



Journal Homepage: - www.journalijar.com

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI: 10.21474/IJAR01/19841

DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/19841>



RESEARCH ARTICLE

ETUDE COMPARATIVE DES CARACTERISTIQUES DU SOL PAR STABILISATION AU CIMENT ET A LA CHAUX EN CONSTRUCTION ROUTIERE : CAS DU SOL DE BUGANGA A MINOVA/PROVINCE DU SUD KIVU/RDC

Jules Anicet Sagnon Yamonche¹, Ally Alnabiwe², Léandre Mathias Vissoh¹, Grâce Muhiwa Masika² and Alain Adomou¹

1. Laboratoire des Procédés et Innovations Technologiques de Lokossa, Université Nationale des Sciences Technologies, Ingénierie et Mathématiques (UNSTIM) d'Abomey, république du Bénin.
2. Laboratoire de génie civil Université Libre du Pays des Grands Lacs ULPGL/Goma République Démocratique du Congo.

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 07 September 2024

Final Accepted: 14 October 2024

Published: November 2024

Key words:-

Load-Bearing Capacity, Modified Proctor, Addition, Pavement Beds

Abstract

This work focused on the comparative study of soil stabilization with cement and lime. The purpose of this study is to carry out a comparative study of the stabilization of soil with cement and lime in order to increase the bearing capacity of the Minova soil to enhance this soil for use in road constructions (base layers and road bed) but also to contribute to the identification of this soil by studying the influence of stabilizers on the characteristics of the Minova soil. To achieve the expected results. Tests for the determination of the parameters of identification, compaction (modified Proctor) and bearing capacity (CBR) on the soil of BUGANGA in its natural state and after stabilization with cement and lime. The results obtained showed that the soil of BUGANGA is made up of 47.25% of the fines, therefore classified as fine soils. As far as the type of soil is concerned, it is a sandy clay with little plasticity characterized by a low bearing capacity (CBR=5.37%) with a medium swelling. Thus, due to its low load-bearing capacity, the BUGANGA soil has been stabilized to increase its bearing capacity. The results obtained showed that the addition of cement and lime increases the bearing capacity of the BUGANGA soil. Hence, by adding different contents of cement and lime, the CBR increased from 5.37%. In various stabilization formulations with lime and cement, BUGANGA soil is suitable for use in pavement beds.

Copyright, IJAR, 2024.. All rights reserved.

Introduction:-

De nos jours, le contexte de développement durable doit être soigneusement considéré dans toutes les activités humaines pour protéger l'environnement et pour la gestion des ressources naturelles. La construction est une activité qui a généralement le plus fort impact sur la nature. En effet, lors des travaux de génie civil, notamment les travaux routiers (remblais, couches de forme ou d'assises autoroutiers, routiers, ferroviaires, ...etc.), l'aménagement du territoire joue un rôle primordial, non seulement sur le budget d'investissement mais aussi sur des impacts néfastes sur l'environnement naturel [2].

Corresponding Author:- Jules Anicet Sagnon Yamonche

Address:- UNSTIM -Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques d'Abomey. (BENIN).

A cause de la raison économique associée à un souci écologique croissant de plus en plus lors de la réalisation des travaux routiers, on souhaite éviter du transport de terre et valoriser des matériaux locaux en réutilisant les sols qui sont extraits d'un déblai, puis transportés, et enfin mis en œuvre en remblai. A cet effet, les sols peuvent connaître une amélioration des propriétés en fonction des propriétés recherchées eu égard au milieu dans lequel ils vont intervenir.

Actuellement, la technique de traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques est largement utilisée pour améliorer des propriétés mécaniques du sol sur l'emprise des projets dans le monde. Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au ciment consiste à incorporer au sein des sols, cet agent de traitement, avec éventuellement de l'eau et les mélanger sur place avec pour objectif d'obtenir un matériau de construction de qualité recherchée en utilisant les affinités chimiques du sol et de la chaux ou du ciment. Comparé à d'autres méthodes de traitement des sols notamment mécanique, etc., cette méthode présente beaucoup d'avantages notamment techniques, économiques, écologiques et environnementaux [3]. Le choix de l'une ou de l'autre dépend de plusieurs paramètres tels que : les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser, les conditions d'environnement ainsi que les charges que le sol en place doit supporter. Utilisée dans les constructions routières, la stabilisation chimique des sols notamment au ciment et à la chaux a pour objectif d'améliorer les propriétés des sols et valoriser certains types de sol jusque-là délaissés car présentant des caractéristiques mécaniques faibles.

En somme, le sol de Buganga présente des imperfections diverses notamment une faible portance, des déformations importantes sous l'action des charges, etc. car il a été constaté pendant la période pluvieuse des bourbiers qui prennent naissance sur les routes en terre mais aussi on assiste à des glissements de terre dans cette cité. Le stabiliser permettrait de le valoriser pour des projets spécifiques. La stabilisation chimique des sols est une pratique courante et a fait l'objet de plusieurs études. CISANGANI a pu montrer que la stabilisation du sol de Masisi au couple chaux-ciment améliore sa portance. Pour la première composition soit 4% chaux – 6% ciment, le CBR est passé de 14% à 44% et pour la deuxième composition soit 2% chaux – 8% ciment, le CBR est passé de 14% à 45%. D'où le matériau stabilisé est bon pour les infrastructures routières selon les normes en vigueur en RDC [4].

AMANI CHIRIMWAMI Didier a montré aussi que l'ajout de la chaux hydraulique comme liant stabilisateur augmente la résistance du sol de Nyakavogo. Pour la première composition soit 6% de la chaux hydraulique, le CBR est passé de 4% à 18%, pour la deuxième composition soit 8% de la chaux hydraulique, le CBR est passé de 4% à 25% et enfin pour la troisième composition soit 10% de la chaux hydraulique, le CBR est passé de 4% à 36% [5].

Le présent travail se propose d'étudier comparativement la stabilisation du sol de Buganga à Minova au ciment et à la chaux en vue de sa meilleure utilisation dans les constructions routières.

Pour arriver aux résultats escomptés, il sera nécessaire de caractériser le sol de Buganga, de le stabiliser d'une part au ciment et de l'autre part à la chaux afin d'évaluer les propriétés mécaniques de ceux-ci pour leur utilisation dans les constructions routières.

La démarche méthodologique est articulée sur la méthode documentaire qui permettra de développer les connaissances sur le sujet de recherche, la méthode expérimentale employée au laboratoire pour les différents essais et enfin la méthode comparative pour établir une comparaison entre les différents ajouts utilisés.

La stabilisation est un procédé qui consiste à incorporer dans le sol un liant afin de lui conférer des propriétés géotechniques et mécaniques relativement bonnes par rapport à celles qu'il possédait à son état initial. Le liant y incorporé maintient alors la densité du sol sèche et le garde imperméable, ce qui permet au sol de maintenir ses caractéristiques mécaniques malgré les variations climatiques, d'où l'amélioration de la résistance mécanique et la diminution de la sensibilité à l'eau.

Materiels Et Methodes:-

Les différents essais réalisés sur le sol de Minova dont les essais d'identification (analyse granulométrique, les limites d'Atterberg) et les essais de caractérisation mécanique (par la détermination des indices Proctor et CBR).

Détermination de la teneur en eau du sol

L'essai a été réalisé suivant la norme NF P 94-050 sur un échantillon de sol remanié à partir de la formule 1.

Cette teneur en eau naturelle dépend beaucoup plus de conditions environnementales du milieu où s'est effectué le prélèvement (le climat, le temps...) et de conditions de mise en œuvre liées au prélèvement et à la réalisation de l'essai (transport de l'échantillon, manipulation de l'échantillon, appréciation du résultat...) [7]

$$w = \frac{m_h - m_d}{m_d} * 100 \quad (1)$$

Avec : w : la teneur en eau exprimée en pourcentage ; m_h : la masse du sol humide ; m_d : la masse du sol sec. Où m_h = m₁ - m₀ et m_d = m₂ - m₀

Matériels et appareillage utilisés

Une balance ; une étuve et des tares.

Mode opératoire

Laver la tare puis la peser pour déterminer m₀ ; Prélever l'échantillon du sol, l'introduire dans la tare et peser le tout pour déterminer m₁ ; Mettre à l'étuve et après dessiccation complète peser pour déterminer m₂.

Détermination des masses volumiques

Masse volumique apparente

Cet essai s'effectue directement après l'essai de la détermination de la teneur en eau W et cela suivant la norme NF P 94-053. [7]

Matériels et appareillage utilisés Détermination de la teneur en eau du sol

Une moule normalisée de volume connu V ; Une balance de précision et un outil à agrafer.

La masse volumique apparente ρ est obtenue suivant la formule 2 :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Avec m : masse du matériau ; V : volume du moule normalisé où m=m₁-m₀

Masse volumique absolue

L'essai consiste à déterminer la masse volumique des particules solides du sol. La masse a été obtenue par pesage et le volume a été mesuré au pycnomètre selon la norme NF P 94-054 à partir de la formule 3.

La masse volumique absolue est alors déterminée par :

$$\rho_s = \frac{\rho_w * m_0}{(m_2 + m_0 + m_1)} \quad (3)$$

Avec ; m₀ : la masse du sol, m₁ : la masse du pycnomètre, du sol et de l'eau distillée, m₂ : la masse du pycnomètre et de l'eau distillé, Où ρ_w=1g/cm³

Détermination du degré de saturation S_r

Le degré de saturation d'un sol est le niveau de remplissage des vides par l'eau. Il s'évalue par la relation 4.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{W * \rho_s}{e * \rho_w} \quad (4)$$

Avec ; S_r : le degré de saturation, V_w : le volume de l'eau, V_v : le volume des vides, W : la teneur en eau naturelle, ρ_s : la masse volumique absolue, ρ_w : la masse volumique de l'eau ; e : l'indice des vides

Détermination de l'indice des vides et de la porosité

L'indice des vides « e » a été trouvé grâce à la relation de la masse volumique absolue avec la masse volumique sèche des grains solides d'un sol à partir de la formule 5. La porosité « n » quant à elle est la valeur pondérale indiquant la proportion des vides par rapport aux grains solides d'un sol et est trouvée à partir de la relation 6.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} \quad (5)$$

Avec ; e : l'indice des vides, V_v : me volume des vides, V_s : le volume des grains solide, ρ_s : la masse volumique absolue, ρ_d : la masse volumique sèche

$$n = \frac{e}{e+1} \quad (6)$$

Avec ; n : la porosité, e : l'indice des vides

Analyse Granulométrique

Cet essai a été effectuée suivant la norme NF P 94-056. Les pourcentages obtenus ont été évalué en fonction de la relation 7.

Matériel et appareillage utilisés

Une série de tamis ; une étuve ; un mortier et un pilon ;des tares ; une balance ;l'eau courante.

Les passants du tamis de 80µm seront retenus si l'opérateur veut compléter son essai de granulométrie par voie humide avec la sédimentométrie. Sinon il ne disposera pas le bac de fond pour recueillir les particules fines passant au dernier tamis. La masse des particules fines sera alors l'écart obtenu entre la masse de départ et la somme de refus obtenus après séchage [7].

$$\% = \frac{\text{poids du refus cumulé}}{\text{poids avant lavage}} * 100 \quad (7)$$

Détermination des limites d'Atterberg

Limite de liquidité (W_L)

Cet essai a été réalisé suivant la norme NF P 94-051.

Matériel et appareillage utilisés

Un plateau pouvant contenir tout le matériau après lavage ; Un tamis de 0.4mm pour lavage ; Une pipette d'eau ; un appareil de Casagrande avec tous ses accessoires ;un bac pour le malaxage ; une étuve pour la détermination de la teneur en eau ; une balance ; des tares.

Limite de plasticité (W_p)

La limite de plasticité a été déterminée suivant la norme NF P 94-051. Le matériau est roulé sous forme d'un petit rouleau plein d'environ 3 à 4 mm.

Matériel et appareillage utilisés

Un tamis de 0.4mm ; une plaque métallique ; une pipette ; une étuve.

Indice de plasticité

L'indice de plasticité a été déterminé suivant la norme NF P 94-057 par la formule 2.8.

$$I_p = W_L - W_p \quad (8)$$

Avec ; W_L : la limite de liquidité, W_p : la limite de plasticité

Indice de liquidité

L'indice de liquidité correspond à l'écart entre la teneur en eau naturel et la limite de plasticité sur l'indice de plasticité. Il permet de savoir rapidement si un sol est à l'état liquide, plastique, semi solide ou solide. Plus Il est élevé, plus l'argile est proche de l'état liquide et plus elle est dangereuse. Il a été déterminé par la relation 9.

$$I_L = \frac{w - W_p}{I_p} \quad (9)$$

Avec ; w : la teneur en eau naturelle du sol, w_p : la limite de plasticité, I_p : l'indice de plasticité

Indice de consistance

L'indice de consistance correspond à l'écart entre la limite de liquidité et la teneur en eau naturel sur l'indice de plasticité. Il a été déterminé par la relation 10.

$$I_c = \frac{w_L - w}{I_p} \quad (10)$$

Avec ; w_L : la limite de liquidité, w : la teneur en eau naturelle, I_p : l'indice de plasticité

Essais De Caracteristion Mecanique

Essai Proctor

La teneur en eau optimale et la densité sèche optimale sont obtenues suivant la norme NF P 94-093

Matériels et appareillage utilisés

Le moule Proctor constitué par un tube cylindrique métallique inoxydable de 15,2 cm de diamètre intérieur et 17,00 cm de hauteur, pourvu d'un fond et d'une hausse métallique amovibles ; la dame Proctor ; une étuve ; une règle à araser ; truelles pour malaxage ; des maillets, burins, couteaux, etc. pour le démoulage ; une balance ; une éprouvette graduée ; de l'eau ; des bacs.

Les résultats obtenus sont inscrits dans un tableau. L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes (2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%).

Essai CBR (California Bearing Ratio)

Il s'agit de déterminer expérimentalement des indices portants CBR qui permettent :

1. D'établir une classification des sols (GTR) ;
2. D'évaluer la traficabilité des engins de terrassement (IPI) ;
3. De déterminer l'épaisseur des chaussées (CBR augmente alors l'épaisseur diminue)

L'essai CBR a été effectué suivant la norme NF P 94-078 pour déterminer la portance du sol.

Les relations 11 et 12 sont applicables pour le poinçonnement à zéro jour et pour le poinçonnement après quatre jours d'immersion.

Il existe une relation qui lie le poinçonnement à zéro jour et le poinçonnement après quatre jours d'immersion. Ayant trouvé le CBR à zéro jour, il suffit juste de le multiplier par un coefficient pour obtenir le CBR après quatre jours d'immersion c'est-à-dire le CBR du sol dans les conditions défavorables. La valeur de ce coefficient est **0,63** [4].

L'indice CBR est trouvé par :

$$CBR_{2,5} = \frac{\text{Force appliquée } 2,5}{13,6} * 100 \quad (11)$$

$$CBR_{2,5} = \frac{\text{Force appliquée } 5}{20,3} * 100 \quad (12)$$

L'indice recherché correspond à la plus grande de ces deux valeurs.

Avec : Force appliquée 2,5 : la force (en KN) à 2,5mm d'enfoncement ; Force appliquée 5 : la force (en KN) à 5mm d'enfoncement ; 13,6 : forces (en KN) à 2,5mm d'enfoncement pour le matériau de référence ; 20,3 : forces (en KN) à 5mm d'enfoncement pour le matériau de référence [15].

Présentation et interprétation des résultats

Nous présentons les résultats obtenus pour les différents essais effectués au laboratoire et leur interprétation sur le sol de BUGANGA à l'état naturel ainsi qu'à l'état stabilisé par la chaux et le ciment.

Caractéristiques du sol de Buganga à l'état naturel

Les paramètres d'état du sol de Buganga sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1:- Valeurs obtenues sur les différents paramètres d'état du sol de BUGANGA.

Paramètres	Unités	Valeurs
Teneur en eau naturelle	%	11,08
Masse volumique apparente (ρ)	g/cm^3	1,08
Masse volumique sèche (ρ_d)	g/cm^3	0,97
Masse volumique des grains solides (ρ_s)	g/cm^3	2,49
Indice des vides (e)	-	1,56
Porosité (n)	%	60,93
Degré de saturation (Sr)	%	17,68

Détermination de la teneur en eau du sol

La composition granulométrique du sol de BUGANGA est présentée sur la figure 1 suivant les valeurs trouvées et représentées dans le tableau 1.

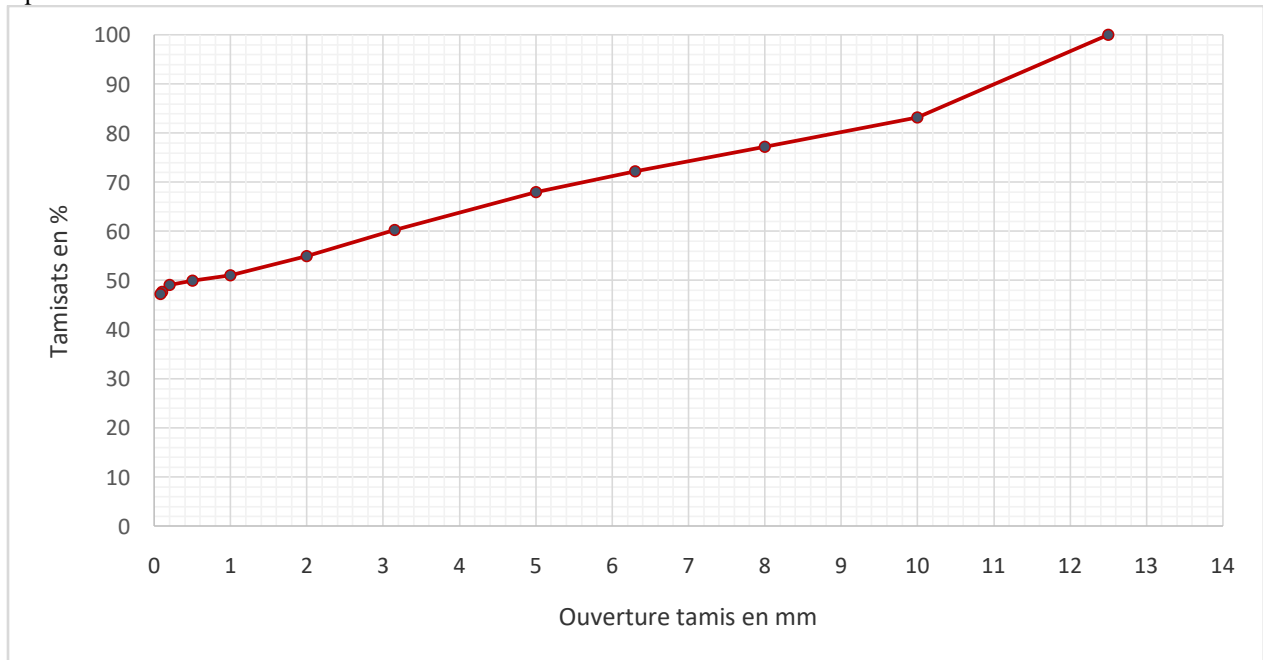


Figure 1:- Composition granulométrique du sol de BUGANGA.

Cette courbe obtenue montre que le pourcentage des fines est de 47,25% c'est-à-dire les particules passant au tamis de 0,080mm. Il en découle que le sol de BUGANGA appartient à la classe des sols fins.

Limites d'Atterberg

Le tableau 2 présente les limites d'atterberg du sol de BUGANGA à l'état naturel. La limite de plasticité moyenne obtenue pour les trois essais effectués est égale à 22,223% et la limite de liquidité trouvée à partir du graphique de la figure 2 est de 39%. De par les valeurs de la limite de liquidité et de la limite de plasticité nous trouvons que l'indice de plasticité du sol de BUGANGA à l'état naturel est de 16,77%.

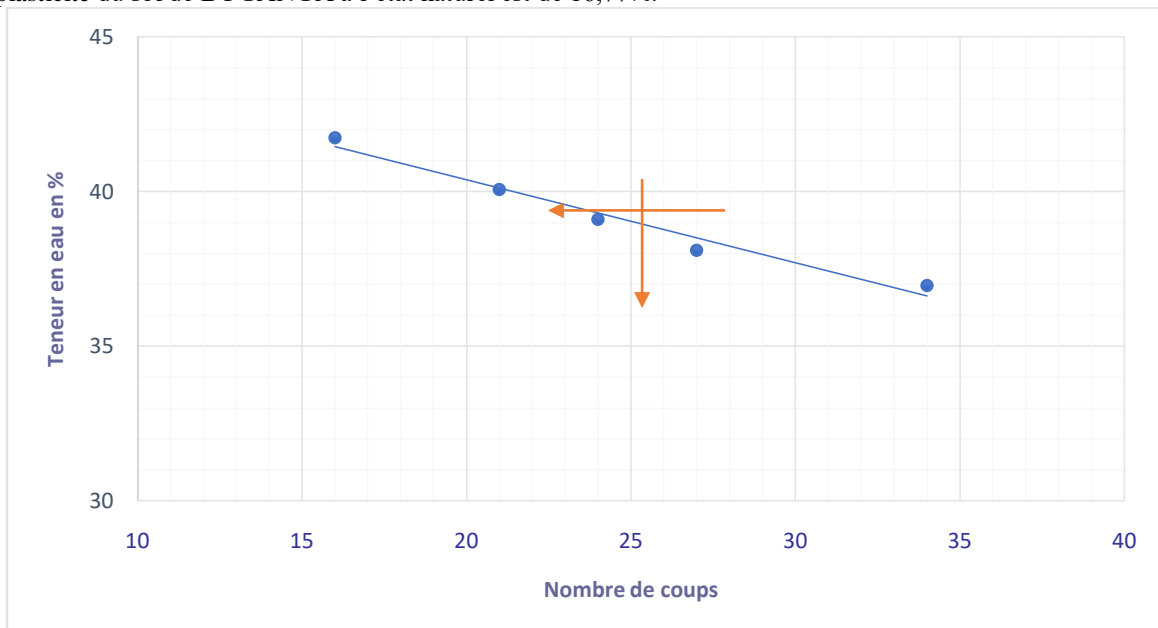


Figure 2:- Limite de liquidité du sol de BUGANGA à l'état naturel.

Classification du sol de BUGANGA

De par l'analyse granulométrique et les limites d'atterberg, il advient que le sol de BUGANGA appartient à la classe des sols fins. S'agissant du type, c'est une argile sableuse peu plastique avec un potentiel de gonflement moyen.

La figure 3 présente la courbe Proctor du sol de BUGANGA à l'état naturel.

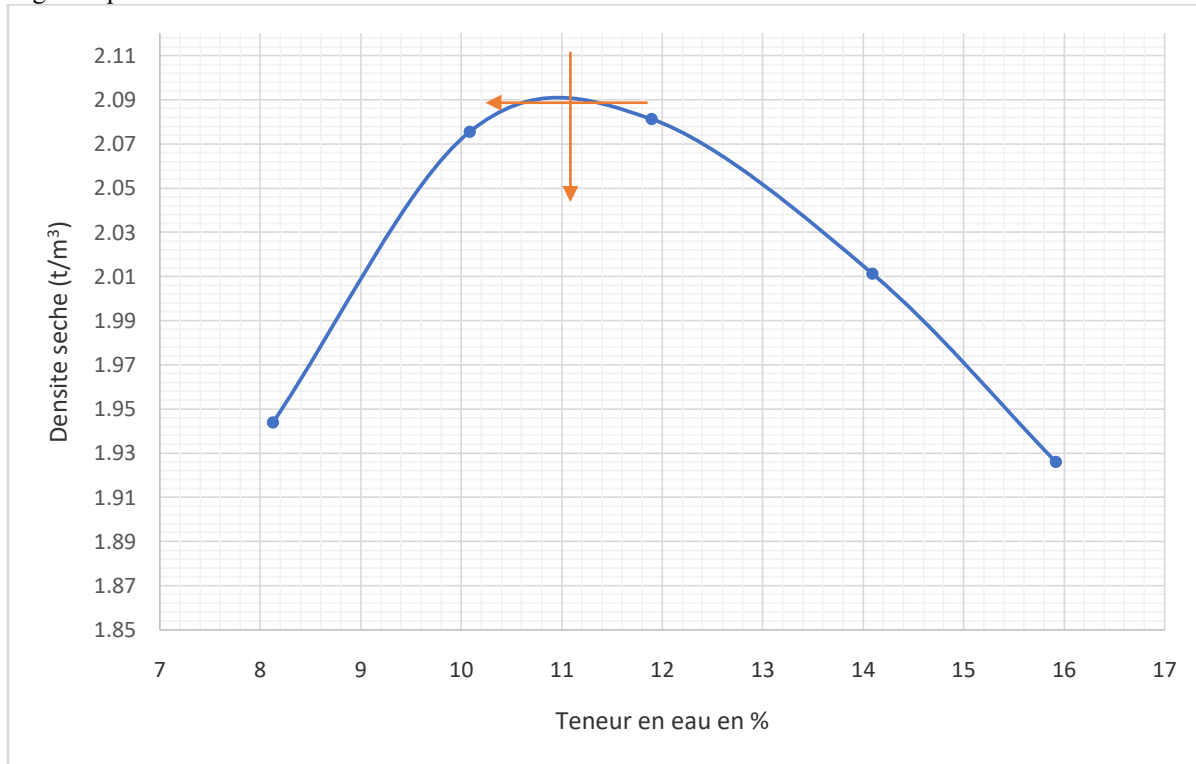


Figure 3:- Courbe Proctor du sol de BUGANGA.

La figure 3.3 montre que la densité sèche maximale du sol de BUGANGA est de 2,092 t/m³ avec une teneur en eau maximale de 10,9%.

Portance du sol de BUGANGA

La portance du sol a été déterminée par l'essai CBR après quatre jours d'immersion afin d'évaluer la portance du sol compacté soumis à des variations de régime hydrique. Les résultats de l'essai CBR sont présentés dans le tableau 3.3.

Tableau 2:- L'indice de Portance du sol de BUGANGA.

Enfoncement	Effort de pénétration	CBR après immersion
CBR _{2,5}	$\frac{0,65}{13,6} \times 100$	4,78%
CBR ₅	$\frac{1,09}{20,3} \times 100$	5,37%

Au vu du tableau 2 nous trouvons l'indice CBR après immersion étant égal à 5,37% correspondant à 95% de compactage. D'après le tableau en annexe 20, ayant trouvé un CBR compris entre 3% et 6% nous pouvons dire alors que le sol de BUGANGA appartient à la classe de portance S1 correspondant à une portance faible.

Caractéristiques du sol de Buganga stabilisé au ciment

Les limites de liquidité et de plasticité ont été déterminées sur différents pourcentages de ciment.

Limites d'Atterberg à 5% Ciment

Le tableau 2 présente les limites d'Atterberg du sol de BUGANGA à 5% de ciment.

La limite de plasticité moyenne obtenue pour les trois essais effectués est égale à 23,846% et la limite de liquidité trouvée à partir du graphique de la figure 4 ci-dessous est de 37,25%. De par les valeurs de la limite de liquidité et de la limite de plasticité nous trouvons que l'indice de plasticité du sol de BUGANGA à 5% de ciment est de 13,404%.

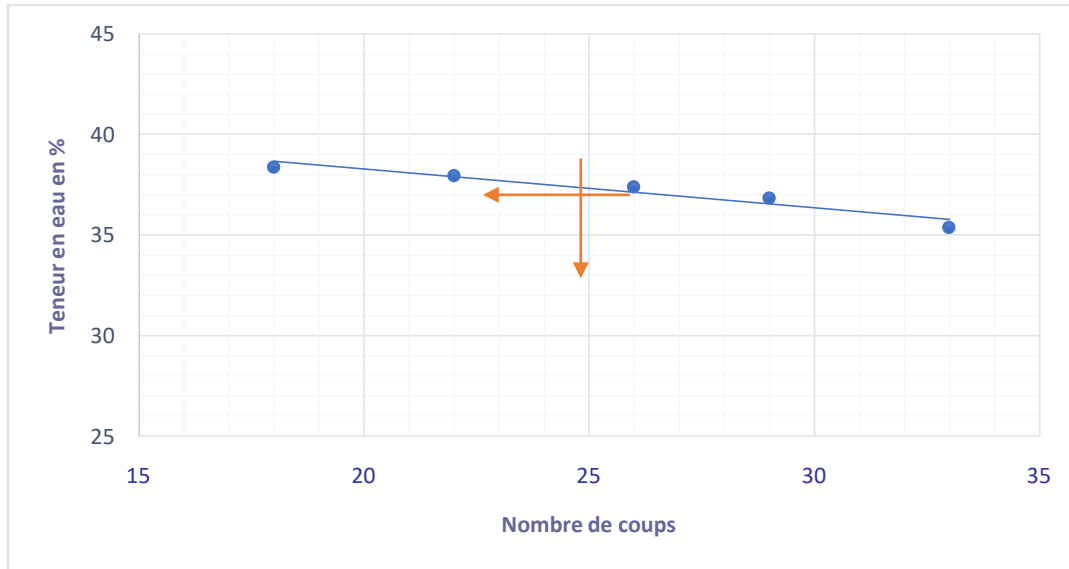


Figure 4:- Limite de liquidité du sol de BUGANGA à 5% de ciment.

Limites d'Atterberg à 7,5% Ciment

Le tableau 3 présente les limites d'Atterberg du sol de BUGANGA à 7,5% de ciment.

La limite de plasticité moyenne obtenue pour les trois essais effectués est égale à 25,30% et la limite de liquidité trouvée à partir du graphique de la figure 3.5 est de 35,9%. De par les valeurs de la limite de liquidité et de la limite de plasticité nous trouvons que l'indice de plasticité du sol de BUGANGA à 7,5% de ciment est de 10,6%.

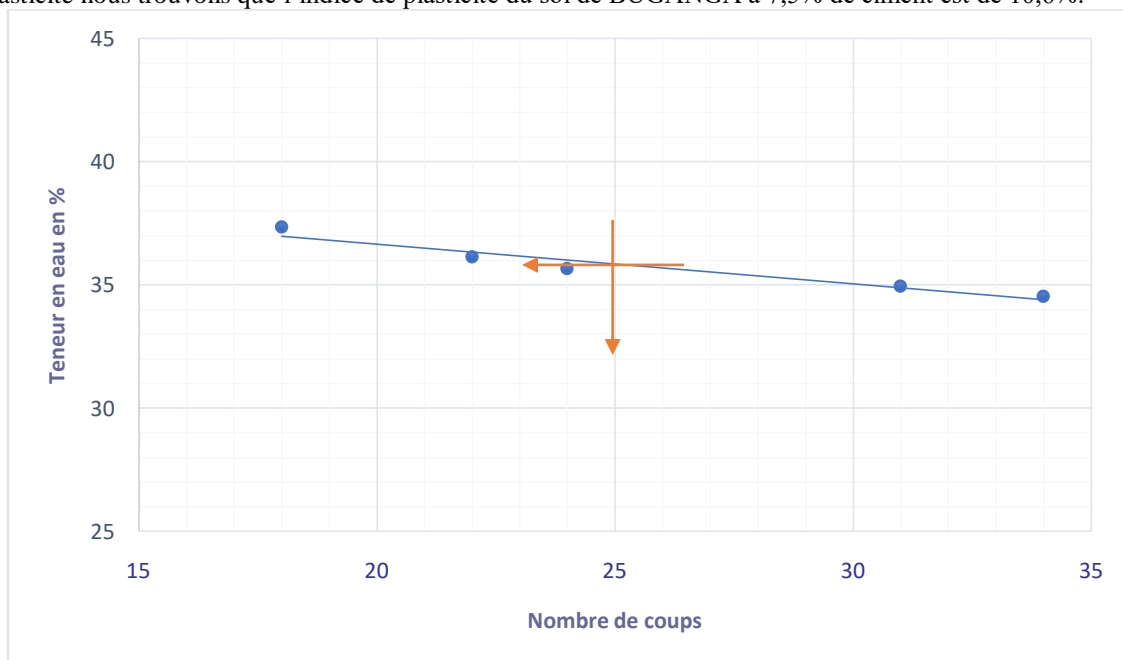


Figure 5:- Limite de liquidité du sol de BUGANGA à 7,5% de Ciment.

Limites d'Atterberg à 10% Ciment

Le tableau 4 présente les limites d'Atterberg du sol de BUGANGA à 10% de ciment.

La limite de plasticité moyenne obtenue pour les trois essais effectués est égale à 26,37% et la limite de liquidité trouvée à partir du graphique de la figure 3.6 est de 35,3%. De par les valeurs de la limite de liquidité et de la limite de plasticité nous trouvons que l'indice de plasticité du sol de BUGANGA à 10% de ciment est de 8,93%.

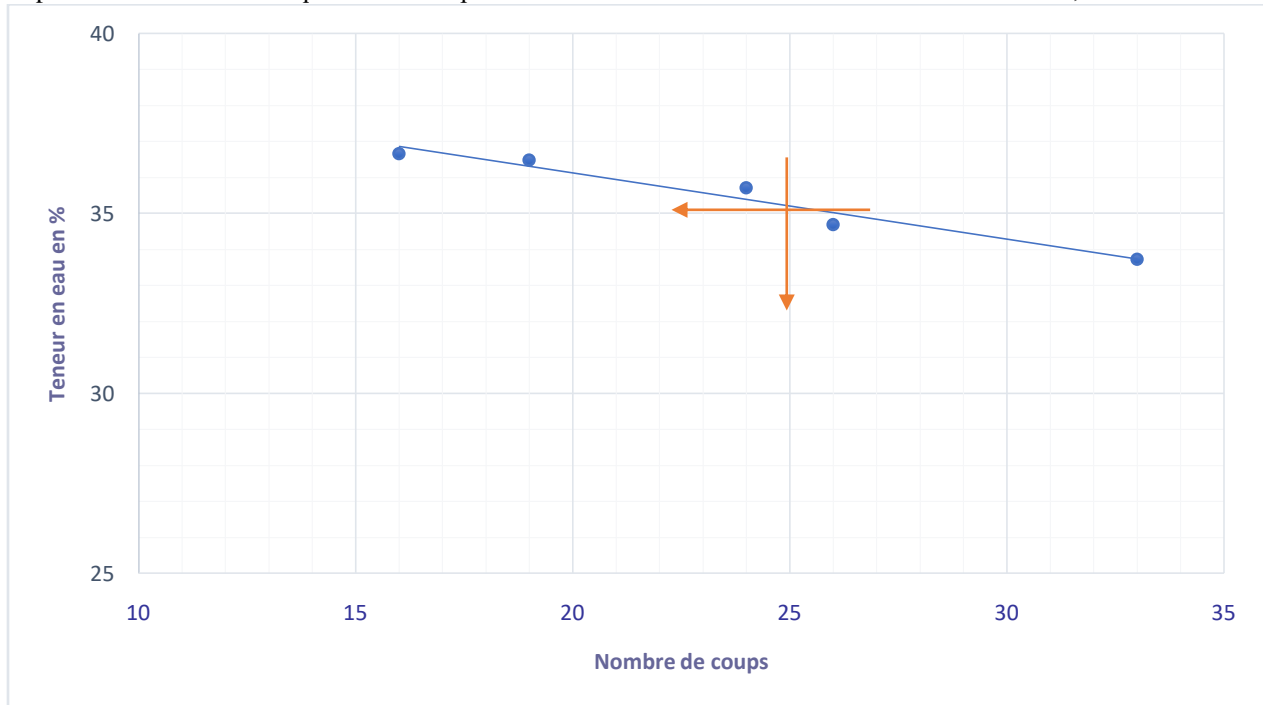


Figure 6:- Limite de liquidité du sol du BUGANGA à 10% de Ciment.

Les valeurs des limites d'Atterberg ainsi que les indices de plasticité sont regroupées dans le tableau 3.

Tableau 3:- Limites d'Atterberg du sol de BUGANGA en fonction du pourcentage en Ciment.

Teneur en ciment	0%	5%	7,5%	10%
Wl (%)	39,00	37,25	35,9	35,3
Wp (%)	22,223	23,846	25,30	26,37
Ip (%)	16,77	13,404	10,6	8,93

Ce tableau montre que la limite de liquidité ainsi que l'indice de plasticité du sol de BUGANGA diminuent en fonction de l'ajout en teneur en ciment. Quant à la limite de plasticité, elle augmente en fonction de l'ajout en teneur en ciment.

Evolution des caractéristiques Proctor modifié en fonction de la teneur en Ciment

Les résultats obtenus de l'essai Proctor en fonction du dosage en Ciment sont représentés dans le tableau 4 et les courbes obtenues sont données par les figures 7, 8 et 9.



Figure 7:- Courbe Proctor à 5% de Ciment.

La figure 7 montre que la densité sèche maximale est de $2,057 \text{ t/m}^3$ et la teneur en eau optimale est de 11,62% du sol de BUGANGA à 5% de ciment.



Figure 8:- Courbe Proctor à 7,5% de Ciment.

La figure 8 montre que la densité sèche maximale est de $1,965 \text{ t/m}^3$ et la teneur en eau optimale est de 13,2% du sol de BUGANGA à 7,5% de ciment.

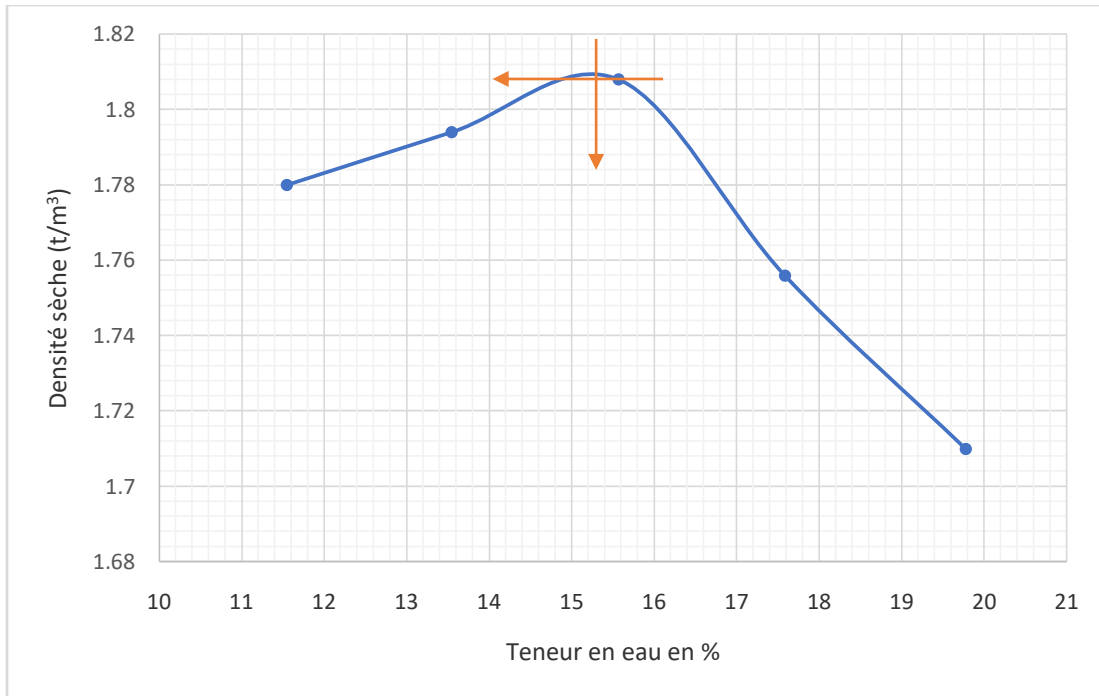


Figure 9:- Courbe Proctor à 10% de Ciment.

La figure 9 montre que la densité sèche maximale est de 1,81 t/m³ et la teneur en eau optimale est de 15,25% du sol de BUGANGA à 10% de Ciment.

Tableau 4:- Variation de la densité sèche maximale et de la teneur en eau en fonction de différents dosages en Ciment.

Dosage en Ciment	0%	5%	7,5%	10%
Densité sèche maximale	2,092	2,057	1,965	1,81
Teneur en eau optimale (%)	10,9	11,62	13,2	15,25

Ce tableau montre que l'ajout de la teneur en ciment diminue la densité sèche du sol de BUGANGA et augmente la teneur en eau optimale de ce dernier.

Evolution de l'indice CBR en fonction de la teneur en Ciment

CBR du sol de BUGANGA à 5% Ciment

L'indice CBR du sol de BUGANGA à 5% Ciment à zéro jour est présenté dans le tableau 5

Tableau 5:- L'indice de portance immédiat du sol de BUGANGA à 5% de Ciment.

Enfoncement	Effort de pénétration	CBR immédiat
CBR _{2,5}	$\frac{5,00}{13,6} \times 100$	36,76%
CBR ₅	$\frac{7,83}{20,3} \times 100$	38,57%

Le CBR immédiat est la plus grande valeur entre les deux enfoncements, ce qui correspond à 38,57%. La valeur du CBR dans les conditions défavorables est trouvée en multipliant la valeur du CBR immédiat par un coefficient qui est de 0,63.

D'où le CBR après immersion est alors de **24,29%**.

CBR du sol de BUGANGA à 7,5% Ciment

L'indice CBR du sol de BUGANGA à 7,5% Ciment à zéro jour est présenté dans le tableau 6.

Tableau 6:- L'indice de portance immédiat du sol de BUGANGA à 7,5% de Ciment.

Enfoncement	Effort de pénétration	CBR immédiat
CBR _{2,5}	$\frac{5,22}{13,6} \times 100$	38,38%
CBR ₅	$\frac{10,67}{20,3} \times 100$	52,56%

Le CBR immédiat est la plus grande valeur entre les deux enfoncements, ce qui correspond à 52,56%. La valeur du CBR dans les conditions défavorables est trouvée en multipliant la valeur du CBR immédiat par un coefficient qui est de 0,63.

D'où le CBR après immersion est alors de **33,11%**.

CBR du sol de BUGANGA à 10% Ciment

Les résultats de l'essai CBR après quatre jours d'immersion à 10% de Ciment est présenté dans le tableau 7.

Tableau 7:- L'indice de Portance après immersion du sol de BUGANGA à 10% de Ciment.

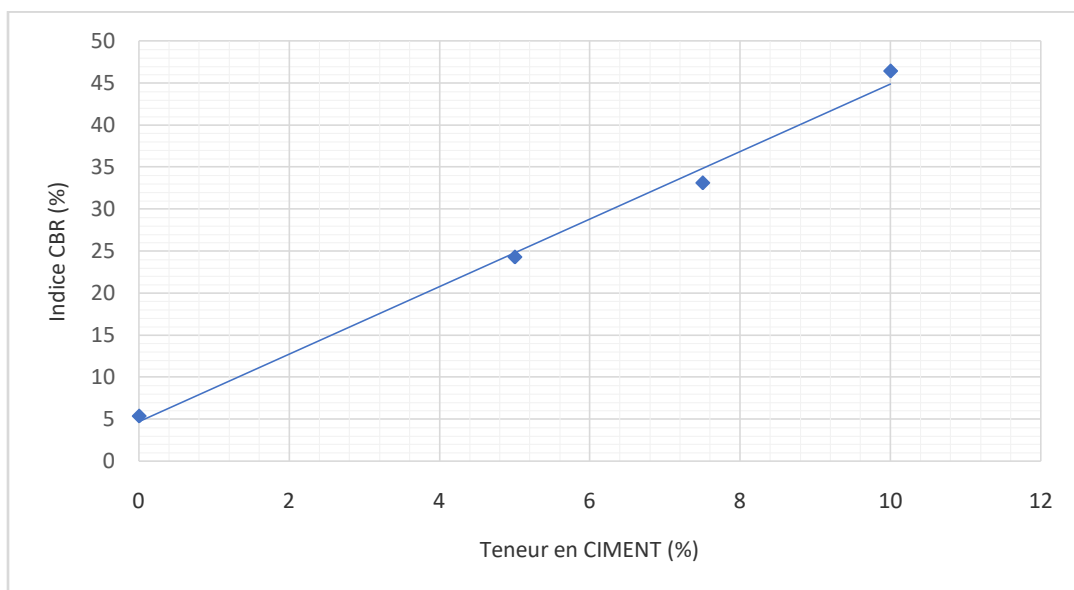
Enfoncement	Effort de pénétration	CBR après immersion
CBR _{2,5}	$\frac{6,30}{13,6} \times 100$	46,32%
CBR ₅	$\frac{9,35}{20,3} \times 100$	46,06%

Le CBR à quatre jours d'immersion est la plus grande valeur de ces deux enfoncements, ce qui correspond à **46,32%**.

L'évolution de l'indice CBR après immersion en fonction du dosage en Ciment est présenté dans le tableau 8 et la figure 10.

Tableau 8:- Variation de l'indice CBR en fonction du % de Ciment.

Teneur en Ciment (%)	0	5	7,5	10
CBR après immersion	5,37	24,29	33,11	46,32

**Figure 10:-** Evolution de l'indice CBR après immersion en fonction du dosage en Ciment.

Au vu du tableau 8 et de la figure 10, on remarque que l'ajout de la teneur en ciment augmente l'indice CBR du sol de BUGANGA.

Caracteristiques Du Sol De Buganga Stabilise A La Chaux

Evolution des limites d'Atterberg en fonction de la teneur en chaux

Les limites de liquidité et de plasticité ont été déterminées sur différents pourcentages de chaux.

Limites d'Atterberg à 5% Chaux

Le tableau 5 présente les limites d'Atterberg du sol de BUGANGA à 5% de chaux.

La limite de plasticité moyenne obtenue pour les trois essais effectués est égale à 25,699% et la limite de liquidité trouvée à partir du graphique de la figure 11 est de 37,8%. De par les valeurs de la limite de liquidité et de la limite de plasticité nous trouvons que l'indice de plasticité du sol de BUGANGA à 5% de chaux est de 12,101%.

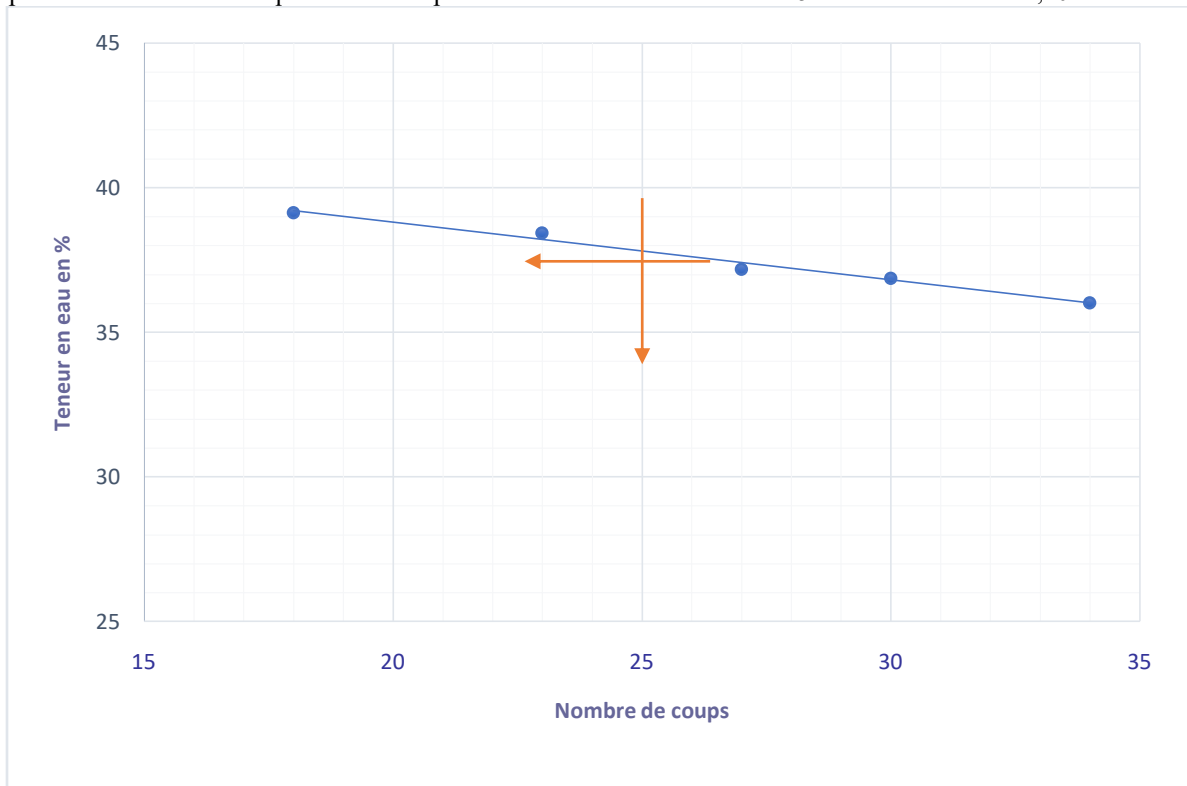


Figure 11:- Limite de liquidité du sol de BUGANGA à 5% de Chaux.

Limites d'Atterberg à 7,5% Chaux

Le tableau 6 présente les limites d'Atterberg du sol de BUGANGA à 7,5% de chaux.

La limite de plasticité moyenne obtenue pour les trois essais effectués est égale à 26,396% et la limite de liquidité trouvée à partir du graphique de la figure 12 ci-dessous est de 36,5%. De par les valeurs de la limite de liquidité et de la limite de plasticité nous trouvons que l'indice de plasticité du sol de BUGANGA à 7,5% de chaux est de 10,104%.

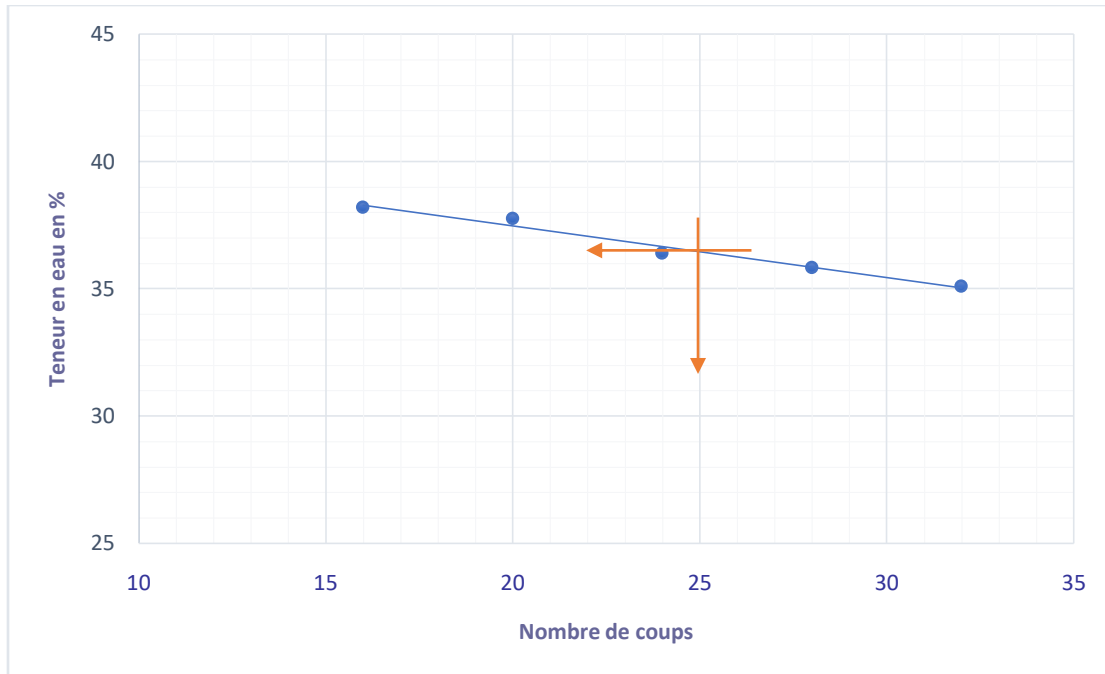


Figure 12:- Limite de liquidité du sol de BUGANGA à 7,5% de chaux.

Limites d’Atterberg à 10 % de chaux

Le tableau 7 présente les limites d’Atterberg du sol de BUGANGA à 10% de chaux.

La limite de plasticité moyenne obtenue pour les trois essais effectués est égale à 27,026% et la limite de liquidité trouvée à partir du graphique de la figure 13 est de 35,8%. De par les valeurs de la limite de liquidité et de la limite de plasticité nous trouvons que l’indice de plasticité du sol de BUGANGA à 10% de chaux est de 8,774%.

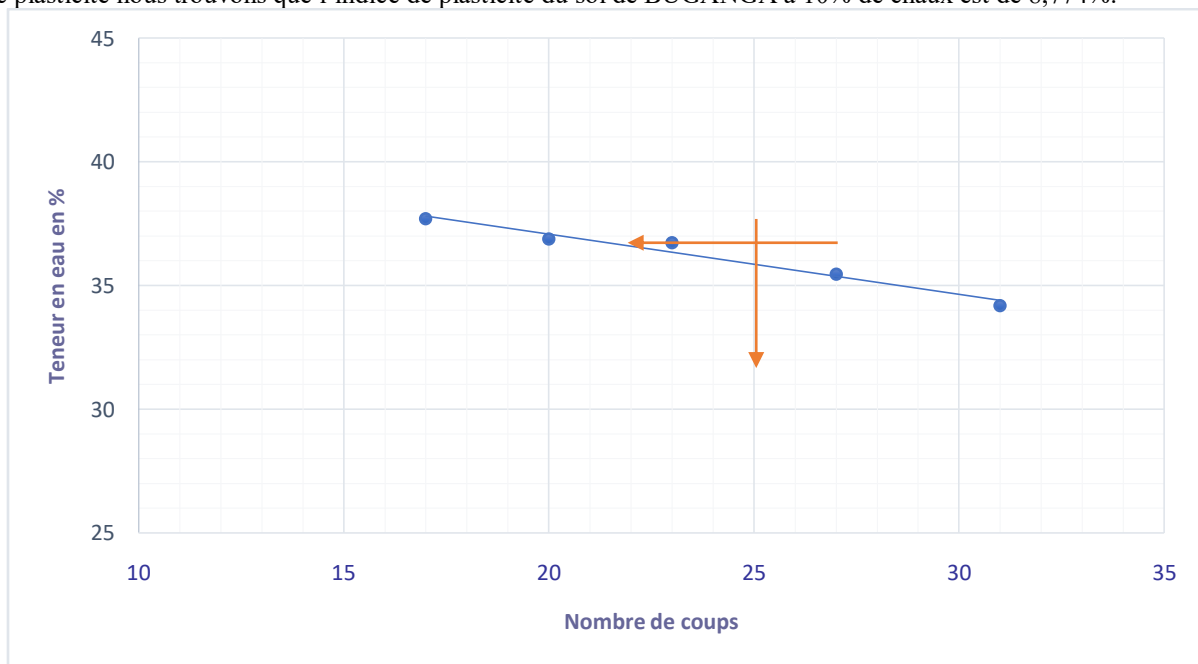


Figure 13:- Limite de liquidité du sol de BUGANGA à 10% de Chaux.

Les valeurs des limites d’Atterberg ainsi que les indices de plasticité sont regroupées dans le tableau 9.

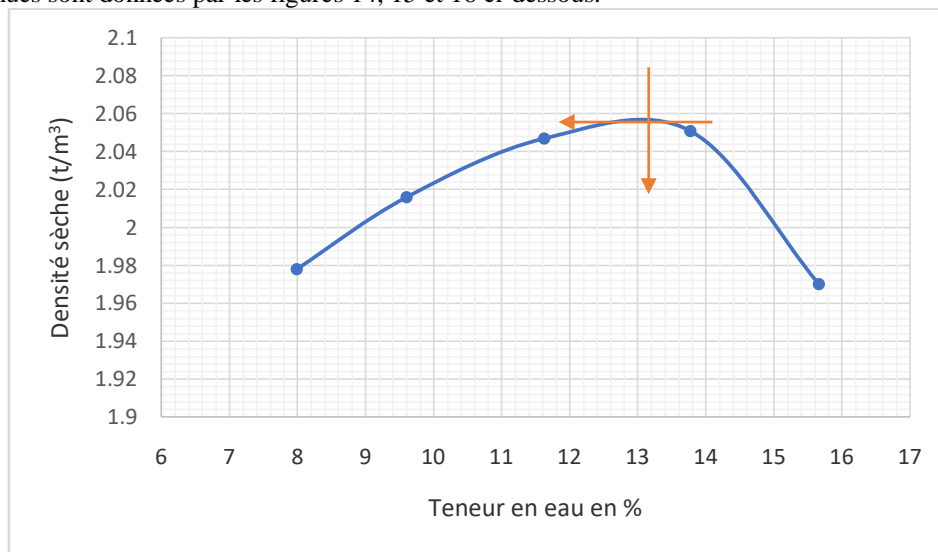
Tableau 9:- Limites d'Atterberg du sol de BUGANGA en fonction du pourcentage en chaux.

Teneur en chaux	0%	5%	7,5%	10%
Wl (%)	39,00	37,8	36,5	35,8
Wp (%)	22,223	25,699	26,396	27,026
Ip (%)	16,77	12,101	10,104	8,774

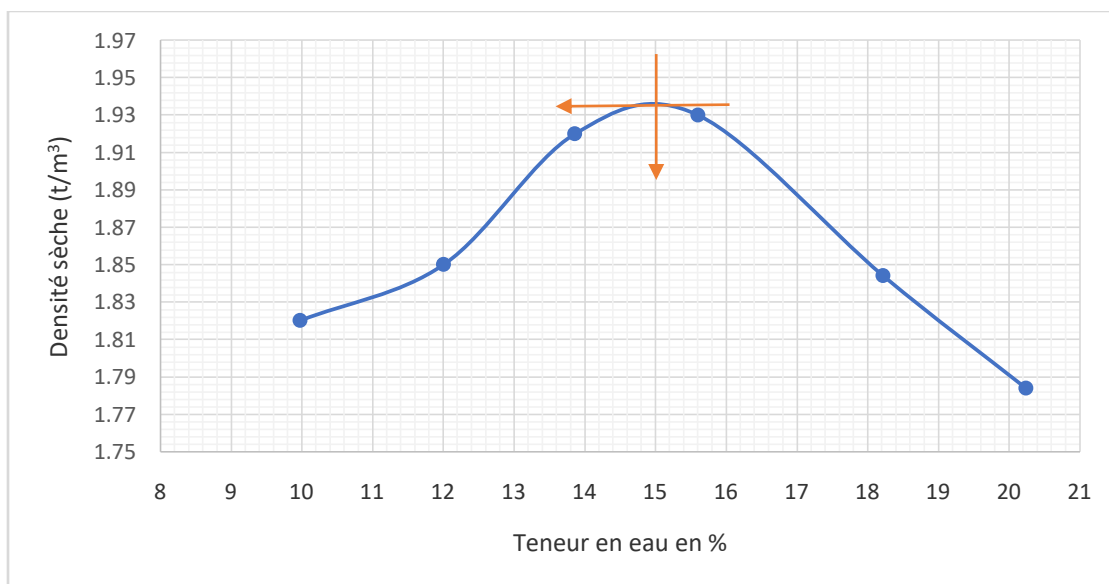
Au vu de ce tableau, on remarque que la limite de liquidité ainsi que l'indice de plasticité du sol de Buganga diminuent en fonction de l'ajout en teneur en chaux. Quant à la limite de plasticité, elle augmente en fonction de l'ajout en teneur en chaux.

Evolution des caractéristiques Proctor modifié en fonction de la teneur en chaux

Les résultats obtenus de l'essai Proctor en fonction du dosage en Chaux sont représentés dans le tableau 10 et les courbes obtenues sont données par les figures 14, 15 et 16 ci-dessous.

**Figure 14:-** Courbe Proctor à 5% Chaux.

La figure 14 montre que la densité sèche maximale est de 2,059 t/m³ et la teneur en eau optimale est de 13,2% du sol de BUGANGA à 5% de Chaux.

**Figure 15:-** Courbe Proctor à 7,5% Chaux.

La figure 15 montre que la densité sèche maximale est de $1,935 \text{ t/m}^3$ et la teneur en eau optimale est de 14,97% du sol de BUGANGA à 7,5% de Chaux.

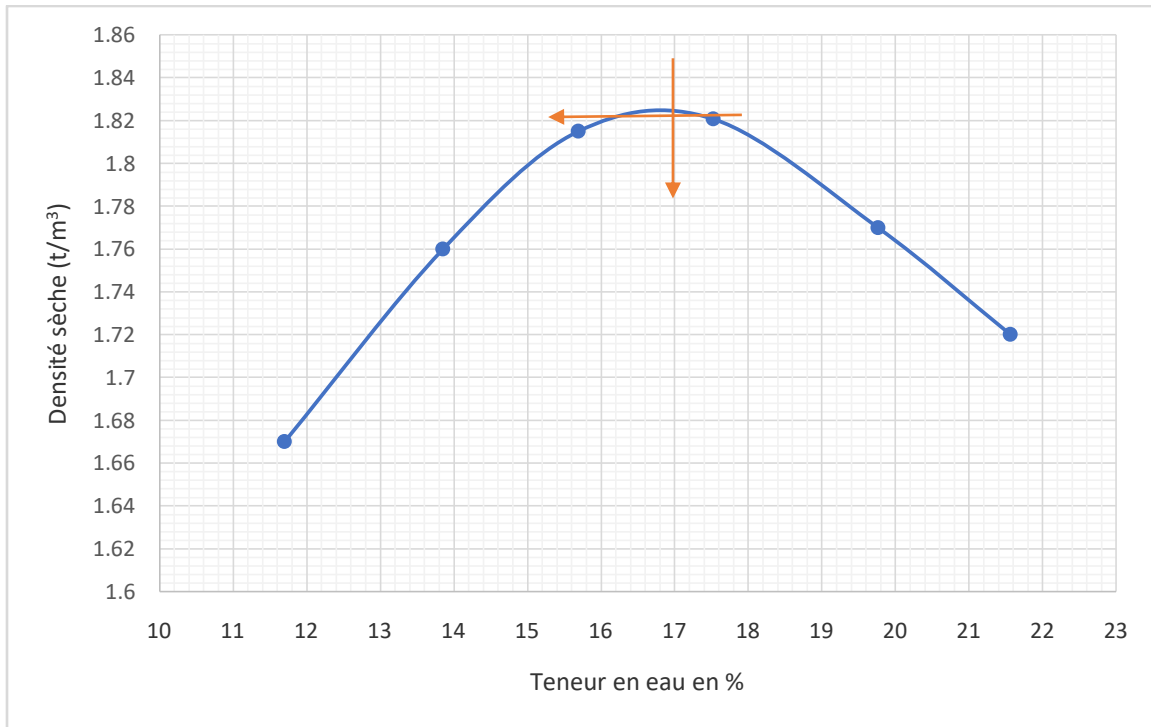


Figure 16:- Courbe Proctor à 10% Chaux.

La figure 16 montre que la densité sèche maximale est de $1,826 \text{ t/m}^3$ et la teneur en eau optimale est de 16,8% du sol de Buganga à 10% de Chaux.

Tableau 10 :- Variation de la densité sèche maximale et de la teneur en eau en fonction de différents dosages en chaux.

Dosage en Chaux	0%	5%	7,5%	10%
Densité sèche maximale	2,092	2,059	1,935	1,826
Teneur en eau optimal (%)	10,9	13,2	14,97	16,8

Au vu de ce tableau, on remarque que l'ajout de la teneur en chaux diminue la densité sèche du sol de BUGANGA et augmente la teneur en eau optimale de ce dernier.

Evolution de l'indice CBR en fonction de la teneur en chaux

CBR du sol de **BUGANGA** à 5% Chaux

L'indice CBR du sol de BUGANGA à 5% Chaux à zéro jour est présenté dans le tableau 11.

Tableau 11:- L'indice de portance immédiat du sol de BUGANGA à 5% Chaux.

Enfoncement	Effort de pénétration	CBR immédiat
CBR _{2,5}	$\frac{2,61}{13,6} \times 100$	19,19%
CBR ₅	$\frac{5,00}{20,3} \times 100$	24,63%

Le CBR immédiat est la plus grande valeur entre les deux enfoncements, ce qui correspond à 24,63%. La valeur du CBR dans les conditions défavorables est trouvée en multipliant la valeur du CBR immédiat par un coefficient qui est de 0,63. D'où le CBR après immersion est alors de **15,52%**.

CBR du sol de BUGANGA à 7,5% Chaux

L'indice CBR du sol de BUGANGA à 7,5% Chaux à zéro jour est présenté dans le tableau 12.

Tableau 12:- L'indice de portance immédiat du sol de BUGANGA à 7,5% Chaux.

Enfoncement	Effort de pénétration	CBR immédiat
CBR _{2,5}	$\frac{4,57}{13,6} \times 100$	33,603%
CBR ₅	$\frac{7,17}{20,3} \times 100$	35,32%

Le CBR immédiat est la plus grande valeur entre les deux enfoncements, ce qui correspond à 35,32%. La valeur du CBR dans les conditions défavorables est trouvée en multipliant la valeur du CBR immédiat par un coefficient qui est de 0,63. D'où le CBR après immersion est alors de **22,25%**.

CBR du sol de BUGANGA à 10% Chaux

Les résultats de l'essai CBR après quatre jours d'immersion à 10% de Chaux est présenté dans le tableau 13.

Tableau 13:- L'indice de portance après immersion du sol de BUGANGA à 10% Chaux.

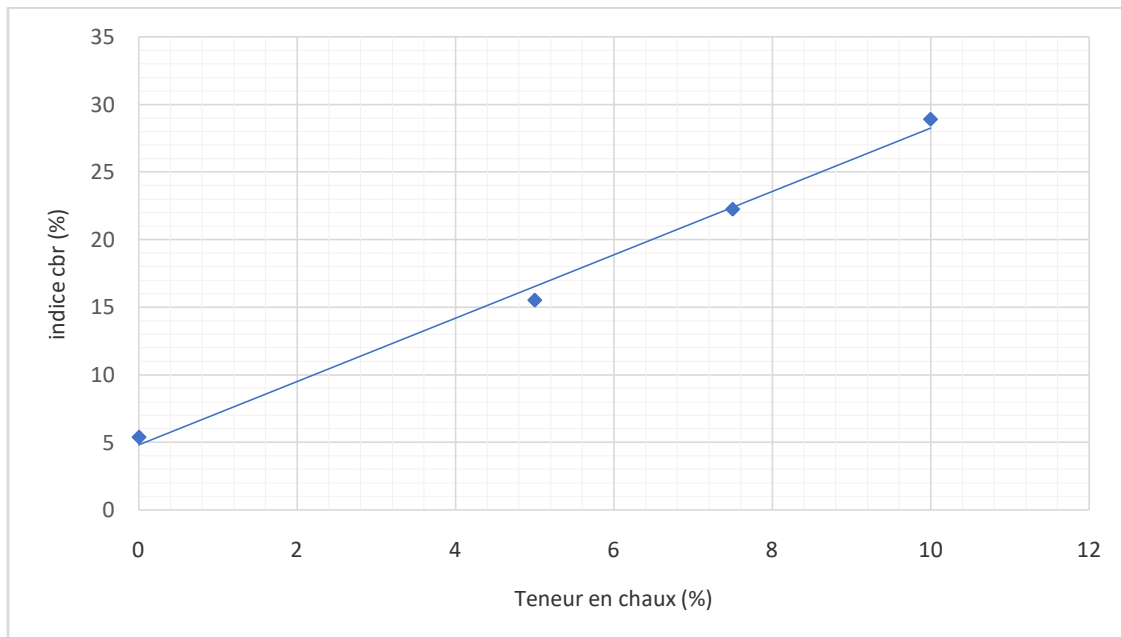
Enfoncement	Effort de pénétration	CBR après immersion
CBR _{2,5}	$\frac{3,04}{13,6} \times 100$	22,35%
CBR ₅	$\frac{5,87}{20,3} \times 100$	28,916%

Le CBR à quatre jours d'immersion est la plus grande valeur de ces deux enfoncements, ce qui correspond à **28,92%**.

L'évolution de l'indice CBR après immersion en fonction du dosage en Ciment est présenté dans le tableau 14 et la figure 17.

Tableau 14:- Variation de l'indice CBR en fonction du % de Ciment.

Teneur en Chaux (%)	0	5	7,5	10
CBR après immersion	5,37	15,52	22,25	28,92

**Figure 17:-** Evolution de l'indice CBR après immersion en fonction du dosage en Chaux.

Le tableau 14 et la figure 17 montrent que l'ajout de la chaux augmente l'indice CBR du sol de BUGANGA.

Etude Comparative Des Caracteristiques

Il s'agira de comparer les différents résultats entre la stabilisation au Ciment et à la Chaux. Ainsi, traçons, pour chaque paramètre testé, les courbes d'évolution en fonction des pourcentages en Ciment et en Chaux.

Les caractéristiques géotechniques et mécaniques du sol naturel et stabilisé sont reprises dans le tableau 15.

Tableau 15:- L'influence du Ciment et de la Chaux sur les paramètres du sol de BUGANGA.

	Sol naturel	Ciment				Chaux		
Dosage (%)	0%	5%	7,5%	10%	5%	7,5%	10%	
Wopm (%)	10,9	11,62	13,2	15,25	13,2	14,97	16,8	
ρ_{dmax} (t/m ³)	2,092	2,057	1,965	1,81	2,059	1,935	1,826	
w_L (%)	39	37,25	35,9	35,3	37,8	36,5	35,8	
w_P (%)	22,223	23,846	25,30	26,37	25,699	26,396	27,026	
I_P (%)	16,77	13,404	10,6	8,93	12,101	10,104	8,774	
Passant 80 μ m (%)	47,25	-	-	-	-	-	-	

Etude comparative des limites de liquidité en fonction de la teneur en Ciment et en Chaux

La figure 18 présente l'influence du Ciment et de la Chaux sur la limite de liquidité du sol de BUGANGA.

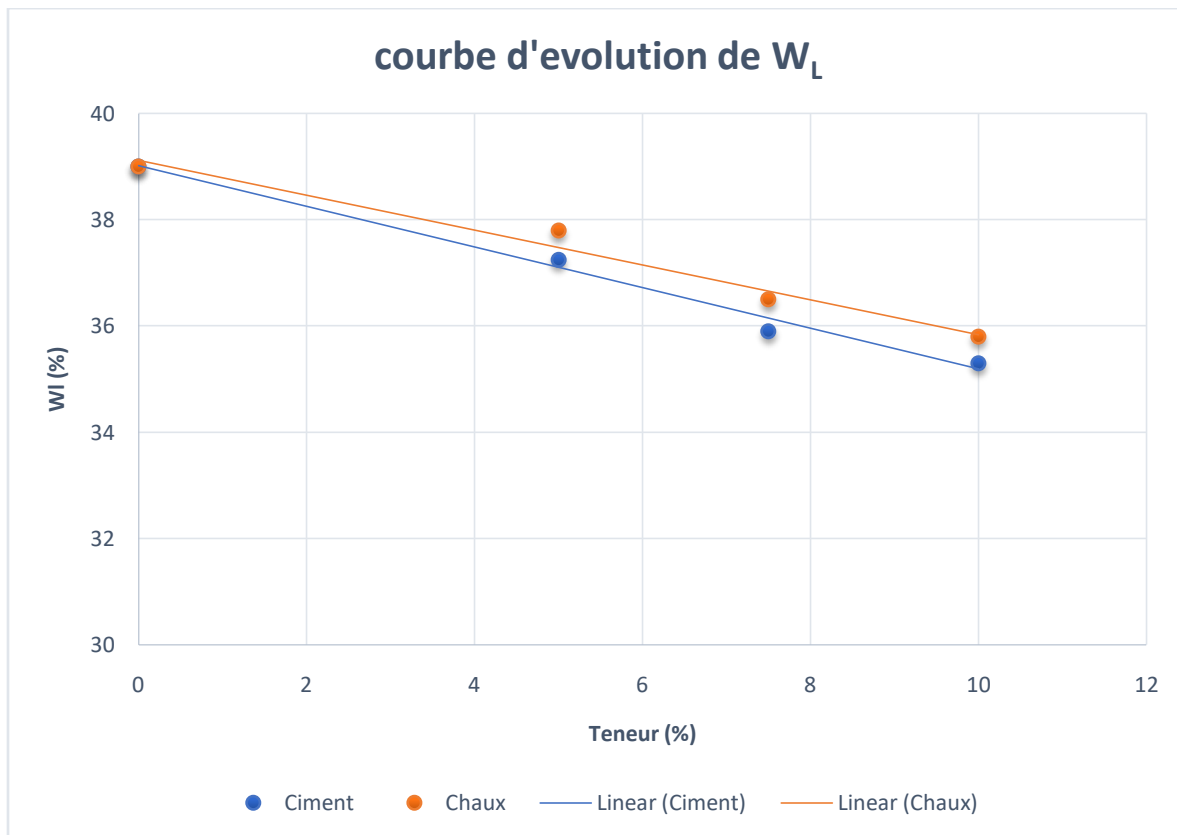


Figure 18:- Courbe d'évolution des limites de liquidité en fonction de la teneur en Ciment et en Chaux.

La courbe d'évolution de la limite de liquidité en fonction de la teneur en ciment et en chaux, montre que l'ajout de ciment diminue plus la limite de liquidité par rapport à l'ajout de la chaux. D'où pour une teneur en chaux de 10%, la limite de liquidité est réduite de **8,2%** et pour la même teneur on, observe une réduction de **9,48%** pour le ciment.

Etude comparative des limites de plasticité en fonction de la teneur en Ciment et en Chaux

La figure 19 présente l'influence du Ciment et de la Chaux sur la limite de plasticité du sol de BUGANGA.

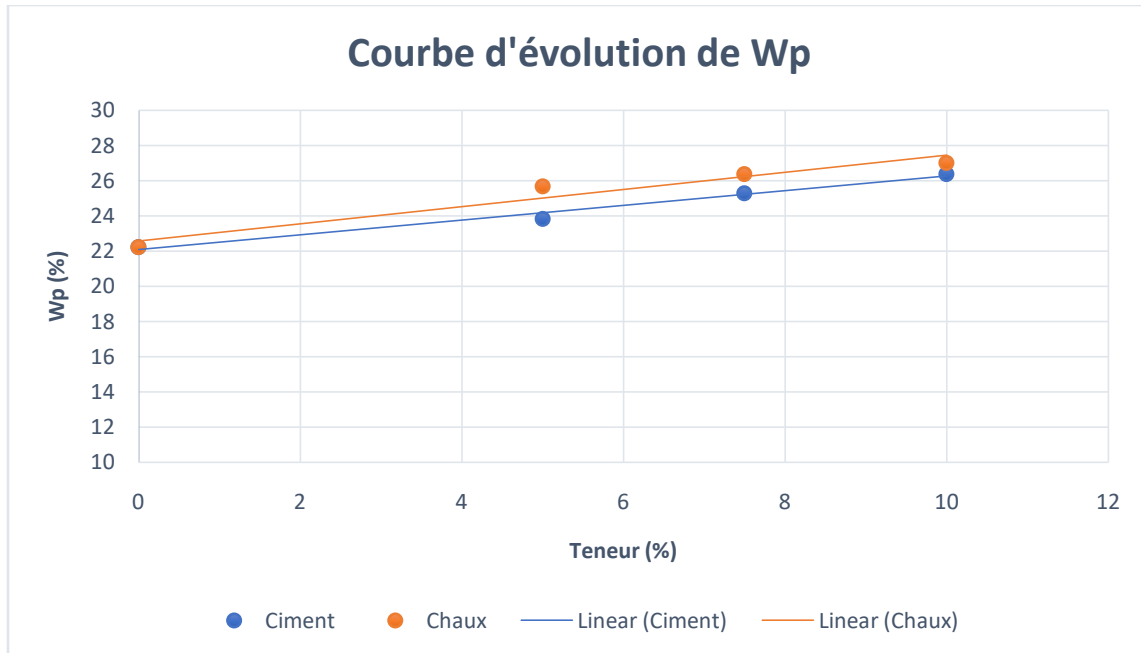


Figure 19:- Courbe d'évolution des limites de plasticité en fonction de la teneur en Ciment et en Chaux.

Au vu de la courbe d'évolution de la limite de plasticité en fonction de la teneur en ciment et en chaux, on remarque que l'ajout de la chaux augmente plus la limite de plasticité par rapport à l'ajout du ciment. D'où pour une teneur en chaux de 10% la limite de plasticité a augmenté de **21,61%** et pour la même teneur, on observe une augmentation de **18,66%** pour le ciment.

Etude comparative de l'indice de plasticité en fonction de la teneur en Ciment et en Chaux
 L'influence du Ciment et de la Chaux sur l'indice de plasticité est représentée sur la figure 3.20.

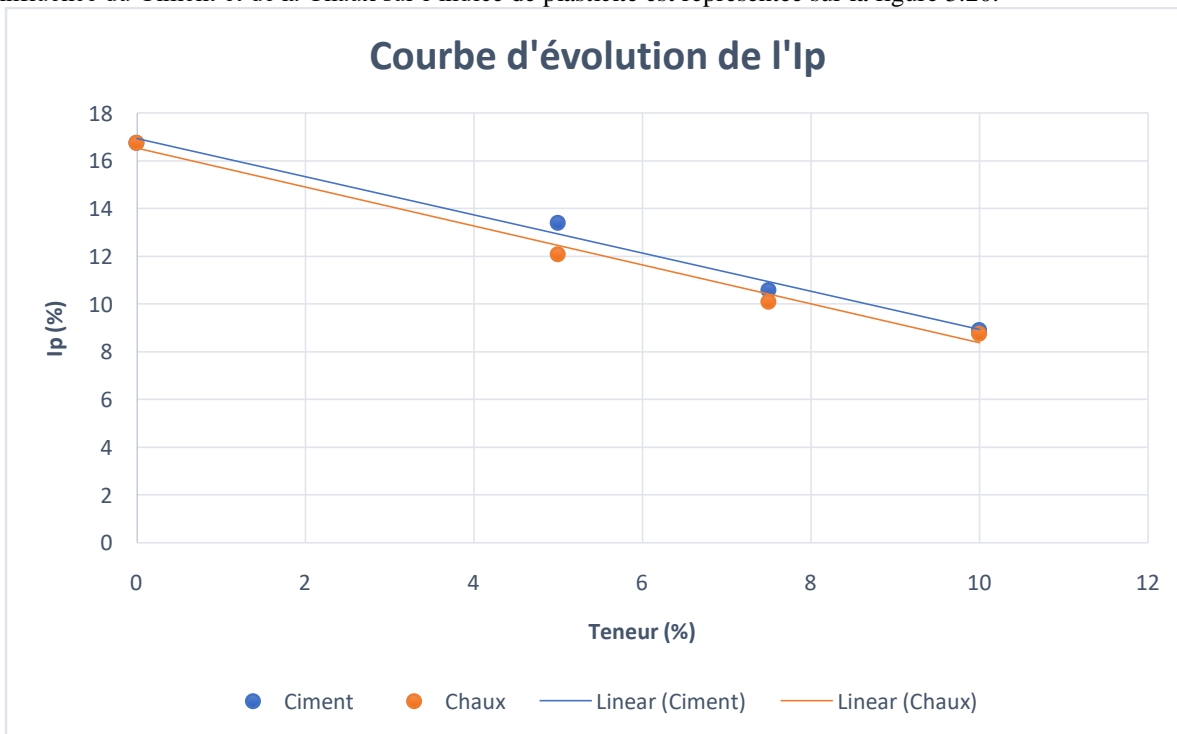


Figure 20:- Courbe d'évolution de l'indice de plasticité en fonction du pourcentage de Ciment et de Chaux.

Au vu de la courbe d'évolution de l'indice de plasticité en fonction du pourcentage de Ciment et de la Chaux nous remarquons que l'indice de plasticité du ciment dépasse celui de la chaux. D'où pour une teneur en ciment de 10%, l'indice de plasticité est réduit de **46,75%** et pour la même teneur on observe une réduction de **47,68%** pour la chaux.

Etude comparative de la densité sèche maximale en fonction de la teneur en Ciment et en Chaux

La figure 21 présente l'influence du Ciment et de la Chaux sur la densité sèche maximale du sol de BUGANGA.

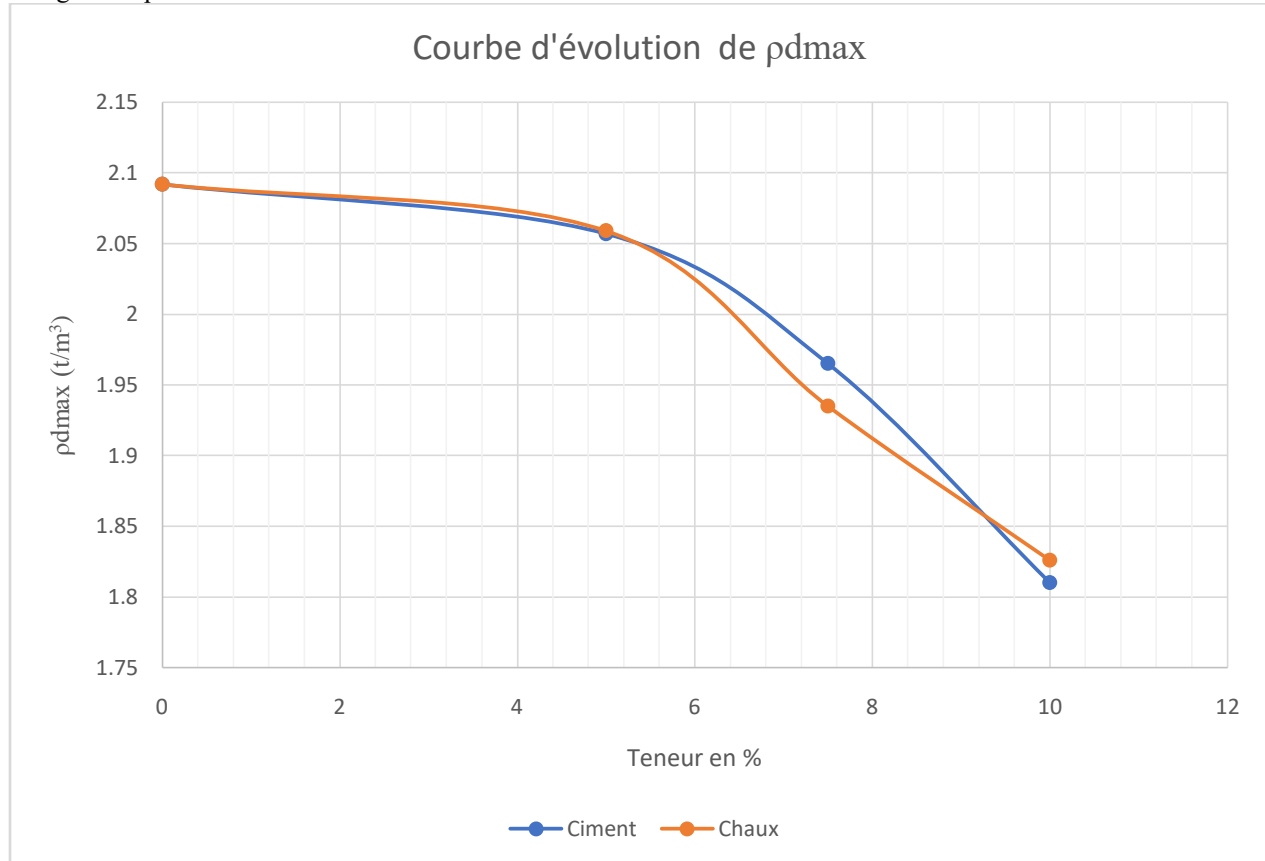


Figure 21:- Courbe d'évolution de la densité sèche maximale en fonction de la teneur en Ciment et en Chaux.

Au vu de la courbe d'évolution de la densité sèche maximale en fonction de la teneur en ciment et en chaux nous constatons un abaissement de la densité sèche maximale et pour le ciment et pour la chaux. D'où la densité sèche maximale est passée de $2,092 \text{ t/m}^3$ à $1,81 \text{ t/m}^3$ pour 10% de teneur en ciment et de $2,092 \text{ t/m}^3$ à $1,826 \text{ t/m}^3$ pour la même teneur en chaux.

Etude comparative de la teneur en eau optimale en fonction de la teneur en Ciment et en Chaux

La figure 22 présente l'influence du Ciment et de la Chaux sur la teneur en eau optimale du sol de BUGANGA.

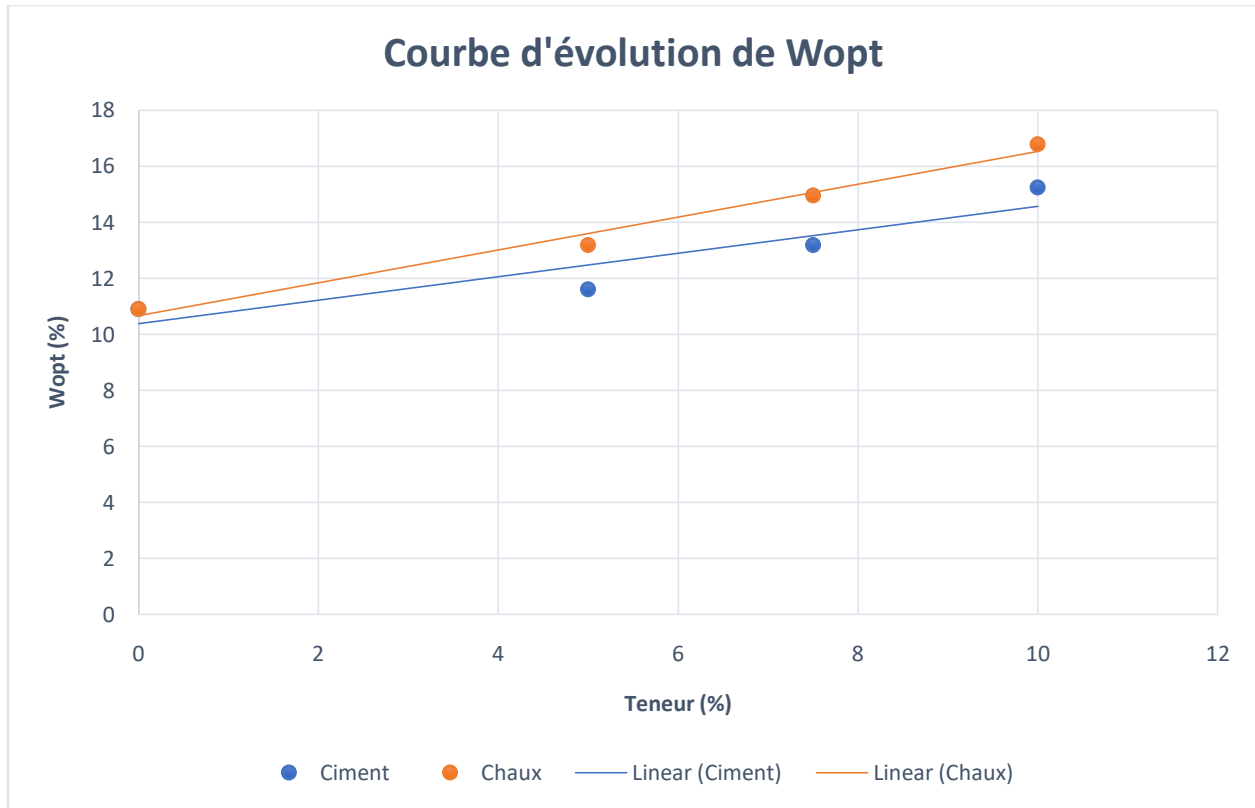


Figure 22:- Courbe d'évolution de la teneur en eau optimale en fonction de la teneur en Ciment et en Chaux.

La courbe d'évolution de la teneur en eau optimale en fonction de la teneur en ciment et en chaux montre une augmentation de cette dernière et pour le ciment et pour la chaux. D'où la teneur en eau optimale est passée de 10,9% à 15,25% pour le ciment ; soit une augmentation de 39,9% et pour la chaux, elle est passée de 10,9% à 16,8% ; soit une augmentation de 54,128%.

Étude comparative de l'indice CBR en fonction de la teneur en Ciment et en Chaux

Le tableau 16 présente les indices CBR après immersion de différents dosages en Ciment et en Chaux.

Tableau 16:- Evolution de l'indice CBR en fonction de la teneur en ciment et en chaux.

Teneur (%)	Indice CBR après immersion	
	Ciment	Chaux
0	5,37	5,37
5	24,29	15,52
7,5	33,11	22,25
10	46,32	28,92

La figure 23 présente l'évolution de l'indice CBR après immersion en fonction de différentes teneurs en Ciment et en Chaux et cela sous forme d'histogramme et de Courbe.

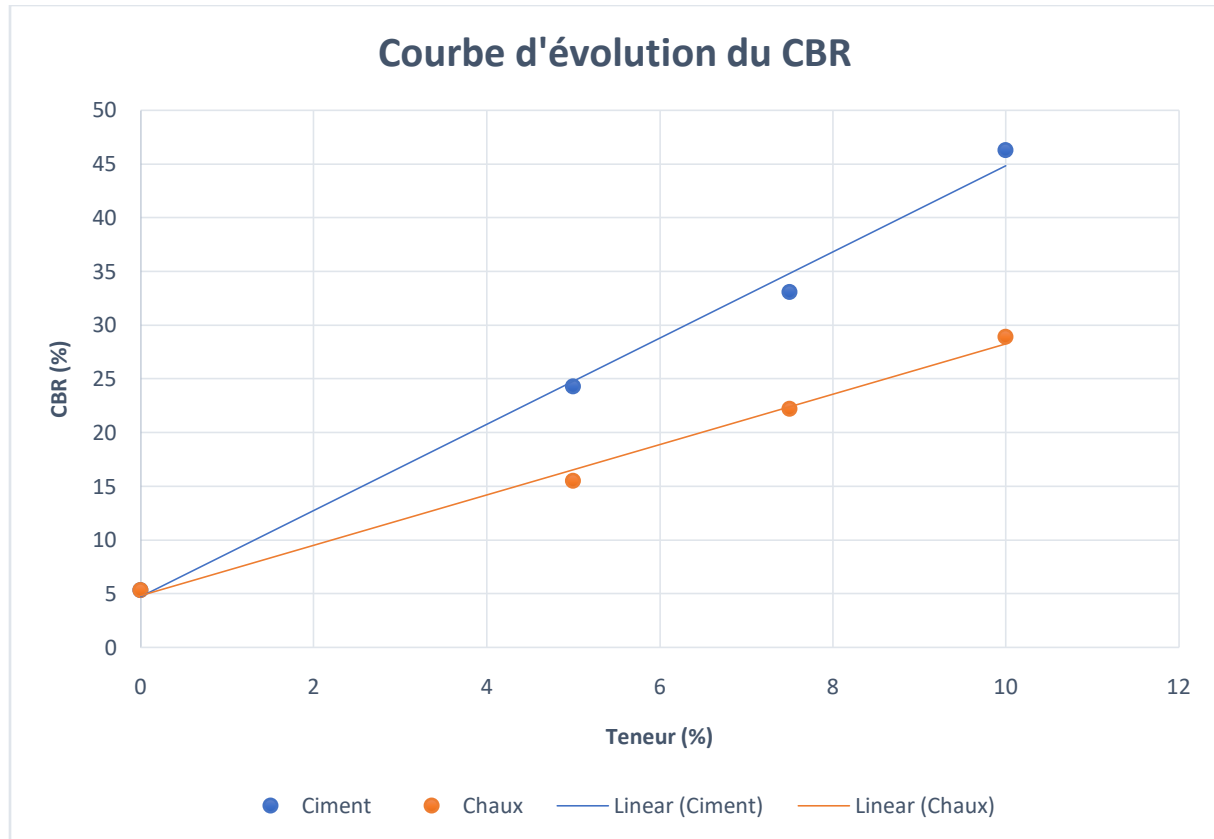


Figure 23:- Courbe d'évolution du CBR après immersion en fonction de la teneur en Ciment et en Chaux.

Au vu de la courbe d'évolution de l'indice CBR après immersion, le sol de BUGANGA a un CBR de 5,37% à l'état naturel et par conséquent il est d'une portance faible (classe S1). Stabilisé à 5% au ciment et à la chaux, il passe de 5,37% à 15,517% et 24,29% respectivement ; il passe alors d'une portance faible à une portance élevée (classe S3). Stabilisé à 7,5% au ciment et à la chaux, la portance du sol de BUGANGA passe de faible à élevée pour la chaux soit 22,2516 et très élevée pour le ciment soit 33,1128. La stabilisation à 10% quant à elle permet de passer d'une portance faible à une portance très élevée ; soit 46,32% pour le ciment et 28,916% pour la chaux.

Resultats Discussion Et Interpretation:-

Nous avons présenté et interpréter les résultats obtenus des différents essais effectués au laboratoire sur le sol de BUGANGA avant sa stabilisation et après sa stabilisation par le ciment et la chaux.

Les résultats obtenus en se basant sur la classification GTR et LCPC nous ont permis de dire que le sol de BUGANGA appartient à la classe des sols fins (% fines $\geq 35\%$: 47,25%). C'est une argile sableuse ($I_p = 16,77\%$) et peu plastique mais aussi ce sol est caractérisé comme étant un sol de faible portance (CBR=5,37%). S'agissant du gonflement, le sol de BUGANGA a un gonflement moyen.

En effet, avec cette portance faible, le sol de BUGANGA a nécessité une stabilisation pour son utilisation dans les constructions routières. Ainsi nous l'avons stabilisé au ciment et à la chaux, d'où l'indice CBR est passé de 5,37% à 24,29% pour une teneur en ciment de 5%, 33,1128 pour une teneur en ciment de 7,5%, 46,32 pour une teneur en ciment de 10%, 15,517% pour une teneur en chaux de 5%, 22,2516% pour une teneur en chaux de 7,5% et 28,916% pour une teneur en chaux de 10%.

D'où la stabilisation du sol au ciment augmente significativement la portance du sol de BUGANGA par rapport à la stabilisation à la chaux. L'écart observé entre les résultats est dû à la prise du ciment, ce qui fait que le mélange sol-ciment soit dur par rapport au mélange sol-chaux.

Conclusion:-

Une étude comparative de la stabilisation du sol de BUGANGA à Minova au ciment et à la chaux en vue de son utilisation dans les constructions routières comme couches d'assise et plateforme support des chaussées est réalisée. Les caractéristiques de compactage (Proctor modifié), de la portance CBR et du gonflement linéaire pour trois énergies de compactage (10, 25 et 55 coups de dame) du sol en le stabilisant avec différents teneurs en ciment et en chaux dont 5%, 7,5% et 10% sont déterminées. Les résultats obtenus ont montré que l'ajout du ciment et de la chaux comme liants stabilisateurs augmentent la portance de ce sol.

De part la faible portance de ce sol à l'état naturel qui est de 5,37%, ce sol a nécessité une stabilisation avant d'être utilisé comme matériau en constructions routières. Ainsi, par ajout de 5% de ciment et de 5% de chaux, les résultats obtenus montrent que le CBR est passé respectivement de 5,37% à 24,29% (passage de la portance faible à la portance élevée) et de 5,37% à 15,52% (passage de la portance faible à la portance élevée) pour la chaux. Pour la deuxième composition, soit 7,5% pour le ciment, le CBR est passé de 5,37% à 33,11% (passage de la portance faible à une portance très élevée) et de 5,37% à 22,25% (passage de la portance faible à la portance élevée) pour la chaux. Quant à la troisième composition, soit 10% pour le ciment le CBR est passé de 5,37% à 46,32% et de 5,37% à 28,92% pour la chaux donc une forte augmentation de la portance pour la deuxième et la troisième formulation.

L'utilisation du ciment et de la chaux comme liants stabilisateurs des sols peu portants dans les travaux publics est satisfaisant.

Cependant, en se basant sur les normes routières congolaises définies par l'Office des Routes qui déterminent et recommandent les conditions d'utilisation des sols en assises de base, de fondation et de plateforme des chaussées revêtues et non revêtues, conditions qui se basent beaucoup plus sur le critère essentiel d'acceptabilité qui est la valeur de l'essai CBR. Les autres recommandations sont données à titre indicatif et ne sont que des critères sélectifs. De ce fait, les normes routières congolaises disent que pour qu'un sol sableux soit utilisé en assise de fondation il faut qu'il ait un $CBR \geq 25\%$; ce qui nous permet de dire que le sol de BUGANGA stabilisé à 7,5% et 10% de ciment peut être utilisé en assise de fondation des chaussées revêtues mais aussi stabilisé à 10% de chaux, il peut aussi être utilisé en assise de fondation des chaussées revêtues car ayant un $CBR \geq 25\%$. Il est à noter aussi que pour qu'un sol soit utilisé comme plateforme des chaussées selon les mêmes normes, il faut que son CBR soit supérieur à 5% ; cela nous permet de dire que le sol de BUGANGA stabilisé à 5%, 7,5% et 10% en ciment et en chaux peut être utilisé comme sol de plateforme des chaussées revêtues.

Enfin, les résultats trouvés après la stabilisation du sol d'étude au ciment et à la chaux nous ont conduits aux conclusions suivantes :

- Une diminution de la limite de liquidité (pour le ciment et la chaux) ;
- Une augmentation de la limite de plasticité (pour le ciment et la chaux) ;
- Une diminution de l'indice de plasticité (pour le ciment et la chaux) ;
- Une diminution de la densité sèche maximale (pour le ciment et la chaux) ;
- Une augmentation de la teneur en eau optimale (pour le ciment et la chaux) ;
- Une augmentation de l'indice CBR après immersion (pour le ciment et la chaux)
- Une diminution du gonflement linéaire (pour le ciment et la chaux).

Nous suggérons aux futurs chercheurs de procéder à la stabilisation du sol à la pouzzolane et effectuer une étude technico-économique sur les différentes procédures de stabilisation pour permettre un choix judicieux.

References:-

1. NGAPGUE François : Mécanique des sols et des roches, Notes de cours inédit, G3 Génie civil, FSTA/ ULPGL-GOMA, 2018.
2. TRAN Van Duy, Etude de l'amélioration des sols par traitement à la chaux, Travail de fin d'étude, université de Liège/2013.
3. Rou, Le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques pour l'exécution des remblais et des couches de forme, l'industrie cimentière française edn, 2004.
4. CISANGANI HABAYUWEYAKE Trésor : Etude géotechnique du sol de la cité de Masisi en vue de son renforcement par le couple chaux-ciment, Mémoire de diplôme d'ingénieur en Génie civil, ULPGL/ GOMA, 2012-2013.

5. AMANI CHIRIMWAMI Didier : Renforcement des propriétés mécaniques des sols de Nyakavogo par la chaux hydraulique : Application sur les couches de base des chaussées routières, Mémoire de diplôme d'ingénieur en Génie civil, ULPGL/ GOMA, 2017-2018.
6. ENCYCLOPEDIE DE L'ENVIRONNEMENT : les renforcements des sols.
7. KASERKA MAKASI Elie : Caractérisation du sol de Rubaya en vue de son utilisation comme matériau étanche : Application aux installations de stockage de déchets (ISD), Travail de Fin de Cycle, ULPGL/ GOMA, 2018-2019.
8. BENAÏSSA Mohamed : Etude expérimentale sur la stabilisation des sols gonflants de la région de Mostaganem et de Relizone, Mémoire d'étude de master à l'université ABDELHAMID DE MOSTAGANEM, 2011.
9. Zeyneb BELABBACI : Stabilisation des sols gonflants, Thèse de doctorat à l'université AboubekrBelkaïd-Tlemun, 2014.
10. Honoré TUYISHIME : Etude comparative des différentes techniques de stabilisation en géotechnique routière, Mémoire de diplôme de Master en génie civil, Institut international d'ingénierie/Ouagadougou, 2015.
11. Etude des sols- Pédologie
- 12 WWW.alloprof.qc.ca
13. Khaled MEFTAH : Cours et exercices de mécanique des sols, 2008.
14. Keepschool.com
15. BELARBI Narimene et NADJI asma : Etude des paramètres influant sur la portance de sol non saturé (Indice CBR), Mémoire de fin d'étude de master à l'Université de Bourmerdes en Algérie, Faculté des sciences de l'ingénieur, 2016-2017.
16. MOKHTARI Mohammed El Amin et HOSNI Mohammed El Amine : Qualité des terrassements dans l'exécution d'un projet routier, Mémoire pour l'obtention du diplôme de MASTER en Génie civil à l'université AboubakarBelkaïd-Tlemcen 2016-2017.
17. KELANEMER ABOUBAKAR et HAMADOU MOURADE : Stabilisation du gonflement à la chaux et au ciment appliquée aux couches de formes des chaussées routières, Mémoire de fin d'études de master à l'université M'Hamed BougaraBoumerdes en Algérie, Faculté des sciences de l'ingénieur, 2015-2016.
18. Eurocodes 7.