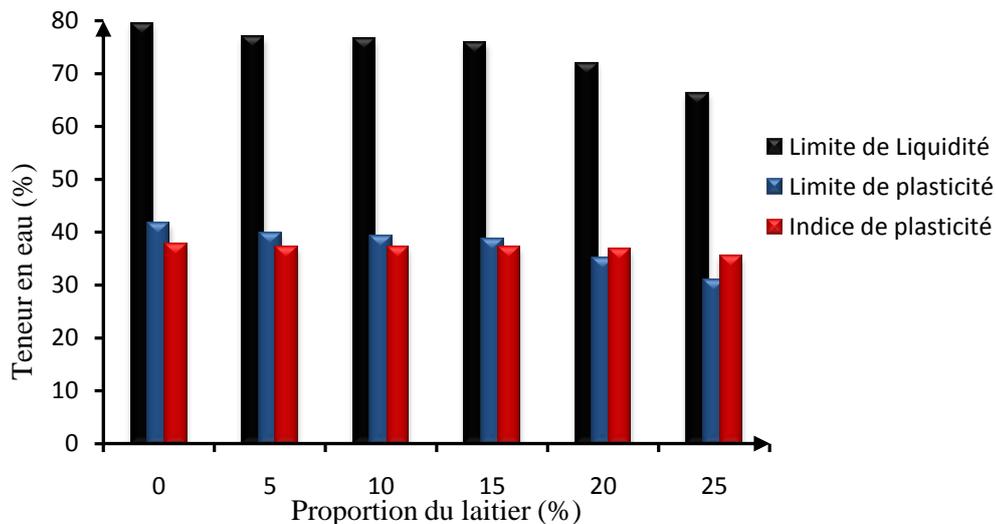


Figure 4. Influence du laitier sur les limites d'Atterberg

Cependant, l'addition au sol du laitier de haut fourneau granulé broyé activé avec de la chaux hydratée a engendré une augmentation de la limite de plasticité et une légère diminution de la limite de liquidité

(Figure 5), conséquences de la première réaction immédiate du séchage due au processus d'absorption et d'évaporation qui ont eu lieu. Par la suite, le processus rapide des réactions d'échange ioniques entre le laitier activé et les minéraux organiques du sol provoquent la floculation et l'agglomération des minéraux des particules fines du sol conduisant ainsi à une réduction de l'indice de plasticité du sol et une amélioration de son ouvrabilité.

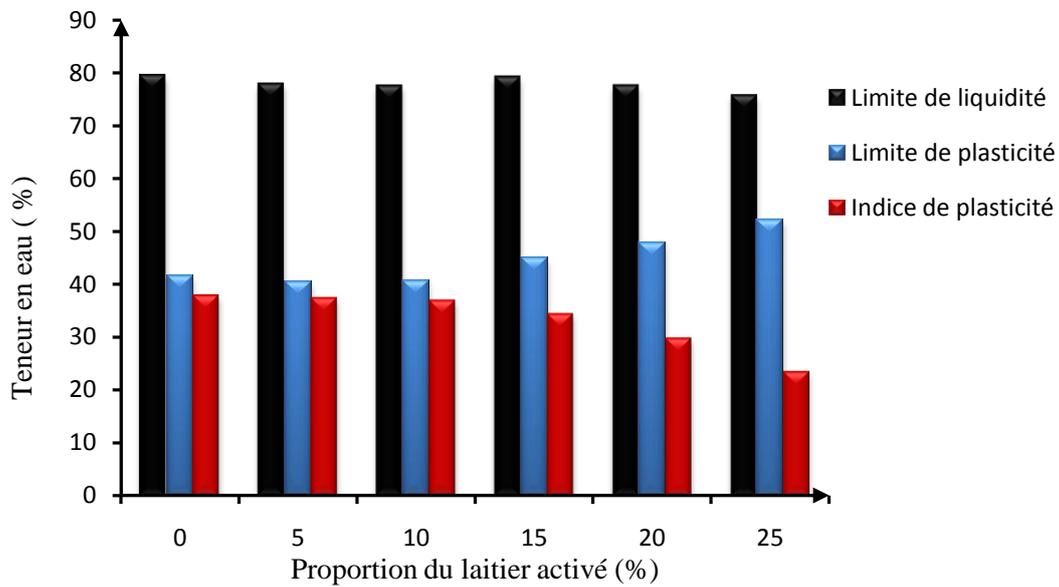


Figure 5. Influence du laitier activé sur les limites d'Atterberg

3.5 Influence du laitier granulé sur les caractéristiques de compactage

Les caractéristiques de compactage sont très importantes dans la plupart des projets de construction de génie civil utilisant le sol comme matériau de construction tel que les projets de routes, des autoroutes et des pistes d'aéroports. Par conséquent, l'étude de l'influence du stabilisateur sur la courbe de compactage est alors d'une grande importance. Les résultats de cette étude sont présentés dans la figure 6 pour le sol stabilisé avec le laitier granulé seul et la figure 7 pour le sol stabilisé avec le laitier activé.

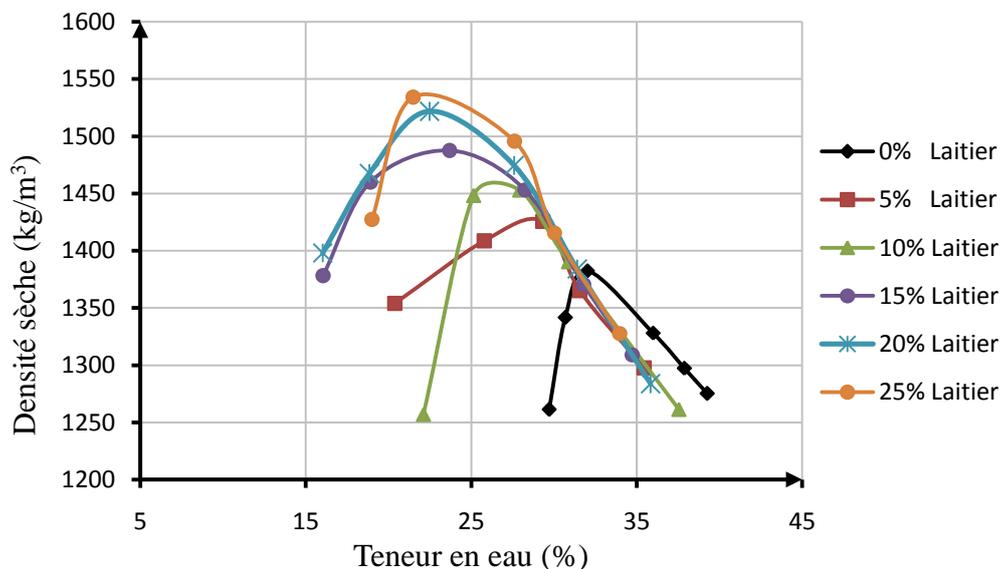


Figure 6. Influence du laitier sur les caractéristiques de compactage

Avec l'augmentation du pourcentage de laitier, la teneur en eau optimale diminue et la densité sèche maximale augmente comme le montre la figure 6, le sol traité devient alors plus dense et plus dur. Une tendance similaire a été observée par [17].

D'autre part, l'activation du laitier avec de la chaux hydratée tend à augmenter la teneur en eau optimale et à réduire la densité sèche maximale ce que indique la figure 7. Pour un même effort de

compactage, la teneur en eau optimale du sol non traité est passée de 32,03% à 36% lorsque 25% de l'additif est mélangé au sol, soit un accroissement de 12.5%. La densité sèche maximale a diminué de 1382,46 kg / m³ à 1342 kg /m³, soit une réduction de 3%. Ce changement est considéré comme une indication de l'amélioration des caractéristiques de compactage du sol stabilisé au laitier activé. La réduction de la densité sèche est due aux particules agglomérées et floculées de sol qui vont occuper des espaces plus larges. Pour ce qui concerne l'augmentation de la teneur en eau optimale, le laitier activé exige plus d'eau pour sa réaction immédiate du processus de séchage par absorption et évaporation ainsi que le processus d'échange d'ions engendré par les réactions entre le laitier activé et les minéraux du sol fin provoquant ainsi la floculation et l'agglomération des minéraux des particules fines du sol.

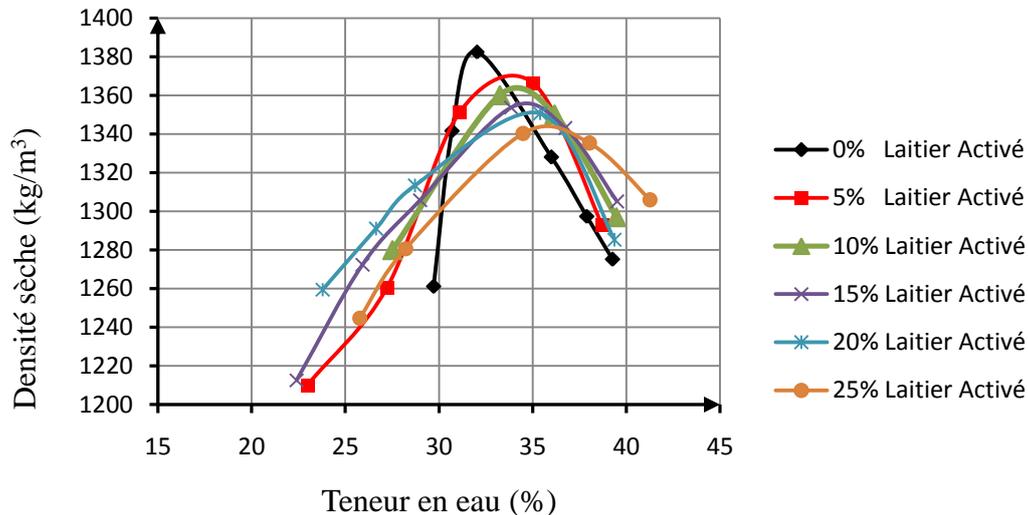


Figure 7. Influence du laitier activé sur les caractéristiques de compactage

3.6 Influence du laitier sur la résistance à la compression simple

La portance des sols, lors des constructions des ouvrages linéaires en terre, est d'une grande importance. Il est nécessaire de s'assurer qu'en cours ou à la fin de la construction, ces ouvrages supportent les charges extérieures dont ils sont destinés sans toutefois subir des déformations ou ruptures occasionnant ainsi des dommages humains ou matériels importants dans le futur. Cette grande précaution est prise en compte dans ce travail de recherche par la conduite des essais la compression simple utilisant une presse hydraulique. Toutefois, seul le liant hydraulique activé a été testé puisque les essais effectués auparavant de plasticité et compactage avec cet additif ont montré les résultats les plus promoteurs. Son influence sur la résistance à la compression non confinée est présentée dans la figure 8. Celle-ci montre qu'avec les augmentations du pourcentage du laitier activé la résistance à la compression simple augmente. La variation de cette résistance en fonction de la quantité d'additif semble être importante entre 5 et 15% mais a ralenti légèrement lorsque la quantité d'ajout hydraulique est supérieure à 15% ; elle semble même se stabiliser et devenir pratiquement constante à partir de 20% de laitier activé pour toutes les périodes de cure étudiées. L'amélioration de la résistance peut être attribuée au fait que les particules de sol ont subi de nouveaux arrangements conduisant à une texture de sol serrée et des vides interstitiels réduits. En plus, le silicate de calcium et l'aluminate de calcium réactifs de l'additif, une fois introduit dans un sol fin s'hydratent avec l'eau du sol pour former du silicate d'hydrate de calcium (CSH) et de l'aluminate d'hydrate de calcium (CAH), qui à leurs tours provoquent des liaisons entre particules dans le processus de réaction pouzzolanique augmentant ainsi la résistance à la compression simple. Ces composants cimentaires obtenus sont caractérisés par leur résistance élevée et leur faible variation de volume

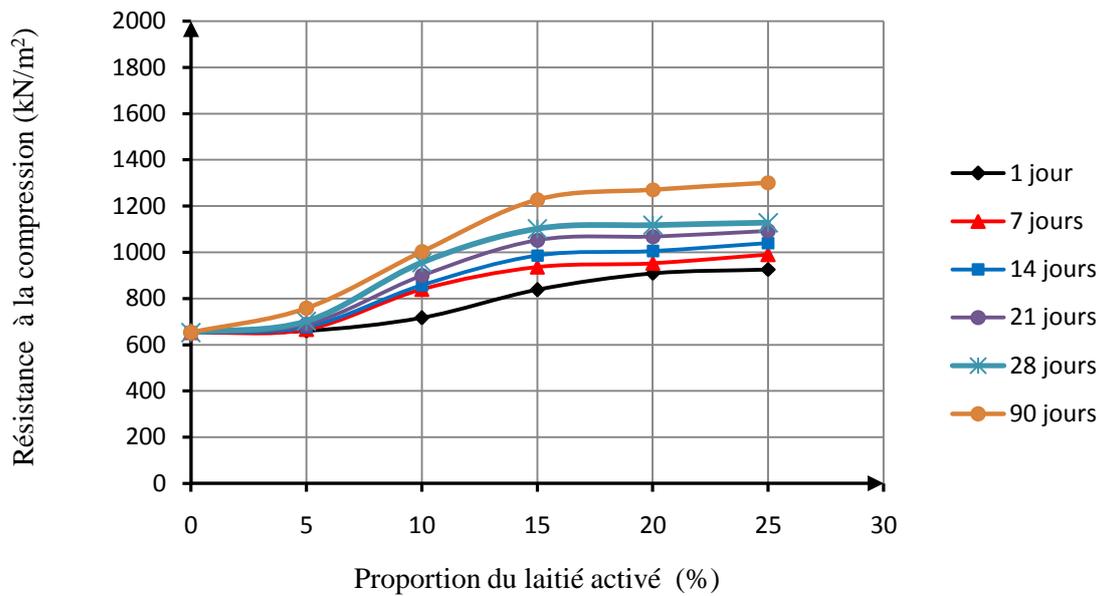


Figure 8. Influence du laitier activé et le temps de cure sur la résistance au cisaillement non confinée

3.7. Influence du temps de prise sur la résistance à la compression simple

La figure 9 présente la relation entre la résistance à la compression simple et le temps de cure. Selon cette dernière, le sol traité avec le laitier activé a montré une nette amélioration de la résistance de compression simple lorsque la quantité d'additifs et d'autre part le temps de pris et tendent à augmenter. Au début, l'augmentation de la résistance semble plus rapide puis par la suite elle ralentit avec l'accroissement du temps de cure. Le pourcentage de liant hydraulique a un effet significatif sur la résistance du sol comme indiqué auparavant mais dans ce cas pour toutes les périodes de prise. Il faut noter également que lorsque la quantité d'additif est importante, le taux d'augmentation de la résistance est élevé et par conséquent une meilleure amélioration de résistance est obtenue. Ces résultats sont dus à la réactivité du laitier par de la chaux hydratée qui a abouti à une meilleure réaction pouzzolanique dans le temps. Cette réaction produit des hydrates de silicate de calcium (CSH) et des hydrates d'aluminate de calcium (CAH) stables à mesure que le calcium provenant du sol réagit avec les aluminates et les silicates solubles dans le sol pour former des matières cimentaires liant les particules de sol.

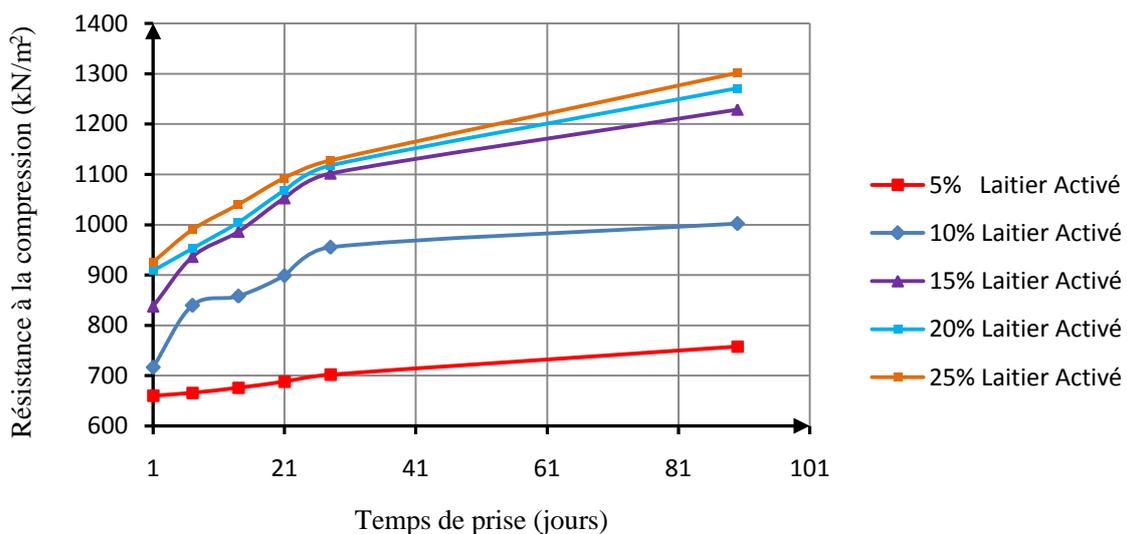


Figure 9. Influence du laitier activé et le temps de cure sur la résistance à la compression simple

4. CONCLUSIONS

Le présent article a pour objectif de caractériser et d'étudier le comportement mécanique d'un sol fin préparé en laboratoire avec un mélange de 85% de kaolin et 15% de bentonite stabilisé avec du laitier granulé et broyé de haut fourneau produit localement pour son éventuel utilisation dans les constructions linéaires de génie civil telles que les routes, les autoroutes et les pistes d'aérodromes. Sur la base des résultats obtenus lors de cette étude, les conclusions suivantes ont été tirées :

1. 5% de stabilisant est le pourcentage initial utilisé pour le traitement des sols fins
2. Avec les augmentations de pourcentage du laitier granulé broyé, la densité spécifique du sol fin augmente. Tandis que, L'activation de ce dernier avec de la chaux hydratée entraîne des valeurs de densité spécifique encore plus élevées.
3. L'addition du laitier granulé broyé a provoqué une translation de la courbe granulométrique des échantillons traités, loin de l'échantillon non traité vers le côté plus grossier. Avec l'augmentation de cet additif, le pourcentage des particules fines diminue provoquant un meilleur renforcement de sol.
4. Les échantillons traités avec le laitier granulé broyé uniquement ont montré une réduction des limites de liquide et de la plasticité alors que l'indice de plasticité semble pratiquement inchangé. Par contre, l'ajout du laitier granulé broyé des hauts fourneaux activé avec la chaux hydratée au sol augmente la limite de plasticité, diminue la limite liquidité et l'indice de plasticité, ce qui donne une meilleure maniabilité au sol permettant l'allongement de la période des travaux sur site aux saisons humides.
5. Avec l'augmentation de la quantité du laitier granulé broyé, la teneur en eau optimale diminue tandis que la densité sèche maximale augmente. L'activation de cet ajout avec de la chaux hydratée tend à augmenter la teneur en eau optimale et à réduire la densité sèche maximale. Ce changement est considéré comme une indication de l'amélioration des caractéristiques de compactage du sol stabilisé au laitier activé.
6. Le sol traité au laitier granulé broyé activé avec la chaux hydratée montre une augmentation de la résistance au cisaillement non confinée. Celle-ci s'améliore encore plus avec l'augmentation de la quantité d'additif ajoutée et le temps de cure.
7. La variation de la compression simple en fonction du temps de prise semble être plus importante durant les premières semaines de prise puis s'atténue avec le temps. Le pourcentage de liant hydraulique a un effet significatif sur la résistance non confinée du sol pendant toute la période de prise. L'augmentation de la quantité d'ajout entraîne une amélioration plus rapide et meilleure résistance à la compression non confinée du sol.
8. Sur la base des trouvailles mentionnées ci-dessus, le laitier granulé broyé des hauts fourneaux activé à la chaux hydraulique peut être l'additif recommandé pour la stabilisation des sols fins. Un pourcentage d'ajout de 20% de laitier activé est recommandé pour l'amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques du sol à particules fines. Au-delà de ce pourcentage d'additif, l'ajout de quantité supplémentaire de laitier granulé broyé ne semble pas apporter grand choses à la résistance à la compression simple du sol stabilisé.

REFERENCES

- [1] Al-Rawas A.A &Mattheus F.A.G., 2006. Expansive Soils-Recent Advances in characterization and treatment.Taylor and Francis Group-library, London, UK. 526p.
- [2] Khemissa M., Mahamedi A., 2014 Cement and lime mixture stabilization of an expansive over consolidated clay, *Applied Clay Science* vol. 95, pp. 104–110
- [3] Chen F. H., 1988. Foundations on Expansive Soils. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam Edition. 463p.
- [4] Nelson J.D & Miller D. J., 1992.Expansive soils-problems and practice in foundation and pavement engineering. Wiley, New York. 259p.
- [5] Bhattacharja S., Bhatta J.I., and Todres H.A., 2003.Stabilization of clay soils by Portland cement or Lime-A critical review of literature.*PCA R&D Serial N°. 2066, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.*
- [6] Cost T. M. & Aldrich R., 2004.Feasibility considerations: Use of slag cement (GGBFS) in soil stabilization.*Transportation Research Board.*
- [7]Salvati L., Vichit-Vadakan W., 2004.Investigation of factors affecting the improvement of clay with ground blast furnace slag-US Department of Transportation SPR-2953.

- [8] Al-Rawas A.A., 2002. Microfabric and mineralogical studies on the stabilization of an expansive soil using cement by-pass and some types of slag. *Candian Geotechnical Journal* vol.39(20), pp. 1150-1167.
- [9] Rollings M.P. & Rollings, R.S., 1996. *Geotechnical materials in construction*. Ed. McGraw-Hill, New York
- [10] Cioroi M., Nestor L., 2005. Recycling Possibilities of Metallurgical Slag. *The Annals of Dun area de Jos University of Galati., Metallurgy and Material Science*, Fascicule IX, N°1.
- [11] Wild S., Kinuthia J.M., Jones G.I., Higgins D.D., 1998. Effects of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on the strength properties of lime-stabilized sulphate-bearing clay soils. *Engineering Geology*, Vol. 51, No.1, pp. 37-53.
- [12] 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 (GGBFS). *Engineering Geology*, Vol. 51, No.4, pp. 257-277.
- [13] Mäkikyro M., 2001. Industrial slag use in geotechnical engineering: slag in the geotechnical engineering project. *Geological Survey of Finland*, Special report, vol.32, pp.31-7
- [14] Liang Y., Li W., Wang X., 2013. Influence of Water Content on Mechanical Properties of Improved Clayey Soil Using Steel Slag. *Geotechnical and Geological Engineering*, vol 31(1), pp. 83-91.
- [15] James R., Kamruzzaman A.H.M., Haque A., Wilkinson A., 2008. Behavior of lime-slag treated clay. *Ground improvement*, 161 Issue G14. pp. 207-216.
- [16] Dayioglu A., Aydilek A., Cetin B., 2014. Preventing Swelling and Decreasing Alkalinity of Steel Slags Used in Highway Infrastructures. *Journal of the Transportation Research Board*, 2401, pp. 52-57.
- [17] Kumar A., Pandey V., Murari K., Sing J.P., 2014. Soil Stabilization Using Ground Granulated Blast Furnace Slag. *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol.4 (5) (Version 2), pp.164-171.
- [18] Khan N.T., Walzade S., Yadav R.K., 2017. Study on the Effect of Blast Furnace Slag on Geotechnical Characteristics of Black Cotton Soil. *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol.7(1), pp.1-3.
- [19] Salvati L., Pozolo A., 2012. Factors Affecting the Improvement of Clay with Blast-Furnace Slag, *Proceedings of Grouting and Deep Mixing 2012*. pp. 1748-1757.
- [20] Osinubik J., 2006. Influence of compacting efforts on lime-slag treated tropical black clay. *Journal of materials in civil Engineering*. Vol. 18 (2), pp. 175-181
- [21] ASTM C204-07, Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus. *American society of testing Materials*.
- [22] ASTM D 422-90, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. *American society of testing Materials*.
- [23] Eades J. L., Grim R. E., 1966. A quick test to determine lime requirement for lime stabilization. *Highway Research Record*, Vol. 139, pp. 61-72.
- [24] ASTM D 854-00. Standard Test for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. *American society of testing Materials*.
- [25] ASTM D 4318. Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. *American society of testing Materials*.
- [26] ASTM D 1557. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (2,700 KN-m/m³). *American society of testing Materials*.
- [27] ASTM D 2166. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. *American society of testing Materials*.
- [28] Cocka E., Yazici V., Ozaydin V., 2009. Stabilization of Expansive Clays using Granulated Blast furnace Slag (GBFS) and GBFS-Cement. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 27, pp. 489-499.