



Caractérisation géotechnique du sable argileux traité à la chaux, utilisable en couches de chaussée dans l'extrême Sud-Ouest du Togo

Israël MAMAH¹, Higinio Menendez MILANES², Kaboudja Djagri WADJA³
Komla BOUAMEY⁴

- ¹ Dr. Ing. en Génie des Structures de Bâtiments et d'Ouvrages, Consultant à Tropical Engineering Consult (TrEC), 13 BP 556, Lomé-Togo
² Professeur Titulaire, Bircham International University, Département des Sciences de l'Ingénierie Génie Civil, 2, C.P.28691, Madrid-Espagne
³ Directeur Général de Tropical Engineering Consult (TrEC), Expert Géotechnique auprès des Cours et Tribunaux, 13 BP 556, Lomé-Togo
⁴ Chef du Laboratoire de pointe du Bureau d'études géotechniques Tropical Engineering Consult (TrEC), 13 BP 556, Lomé-Togo

Résumé

Cette étude a pour but l'amélioration des propriétés géotechniques du sable argileux. Ce sable argileux n'étant pas un matériau conventionnel en géotechnique routière en zone tropicale comparativement à la latérite et la grave concassée nécessite une amélioration des performances mécaniques en termes de portance CBR afin d'envisager son utilisation dans les couches d'assise des routes. Pour ce faire, la formulation d'un matériau composite associant le sable argileux à la chaux est développée. Le travail s'est déroulé en trois grandes phases dont la première consistait au prélèvement des échantillons de sol dans le Grand Lomé afin de les soumettre aux essais géotechniques d'identification en laboratoire et à fabriquer des éprouvettes CBR de sable argileux cru. La deuxième phase a visé la fabrication des éprouvettes de sable argileux traitées à la chaux. La troisième phase consistait aux tests de résistance mécanique relatifs à la portance CBR des deux types d'éprouvettes précédemment fabriquées et à l'étude comparative des résultats expérimentaux de ces tests. Il ressort après étude que ce matériau, à l'état naturel et même convenablement compacté, n'est pas utilisable en plate-forme (couche de fondation) car l'indice CBR est faible ($CBR_{95}=20<35$) conformément aux spécifications techniques de l'Association Américaine des Responsables des Autoroutes des Etats et des Transports (AASHTO). Cependant, le sable argileux au taux d'amélioration à la chaux de 2% peut être utilisé en couche de fondation avec une portance ($CBR_{95} = 145 >35$) et utilisable en couche de base ($CBR_{95} = 145 >80$), l'indice de plasticité correct ($I_p=14 < 30$), mais à condition que $\%80\mu$ (38%) soit $< 20\%$ tout en envisageant substituer au moins 19% de farine de ce sable argileux par du sable grossier pour la classe de portance S5 des trafics de classes T_1 , T_2 , T_3 et T_4 tel que $T_1 < 5.10^5$ et $5.10^5 < T_2$ et $T_3 < 4.10^6$) et ($4.10^6 < T_4 < 10^7$).

Mots-clés: sable argileux, amélioration, chaux, indice CBR, couche de fondation, couche de base

Geotechnical characterization of lime-treated clayey sand, usable in road layers in the extreme South-West of Togo

Abstract

This study aims to improve the geotechnical properties of clayey sand. This clayey sand, not being a conventional material in road geotechnics in tropical areas compared to laterite and crushed gravel, requires improvement in mechanical performance in terms of CBR load-bearing capacity in order to consider its use in the sub-base layers of roads. To this end, the formulation of a composite material combining clayey sand with lime is developed. The work was carried out in three main phases, the first of which involved collecting soil samples in Grand Lomé to subject them to laboratory identification geotechnical tests and to produce raw clayey sand CBR specimens. The second phase aimed at producing lime-treated clayey sand specimens. The third phase consisted of mechanical resistance tests related to the CBR bearing capacity of the two types of samples previously manufactured and the comparative study of the experimental results of these tests. It was concluded after study that this material, in its natural state and even when properly compacted, is not usable as a platform (foundation layer) because the CBR index is low ($CBR_{95} = 20 < 35$) in accordance with the technical specifications of the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). However, the clayey sand with a lime improvement rate of 2% can be used as a base layer with a bearing capacity ($CBR_{95} = 145 > 35$) and usable as a sub-base layer ($CBR_{95} = 145 > 80$), the correct plasticity index ($I_p = 14 < 30$), but provided that $\%80\mu$ (38%) is $< 20\%$ while considering substituting at least 19% of this clayey sand with coarse sand for the bearing class S5 of traffic classes T_1, T_2, T_3 and T_4 as such $T_1 < 5.10^5$ and $5.10^5 < T_2$ et $T_3 < 4.10^6$) et ($4.10^6 < T_4 < 10^7$).

Keywords: clayey sand, improvement, lime, CBR index, foundation layer, base layer

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.17114044>

1. Introduction

Les matériaux naturels d'apport souvent extraits et utilisés pour les travaux routiers en zone tropicale comme au Togo sont généralement mis à profit à proximité des sites d'exécution dans l'environnement immédiat du projet. Cependant, leur utilisation à l'état naturel ou amélioré est conditionnée par des performances techniques requises pour une tenue pérenne de l'ouvrage. A cet effet, le sable argileux a fait l'objet de beaucoup de réticence pour sa maîtrise d'œuvre de la part des constructeurs dans le domaine routier, compte tenu de sa faible performance mécanique en termes de portance CBR et de sa faible granulométrie ou de son caractère non grenu. Pour cela, la latérite disponible quasiment en abondance sur l'étendue du territoire togolais a été pendant longtemps utilisée. De nos jours, les emprunts latéritiques de bonne qualité relativement aux exigences techniques s'avèrent presque introuvables à cause de leur rareté dans les régions côtières du Togo. Par ailleurs, il est constaté que l'adaptation des prescriptions techniques (longtemps relatives à la latérite) au sable argileux n'est pas simple du fait de la méconnaissance du comportement de ce matériau à court et à long terme [1]. Par contre, il devient nécessaire d'étudier l'impact de son traitement à la chaux en procédant à une caractérisation physique et mécanique des paramètres géotechniques de ce matériau afin d'apporter notre contribution à la stabilisation du sable argileux relative aux spécifications techniques de l'Association Américaine des Responsables des Autoroutes des Etats et des Transports (AASHTO) [2].

2. Situation géographique de la zone d'étude

Limité au Nord et à l'Est, respectivement par la préfecture de Zio et la préfecture de Vo, au Sud par l'Océan Atlantique et à l'Ouest par la République du Ghana, le District Autonome du Grand Lomé (DAGL) est situé dans l'extrême Sud-Ouest du Togo le long du littoral du golfe de Guinée entre $6^{\circ} 08' 14''$ de latitude Nord et $1^{\circ} 12' 45''$ de longitude Est. Le Grand Lomé comprend la préfecture du Golfe et la préfecture d'Agoè-Nyivé composées respectivement de sept (7) et six (6) communes donc un total de treize (13) communes. Il couvre une superficie de 42500 ha soit 425 km² (**Figure 1**) avec un port en eau profonde. Situé sur la plaine côtière, le Grand Lomé présente un relief principalement plat, avec une altitude moyenne d'environ 10 mètres au-dessus du niveau de la mer. Cette zone se caractérise par une faible altitude et une topographie influencée par sa position le long de la côte. Cette localisation lui confère un climat tropical, marqué par une alternance annuelle entre deux saisons sèches et deux saisons humides, typiques des régions côtières [3].

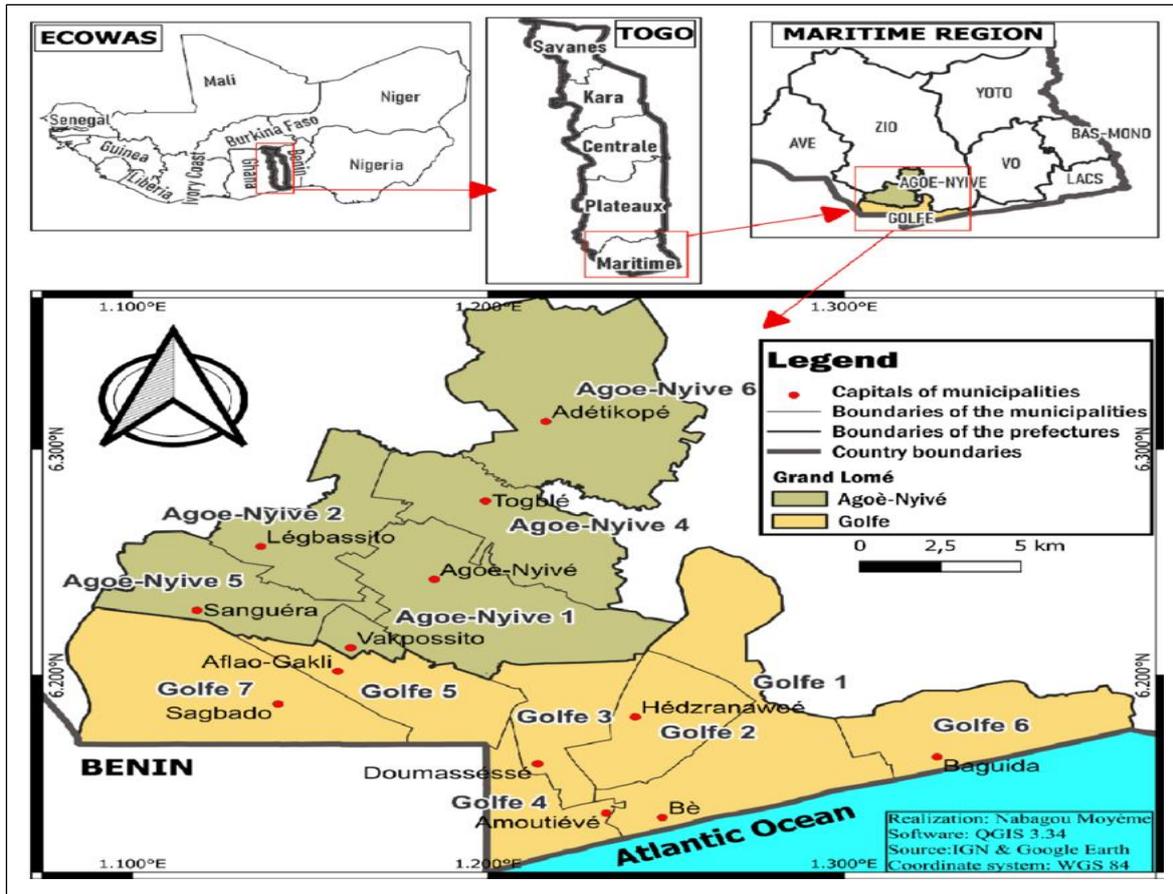


Figure 1: Présentation de la zone d'étude

3. Matériel et méthodes

3-1. Matériel

Le matériel utilisé pour l'identification et les propriétés géotechniques du matériau des six (6) principaux essais réalisés sur chacun des deux (2) matériaux (sable argileux cru et le sable argileux amélioré à la chaux) est composé de :

- Pour l'essai de teneur pondérale en matière organique selon la norme XP P94-047 nous avons disposé d'une balance électronique de précision avec une incertitude de $1/1000^{ème}$, des bacs pour passage des échantillons à l'étuve, des capsules ou creusets avec leur pince de manutention, d'un mortier avec son pilon ou un vibro-broyeur, d'un four à calcination réglable à une température comprise entre $450^{\circ}C$ et $500^{\circ}C$, d'un tamis à ouverture carrée de 2 mm de côté, d'une enceinte avec un dessiccateur, d'une enceinte thermique ou étuve de dessiccation à température réglable à $50^{\circ}C$ de classe d'exactitude C comme défini dans l'annexe A de la norme NF X 15-016 pour ce qui concerne la température uniquement [4].
- Pour l'essai d'analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1 le matériel est composé d'une série de tamis, d'une balance électronique, d'une étuve, un récipient, d'un tournevis, d'une brosse, d'une main écope, d'une balance électronique ayant une précision de 0,1g avec la tare, etc. [5].
- Pour l'essai de limites d'Atterberg selon la norme NF P 94-051, le dispositif est composé de l'appareil de Casagrande avec compte coups, une coupelle lisse et/ou rugueuse avec patte de fixation, l'outil à rainurer, un gabarit de 10 mm d'épaisseur, etc. [6].
- Pour l'essai au bleu de méthylène selon la norme NF P 94-068, le dispositif d'essai est constitué d'un agitateur numérique à ailettes, d'une burette de 50 cm^3 graduée à $0,1\text{ cm}^3$ avec son statif et sa pince support avec noix de serrage, d'une baguette en verre de dimension $\varnothing 8 \times 300\text{ mm}$, d'un bécher gradué en polypropylène de capacité 2000 ml, d'un bécher gradué en polypropylène de capacité 3000 ml, d'un bac

carré plastique 150 × 150 mm, d'un flacon de 100g de bleu de méthylène qualité médicale en poudre, de 3 paquets de 100 filtres de diamètre 90 mm, etc. [7, 8].

- Pour l'essai Proctor modifié selon la norme NF P 94-093 nous avons, une dame Proctor, une règle à raser, un bac d'homogénéisation pour préparation du matériau, un tamis de 5 à 20 mm, etc. [9].
- Pour l'essai de l'indice CBR selon la norme NF P94-078, moule CBR, dame Proctor modifié, disque d'espacement, règle à araser, bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau, tamis 5 et 20 mm (contrôle et écrêtage le cas échéant de l'échantillon), truelle, spatule, pinceau etc. [10].

3.2. Méthodes

La méthode utilisée consiste à échantillonner le sable argileux sur l'une des carrières située à Casablanca (un quartier situé dans la commune du Golfe 5 du Grand Lomé) en forant cinq puits de façon artisanale, suivant une équidistance de 100 m en vue d'obtenir un matériau plus homogène au mélange pour les essais en laboratoire. Ces puits sont disposés en un losange ayant à ses sommets quatre puits et un puits au centre. Ces échantillons de sable argileux sont recueillis dans des sacs puis transportés au laboratoire où toutes les dispositions techniques nécessaires seront prises pour la réalisation des essais. Les essais sont faits selon l'ordre chronologique suivant : l'essai de teneur pondérale en matière organique, l'essai d'analyse granulométrique par tamisage, l'essai de limites d'Atterberg, l'essai au bleu de méthylène, l'essai Proctor modifié et l'essai CBR [11].

3.2.1. Essais d'identification du matériau

3.2.1.1. L'essai de teneur pondérale en matière selon la norme XP P94-047

Le présent essai s'applique à la détermination de la teneur massique en matières organiques de la fraction granulométrique inférieure ou égale à 2 mm d'un échantillon de sable argileux prélevé dans le Grand Lomé. Il est le rapport de la masse de matières organiques contenues dans un échantillon de sable argileux, détruites par calcination, sur la masse sèche des particules solides avant calcination de la fraction du matériau passant au tamis de 2 mm. Cet essai consiste à déterminer la perte de masse d'un échantillon préalablement séché, après calcination dans un four à une température de 450°C. Le **tableau 1** présente la classification des matériaux utilisés pour la construction des remblais et des couches de forme selon la norme XP P94-047 et le Guide des Terrassements Routier (GTR).

Tableau 1: Classification des sols contenant de la matière organique et possibilité de réemploi

| % Matière organiques (selon XP P94-047) | Classification | Sols | Utilisation en ouvrage en terre | Utilisation en couche de forme |
|---|-------------------------------|---|---|---|
| < 2 % | Classification sols ou roches | Non organiques | Oui | Oui |
| de 2 à 6 % | 01 | A faible teneur en matières organiques | Oui (uniquement en remblai courant, moins de 10 m de hauteur) | Oui avec étude particulière à partir de 3 % |
| de 6 à 20 % | 02 | A teneur en matières organiques modérée | A privilégier pour les surfaces à enherber, en merlons paysagers ou phoniques | Non |
| > 20% | 03 | Tourbe | Non | Non |

Après essai, il révèle que la valeur de la teneur pondérale en matière organique du sable argileux de Casablanca dans le Grand-Lomé est de 0,4% et cette valeur étant inférieure à 2% (Moy.= 0,4% < 2% = valeur admissible), qui est la valeur de la teneur en matière organique admissible à ne pas dépasser, ce qui signifie que ce matériau est un sol non organique utilisable en ouvrage en terre ou en couche de forme [4, 12].

3.2.1.2. Essai d'analyse granulométrique par tamisage selon la norme NF EN 933-1

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon du sable argileux de Casablanca selon la norme NF EN 933-1 en utilisant une série de tamis à mailles carrées de dimensions normalisées disposées

verticalement emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes, du haut vers le bas. Le sable argileux est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par secousses de la colonne de tamis. Chaque tamis retient une certaine quantité de grains appelée refus qui sont pesés. Cependant, les grains qui passent à travers les tamis sont appelés tamisât ou passants.

En laboratoire, après le tamisage, nous avons obtenu les refus partiels en gramme. Ces refus partiels nous ont permis de calculer les refus cumulés, les refus cumulés en pourcentage et les passants en pourcentage. Ces données regroupées dans le **tableau 2** nous ont permis de tracer la courbe granulométrique de notre échantillon de sable argileux présenté à la **figure 2**. Cette courbe granulométrique obtenue nous a permis de déterminer la classe granulaire de notre matériau [5, 13].

L'analyse du tableau et de la courbe granulométrique du sable argileux en provenance de Casablanca révèlent que le matériau contient 38% d'éléments très fins caractérisés par la présence des fillers et farines avec $d \leq 0.08\text{mm}$ et 62% d'éléments moyens caractérisés par la présence du sable fin avec $D \leq 1,25\text{ mm}$.

En conclusion, le sable argileux de Casablanca est de la classe granulaire 0/1.25 donc c'est un sable argileux fin à 38% d'éléments fin ($\%80\mu = 38\% > 20\%$) => Non, donc devrait être traité avec probablement ajout d'éléments grossiers pour qu'on l'utilise en couche de fondation à condition que les caractéristiques géotechniques à savoir l'indice de plasticité I_p et la portance CBR soient répondent aux aptitudes géotechniques routières [11].

Tableau 2 : *Tableau d'analyse granulométrique par tamisage*

| Granulométrie | | | |
|------------------|--------------|----------|-------------|
| Masse sèche (g): | | 2939 | |
| Tamis | Refus cumulé | %ref cum | Pssants (%) |
| 0,08 | 1816 | 62 | 38 |
| 0,16 | 1322 | 45 | 55 |
| 0,2 | 1058 | 36 | 64 |
| 0,315 | 822 | 28 | 72 |
| 0,5 | 410 | 14 | 86 |
| 0,8 | 191 | 6 | 94 |
| 1 | 88 | 3 | 97 |
| 1,25 | 28 | 1 | 99 |
| 1,6 | 0 | 0 | 100 |
| 2 | 0 | 0 | 100 |
| 2,5 | 0 | 0 | 100 |
| 3,15 | 0 | 0 | 100 |
| 4 | 0 | 0 | 100 |
| 5 | 0 | 0 | 100 |
| 6,3 | 0 | 0 | 100 |
| 8 | 0 | 0 | 100 |
| 10 | 0 | 0 | 100 |
| 12,5 | 0 | 0 | 100 |
| 14 | 0 | 0 | 100 |
| 16 | 0 | 0 | 100 |
| 20 | 0 | 0 | 100 |
| 25 | 0 | 0 | 100 |
| 31,5 | 0 | 0 | 100 |

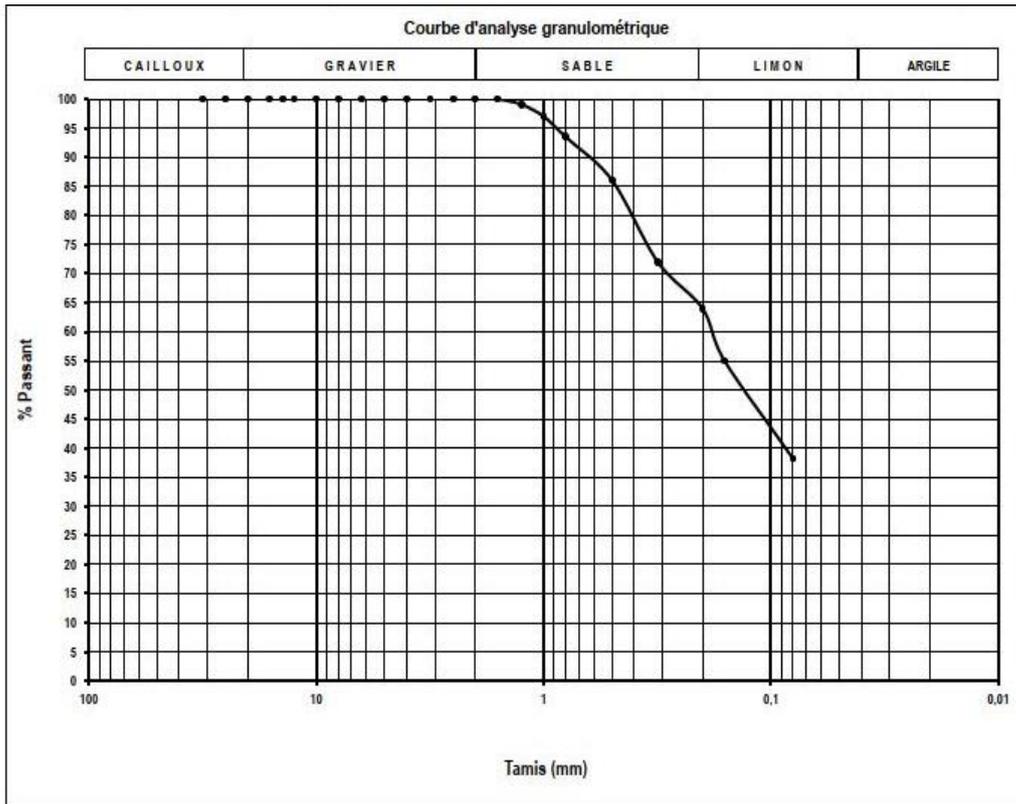


Figure 2 : Courbe d'analyse granulométrique du sable argileux de Casablanca

3.2.1.3. Essais de limites d'Atterberg selon la norme NF P 94-051 et classification du sable argileux

3.2.1.3.1. Essai de limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg dans le cadre de notre étude sont des paramètres géotechniques essentiels qui définissent les états de consistance d'un sol fin (sable argileux qui fait l'objet de notre étude) en fonction de sa teneur en eau. A cet effet, les différentes limites d'Atterberg de ce matériau sont définies de telle sorte que la limite de liquidité (LL) est la teneur en eau à laquelle le sol passe de l'état plastique à l'état liquide tandis que la limite de plasticité (LP) est la teneur en eau à laquelle le sol passe de l'état semi-solide à l'état plastique.

L'indice de plasticité $I_p = LL - LP$ (tableau 3) [9].

- Pour le sable argileux naturel

$$I_p = 48\% - 28\%$$

$$I_p = 20\%$$

- Pour le sable argileux traité à 2% de chaux

$$I_p = 38\% - 24\%$$

$$I_p = 14\%$$

Tableau 3 : classification des sols suivant leur indice de plasticité

| Indice de plasticité | Degré de plasticité |
|----------------------|--|
| $0 < I_p < 5$ | Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs) |
| $5 < I_p < 15$ | Moyennement plastique |
| $15 < I_p < 40$ | Plastique |
| $I_p > 40$ | Très plastique |

Au vu des résultats des essais, il ressort que $15 < I_p = 20 < 40 \Rightarrow$ le sable argileux naturel est un sol plastique et l'indice de plasticité $I_p = 20 < 30 \Rightarrow$ le matériau d'apport est bon.
 Il ressort que $5 < I_p = 14 < 15 \Rightarrow$ le sable argileux traité à 2% de chaux est un sol moyennement plastique et l'indice de plasticité $I_p = 14 < 30 \Rightarrow$ le matériau d'apport traité à la chaux est bon.
 En conclusion, dans un premier temps, le sable argileux de Casablanca est bon pour exécution en couche de fondation et en couche de base sous réserve que la classe de portance CBR soit respectivement : $CBR > 35$ et $CBR > 80$; dans un second temps, sous réserve que le $\%80\mu$ (38%) soit $< 20\%$ [11, 14].

3.2.1.3.2. Classification du sable argileux de Casablanca selon « Highway Research Board »

Cette méthode purement empirique a été mise au point par le « Highway Research Board » aux USA et se propose de définir la portance d'un sol en partant des essais d'identification de celui-ci. A cet effet, on calcule l'indice de groupe I_g du sable argileux à partir des essais d'analyse granulométrique, de limite de liquidité W_L et de l'indice de plasticité I_p . Les spécifications géotechniques de classification des sols sont consignées dans le **tableau 4** [11, 14].

Tableau 4 : Classification des sols « Highway Research Board »

| Classification des sols « Highway Research Board » | | | | | | | | | | | | |
|---|---|-----------|--|----------|----------|----------|--|-----------|-----|---------------|------------------|------------------|
| Classification générale | Au plus 35 % de grains plus petits que 80 μ | | | | | | Plus 35 % de grains plus petits que 80 μ | | | | | |
| | A1 | | A3 | A2 | | | | A4 | A5 | A6 | A7 | |
| Classification par groupe | A1a | A1b | | A2-4 | A2-5 | A2-6 | A2-7 | | | | A7-5 | A7-6 |
| % passant: au tamis de 2mm | <50 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| au tamis de 0,4mm | ≤ 30 | <50 | >51 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| au tamis de 80 μ | <15 | <25 | <10 | <35 | <35 | <35 | <35 | >36 | >36 | >36 | >36 | >36 |
| Caractéristiques de la fraction passant au tamis de 2mm | | | | | | | | | | | | |
| W_L | - | - | <40 | >41 | <40 | >41 | <40 | >41 | <40 | >41 | >41 | >41 |
| I_p | <6 | 0 | <10 | <10 | >11 | >11 | <10 | <10 | >11 | >11 | $I_p < W_L - 30$ | $I_p > W_L - 30$ |
| Indice grpe I_g | 0 | 0 | 0 | ≤ 4 | ≤ 8 | ≤ 1 | ≤ 16 | ≤ 20 | | | | |
| Appellation générale | Cailloux Graviers Sables | Sable fin | Mélange de graviers Limoneux ou argileux avec des sables limoneux ou argileux | | | | Sols limoneux | | | Sols argileux | | |
| comportement général | Excellent à bon | | | | | | moyen à faible | | | | | |

Où a, b, c et d ont les définitions suivantes :

1) Soit x le pourcentage du sol passant au tamis de 80 μ (74 μ) :

$$\begin{aligned} \text{Si } x < 35 & \quad a=0 \\ \text{Si } 35 < x < 75 & \quad a = x-35 \\ \text{Si } x > 75 & \quad a = 40 \end{aligned}$$

2) x ayant la même définition que ci-dessus :

$$\begin{aligned} \text{Si } x < 15 & \quad b=0 \\ \text{Si } 15 < x < 55 & \quad b = x-15 \\ \text{Si } x > 55 & \quad b = 40 \end{aligned}$$

3)

$$\begin{aligned} \text{Si } W_L < 40 & \quad c=0 \\ \text{Si } 40 < W_L < 60 & \quad c = W_L - 40 \\ \text{Si } W_L > 60 & \quad c = 20 \end{aligned}$$

- 4) Si $I_p < 10$ $d=0$
 Si $10 < I_p < 30$ $d = I_p - 10$
 Si $I_p > 30$ $d = 20$

$$I_g = 0.2 \times a + 0.005 \times a \times c + 0.01 \times b \times d$$

$$= (0.2 \times 3) + (0.005 \times 3 \times 8) + (0.01 \times 23 \times 10)$$

$$I_g = 3.02 \approx 3 \Rightarrow \text{le sable argileux est du groupe } A_{7-6}(3) :$$

Sol argileux au comportement moyen à faible d'où la nécessité d'être traité afin de l'améliorer.

3.2.1.4. l'essai au bleu de méthylène selon la norme NF P 94-068

L'essai au bleu de méthylène, également appelé «essai au bleu», est un essai utilisé en géotechnique pour déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient. Le bleu de méthylène est en effet adsorbé préférentiellement par les argiles du type montmorillonites (argiles gonflantes) et les matières organiques tandis que les autres argiles (illites et kaolinites) sont peu sensibles au bleu. L'essai consiste à mesurer la quantité de colorant (bleu de méthylène) fixée par 100g de la fraction granulaire du sable argileux analysée ainsi que du sable argileux traité à la chaux et déduire en fonction de la valeur V_{BS} de bleu de méthylène obtenue la catégorie de chaque sol (voir tableau 5) [13].

Tableau 5 : Classification des catégories de sol en fonction de la valeur V_{BS}

| Valeur de bleu de méthylène (V_{BS}) | Catégorie de sol |
|--|--------------------------------------|
| $V_{BS} < 0,1$ | Sol insensible à l'eau |
| $0,2 \leq V_{BS} < 1,5$ | Sol sablo limoneux, sensible à l'eau |
| $1,5 \leq V_{BS} < 2,5$ | Sol sablo argileux, peu plastique |
| $2,5 \leq V_{BS} < 6$ | Sol limoneux de plasticité moyenne |
| $6 \leq V_{BS} < 8$ | Sol argileux |
| $V_{BS} > 8$ | Sol très argileux |

Au vu des résultats des tests au bleu de méthylène, il ressort que le *sable argileux cru* de Casablanca est sensible au bleu de méthylène et la valeur $V_{BS} = 7,8$ révèle que ce matériau est un sol argileux car $6 \leq V_{BS} = 7,8 < 8$. En conclusion, le sable argileux de Casablanca étant sensible au bleu de méthylène, est une argile gonflante de type montmorillonite.

Cependant, les résultats des tests au bleu de méthylène sur le *sable argileux amélioré à la chaux* est moins sensible au bleu et la valeur $V_{BS} = 4,8$ révèle que ce matériau est un sol limoneux de plasticité moyenne car $2,5 \leq V_{BS} = 4,8 < 6$. En conclusion, le sable argileux traité à la chaux étant sensible au bleu de méthylène, est une argile gonflante de type montmorillonite [11].

3.2.2. Caractérisation géotechnique : Essais de portance

Selon le guide pratique de dimensionnement des chaussées de l'Association Américaine des Responsables des Autoroutes des Etats et des Transports (AASHTO), hormis les principales caractéristiques géotechniques d'identification des matériaux d'emprunts notamment l'indice de plasticité I_p et le pourcentage de grains passant au tamis de 80μ , deux principales exigences spécifiques techniques conditionnent les aptitudes géotechniques de portance des matériaux d'emprunts utilisables en couches de chaussées et plus précisément en couche de fondation et en couches de base. Ces spécifications techniques sont l'essai Proctor modifié et l'indice de portance CBR.

3.2.2.1. L'essai Proctor modifié

Pour la mesure en laboratoire, l'essai Proctor Modifié a consisté à damer un échantillon de sable argileux par couche mince en déployant une énergie supplémentaire de manière définie et répétitive en raison de 56 coups par couche pour un total de 5 couches par échantillon de sol prélevé en faisant varier sa teneur en eau. La mesure régulière de la teneur en eau et de la masse volumique sèche du matériau, une fois reportée sur un graphique, permet d'obtenir une courbe en cloche. L'optimum est alors déterminé par le point maximal de la courbe qui donne la teneur en eau optimale pour une masse volumique maximum.

Les caractéristiques du creuset et de la dame utilisée pour l'essai sont explicitement définies par la norme NF P 94-093. L'essai permet alors de mesurer l'optimum Proctor modifié (W_{OPM} et γ_{OPM}). En effet, l'énergie déployée lors de l'essai Proctor modifié est équivalente à l'énergie déployée par les compacteurs sur les couches de chaussées des chantiers routiers [9].

- **Essai Proctor du sable argileux cru**

Au vu des résultats de l'essai Proctor modifié sur le sable argileux, il ressort d'après la courbe Proctor qu'à l'optimum, la teneur en eau optimale $\omega_{opm} = 11,2\%$ équivaut à une densité sèche maximum $\gamma_d \max = 1,93$ et compacté à 95%.

Le **tableau 6** et la **figure 3** présentent les valeurs des résultats de l'essai Proctor modifié.

Tableau 6 : Valeurs de l'essai Proctor à l'optimum du sable argileux cru

| O.P.M | | N |
|-------------------|------------------------|------------|
| $\gamma_d \max =$ | 2,000 t/m ³ | 55 coups |
| $W_{opm} =$ | 11,2 % | 25 coups |
| | | 12 coups |
| DATE DE L'ESSAI : | | 09/11/2024 |

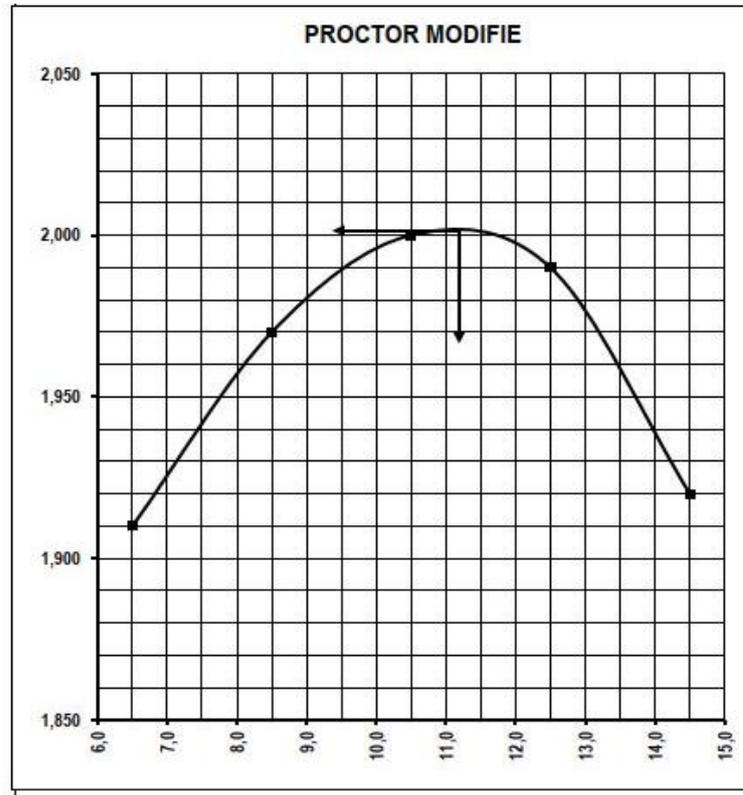


Figure 3 : Courbe Proctor Modifié du sable argileux cru

- **Essai Proctor du sable argileux traité à la chaux**

Au vu des résultats de l'essai Proctor modifié sur le sable argileux traité à la chaux, il ressort d'après la courbe Proctor qu'à l'optimum, la teneur en eau optimale $\omega_{opm} = 11,5\%$ équivaut à une densité sèche maximum $\gamma_d \max = 1,98$ et compacté à 95% \Rightarrow le sable argileux traité à la chaux a les aptitudes des exigences géotechniques de l'essai Proctor à être utilisé en couches de chaussée.

Par ailleurs, comparativement au sable argileux cru, le sable argileux traité à la chaux absorbe un peu plus d'eau ($\omega_{opm} = 11,5\% > \omega_{opm} = 11,2\%$) avec augmentation de sa masse volumique ($\gamma_d \max = 1,98 > \gamma_d \max = 1,93$).

soit une augmentation de 2,6 % équivalents à 0,05. Ces valeurs évolutives confirmer qu'après traitement à la chaux, le sable argileux a connu une amélioration significative. Le *tableau 7* et la *figure 4* présentent les valeurs des résultats de l'essai Proctor modifié.

Tableau 7 : Valeurs de l'essai Proctor à l'optimum du sable argileux traité à la chaux

| O.P.M | | N |
|--------------------------|------------------------|------------|
| $\gamma_d \text{ max} =$ | 1,980 t/m ³ | 55 coups |
| $W_{\text{optm}} =$ | 11,5 % | 25 coups |
| | | 12 coups |
| DATE DE L'ESSAI : | | 03/12/2024 |

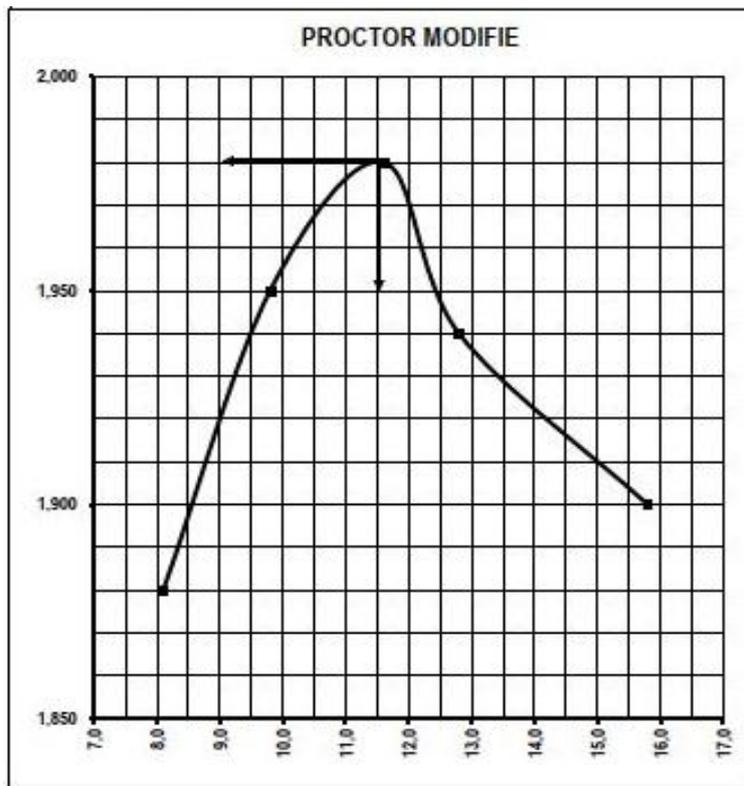


Figure 4 : Courbe Proctor Modifiée du sable argileux traité à la chaux

3.2.2.2. Essai Californian Bearing Ratio (CBR)

L'essai CBR étant une technique fondamentale dans le domaine de la géotechnique routière, nous permet dans le cadre de notre étude, d'évaluer la résistance mécanique du sable argileux et du sable argileux traité à la chaux. Cet essai CBR a pour principe de base l'enfoncement d'un piston standardisé dans un échantillon de sol à une vitesse constante. Pour la recherche des résistances mécaniques que peut offrir les matériaux, des essais sont effectués avec des stabilisations à la chaux, l'essai CBR (Californian Bearing Ratio) après immersion a été réalisé sur les matériaux naturels (sable argileux) et améliorés à la chaux. Les éprouvettes testées sont fabriquées dans des moules de diamètre 15,2 cm et de hauteur 15,2 cm. Après les 04 jours d'imbibition elles sont poinçonnées à l'aide d'une presse à anneau dynamométrique (*figure 5*) de 50 ou 100 kN selon le niveau de résistance du matériau muni d'un piston cylindrique de diamètre $49,6 \pm 0,1$ mm à une vitesse d'enfoncement de 1,27 mm/mn. Il est noté deux forces $F_{2,5}$ et F_5 (kN) correspondant aux enfoncements conventionnels respectifs de 2,5 mm et 5mm. L'indice CBR ou le CBR est égal à la valeur maximale en pourcentage de $(F_{2,5}/13,35$ et

$F_5/19,93$) déterminée pour une densité d'éprouvette de l'ordre de 95% de celle de l'optimum Proctor d'où la notation CBR_{95} [10].



Figure 5 : Dispositif expérimental de préparation et de détermination des propriétés mécaniques

La force nécessaire pour atteindre différentes profondeurs de pénétration est enregistrée et comparée à des valeurs de référence dont les significations sont fournies ci-dessous et les valeurs de chaque classe de portance sont données dans le **tableau 8**.

- $CBR < 3$: Sol très faible, inadapté pour les fondations.
- $3 < CBR < 7$: Sol faible, nécessitant une amélioration.
- $7 < CBR < 20$: Sol moyen acceptable pour certaines applications.
- $20 < CBR < 50$: Bon, adapté à la plupart des applications.
- $CBR > 50$: Excellent sol, idéal pour les fondations. [15]

Tableau 8: Classe de portance CBR

| CLASSES | VALEUR CBR |
|---------|-----------------|
| S1 | $CBR < 5$ |
| S2 | $5 < CBR < 10$ |
| S3 | $10 < CBR < 15$ |
| S4 | $15 < CBR < 30$ |
| S5 | $CBR > 30$ |

3.2.2.2.1. Valeurs obtenues de l'essai CBR du sable argileux cru : échantillon 1

Au vu des résultats de l'essai CBR à 95% de la compacité avec une densité sèche $\gamma_d = 1,90$ sur le sable argileux cru, il ressort que ce matériau est de la classe de portance S4 car $15 < CBR = 20 < 30$, un $CBR = 20 \Rightarrow$ Bon sol, adapté à la plupart des applications car $20 < CBR = 20 < 50$ mais pas excellent ou idéal pour les fondations des routes d'où la nécessité de le traiter à 2%, 3,5% et 4% de chaux pour l'améliorer.

Les valeurs obtenues de l'essai CBR du sable argileux cru sont présentées à travers le **tableau 9** et la **figure 6**.

Tableau 9 : valeurs CBR du sable argileux cru

| Compacité | γ_d t/m ³ | CBR | W imb. | Gonfl. |
|------------------|-----------------------------|------------|--------|--------|
| 100,0% | 2,000 | 28 | 12,3% | |
| 95,0% | 1,900 | 20 | 13,4% | 0,10% |
| 90,0% | 1,800 | 13 | 14,2% | |
| DATE DE L'ESSAI: | | 13/11/2024 | | |

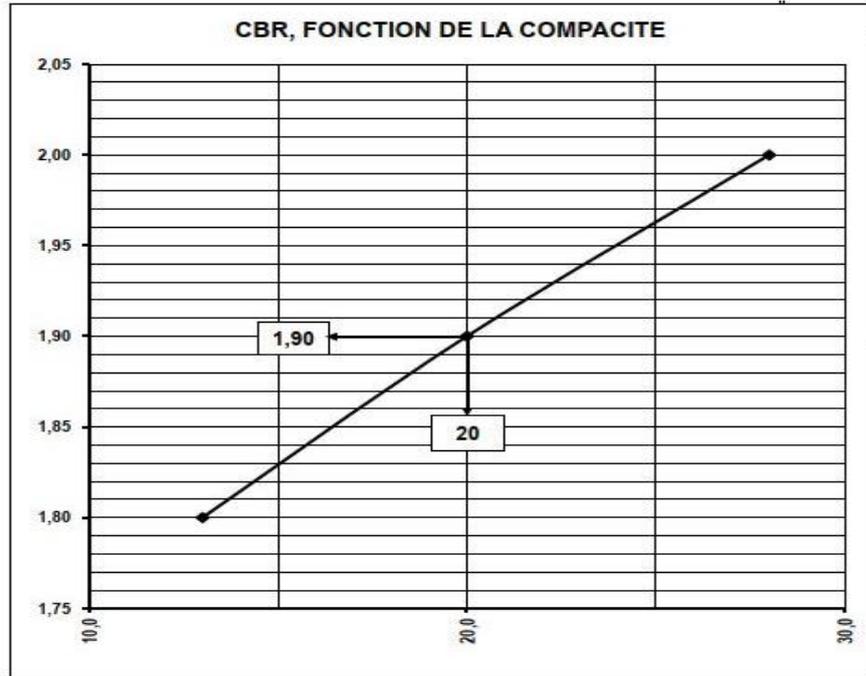


Figure 6 : Courbe CBR du sable argileux cru

3.2.2.2. Valeurs obtenues de l'essai CBR du sable argileux traité à la chaux : échantillon 2

Au vu des résultats de l'essai CBR à 95 % de la compacité avec une densité sèche $\gamma_d = 1,88$ sur le sable argileux traité à 2% de chaux, il ressort que ce sol traité a un CBR = 145 > 50 => Excellent sol, de classe S5 car son indice porteur CBR = 145 > 35 donc idéal pour les fondations des routes. Ce sol peut être également utilisé comme couche de base car CBR = 145 > 80 .On peut de ce fait conclure que le traitement du sable argileux à la chaux a amélioré de façon spectaculaire le CBR avec une croissance exponentielle passant de 20 à 145, soit une augmentation de 625%.

Les résultats obtenus de l'essai CBR du sable argileux traité sont présentés au **tableau 10** et la **figure 7**.

Tableau 10 : valeurs CBR du sable argileux traité à 2% de chaux

| Compacité | γ_d t/m ³ | CBR | W imb. | Gonfl. |
|------------------|-----------------------------|------------|--------|--------|
| 100,0% | 1,980 | 160 | 12,3% | |
| 94,9% | 1,880 | 145 | 13,0% | 0,00% |
| 89,9% | 1,780 | 100 | 13,7% | |
| DATE DE L'ESSAI: | | 07/12/2024 | | |

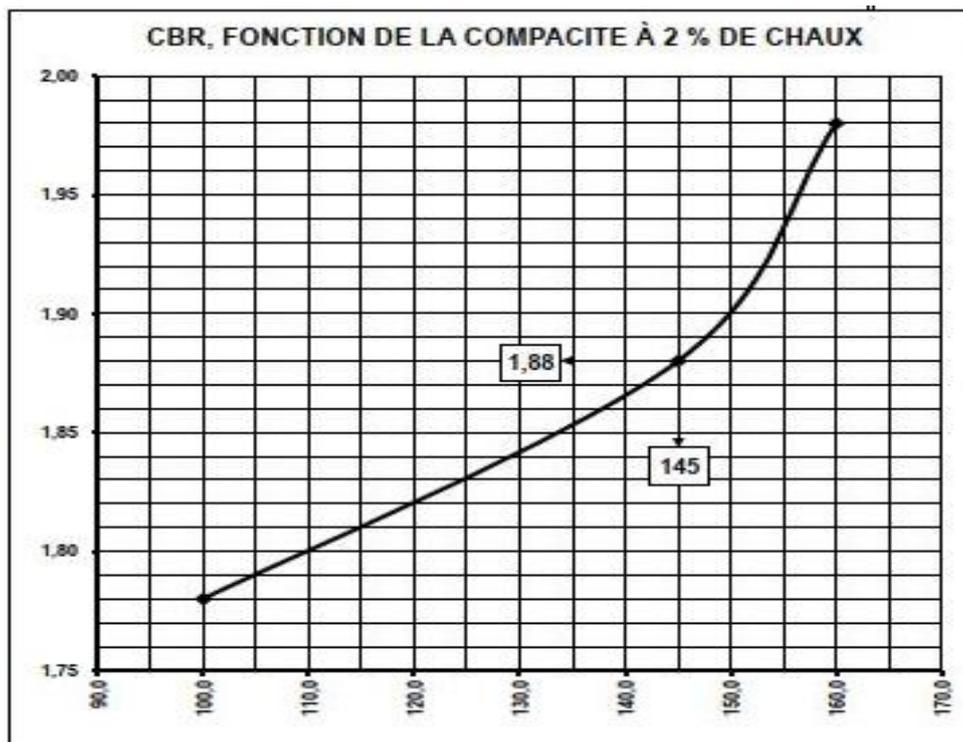


Figure 7 : Courbe de l'évolution du CBR avec le dosage à la chaux

4. Résultats

Conformément aux exigences spécifiques de l'Association Américaine des Responsables des Autoroutes des Etats et des Transports (AASHTO), la validation des matériaux d'emprunts utilisables en couche de plate-forme est essentiellement basée sur trois spécifications géotechniques à savoir : les limites d'Atterberg et plus précisément sur l'indice de plasticité I_p , l'analyse granulométrique et plus précisément sur un pourcentage limité de fines et sur l'indice CBR. A cet effet, dans le cadre de notre étude les essais d'identification et tests de capacité de l'échantillon traité à la chaux à supporter les charges routières révèlent d'excellents résultats dans l'ensemble, cependant, en vue de parfaire cette étude, cela nécessite des prises de décisions techniques suivantes :

- L'échantillon 1 aura les aptitudes à être utilisé en couche de fondation à condition qu'il soit amélioré parce que :
 - $I_p = 20 < 30 \Rightarrow$ Bon
 - $\% 80\mu = 38 \% > 20 \% \Rightarrow$ Non
 - $CBR = 20 < 35 \Rightarrow$ Non

Ce traitement fut fait précédemment dans le cadre de notre étude à travers le traitement du sable argileux à la chaux.

- L'échantillon 2 aura les aptitudes à être utilisé en couche de fondation et en couche de base à condition qu'il subisse une correction de sa granulométrie avec ajout de fractions granulaires de sable supérieures aux fines des passants de 80μ dans le matériau parce que :

1^{er} Cas : ***pour la couche de fondation***

- $I_p = 14 < 30 \Rightarrow$ Bon
- $\%80\mu = 38 \% > 20 \% \Rightarrow$ Non
- $CBR = 145 > 35 \Rightarrow$ Bon

2^{ème} Cas : ***pour la couche de base***

- $I_p = 14 < 30 \Rightarrow$ Bon
- $\%80\mu = 38 \% > 20 \% \Rightarrow$ Non
- $CBR = 145 > 80 \Rightarrow$ Bon

Cette correction de la granulométrie va consister précisément à substituer au moins 19% de farine de ce sable argileux via l'apport d'un sable grossier pour un CBR de la classe de portance S5 des trafics de classe T_1, T_2, T_3 et T_4 tel que $T_1 < 5.10^5$ et $5.10^5 < T_2$ et $T_3 < 4.10^6$) et $(4.10^6 < T_4 < 10^7)$ [11].

Par ailleurs, hormis le traitement à 2% de chaux, il faut rappeler que le traitement du sable argileux a été fait avec deux dosages supplémentaires servant de vérification à savoir :

- Le traitement à 3,5% de chaux dont les résultats indiquent un indice IP = 10, $V_{BS} = 2,5$ et $CBR_{95} = 148$
- Le traitement à 4% de chaux dont les résultats indiquent un indice IP = 8, $V_{BS} = 1,6$ et $CBR_{95} = 121$

Le traitement à 3,5 % de chaux améliore un CBR = 148 sauf que les propriétés géotechniques telles que l'indice de plasticité devient faible IP = 10 et la valeur de bleu de méthylène chute avec $V_{BS} = 2,5$, ceci implique que nous sommes en présence d'un sol sablo argileux, peu plastique donc dépourvu en majeure partie du caractère plastique d'où un manque de cohésion entre les particules minérales du matériau. Par conséquent, ce sable argileux traité à 3,5 % de chaux ne peut pas être utilisé comme matériau d'apport en plate-forme de chaussée.

Le traitement à 4 % de chaux entraîne un CBR = 121 inférieur aux deux précédents dosages (2% => CBR = 145 et 3,5 % => CBR => 148) sauf que les propriétés géotechniques telles que l'indice de plasticité chute à une faible valeur IP = 8 et la valeur de bleu de méthylène chute avec $V_{BS} = 1,6$; ceci implique que nous sommes en présence d'un sol sablo argileux, peu plastique donc dépourvu en majeure partie du caractère plastique d'où un manque de cohésion entre les particules minérales du matériau. En effet, plus le taux de chaux est élevé dans le mélange et plus le sable argileux est dépourvu de son élasticité d'où l'indice de plasticité IP et la valeur de bleu de méthylène V_{BS} chutent. Par conséquent, ce sable argileux traité à 4 % de chaux ne peut pas être utilisé comme matériau d'apport en plate-forme de chaussée.

De plus, sur le plan économique, les traitements à 3,5 % et 4 % de chaux ne sont pas profitables en termes de dépense à engager pour le traitement du matériau s'agissant d'un projet routier comparativement au dosage de 2 % qui est plus économique. A cet effet, le taux de traitement à 2% est le dosage techniquement et économiquement validé dans le cadre de notre étude.

5. Discussion

Au vue de l'analyse des résultats, les valeurs des spécifications géotechniques des deux types d'échantillons de sol, il révèle que le sable argileux à l'état naturel et convenablement compacté n'a toujours pas les aptitudes techniques nécessaires pour être utilisé en couche de fondation des chaussées car le pourcentage de fines dans le matériau naturel est supérieur aux exigences géotechniques pour être admis en vue d'être utilisé. De plus, l'indice CBR est inférieur à la valeur normative minimale selon AASHTO pour être accepté en couche de fondation. D'où l'on a nécessairement procédé au traitement de ce matériau en vue de son amélioration pour répondre aux exigences techniques de la construction routière. Il faut noter que le traitement de ce matériau à 2 % de chaux a augmenté de 625% la valeur de l'indice CBR_{95} passant de 20% à 145% [11]. En effet, une étude analogue a été faite par [1] à la seule différence que leur étude portait sur le sable silteux stabilisé au ciment utilisé en couches de chaussée dans le sud du Togo et du Bénin, pour laquelle, ils avaient obtenu des résultats aussi impressionnants que les nôtres en termes d'augmentation cruciale de l'indice CBR du matériau traité.

Par ailleurs, au niveau de Paris-Est, [16] s'est également intéressé au traitement des sols fins limono-argileux à la chaux pour l'amélioration des performances mécaniques et l'impact sur les infrastructures routières face au phénomène de gel. Les résultats obtenus à travers ses recherches ont été utiles pour l'amélioration des caractéristiques géotechniques et mécaniques à court terme des sols traités qui sont moins vulnérables au phénomène de gel par rapport à celle des sols non-traités comme dans le cadre de notre étude. D'autre part, du côté de Toulouse en France, [17] a travaillé sur la stabilisation de matériaux de construction à base de terre crue par des liants hydrauliques notamment le ciment, la chaux et l'ovalbumine. Il a fait le constat selon lequel seules les stabilisations au ciment et à la chaux sont globalement plus efficaces sur le sol traité ainsi que la résistance de ces éprouvettes à l'immersion et l'augmentation du dosage en liant permet d'obtenir des résistances en compression humide plus élevées. Récemment à partir de 2020, pour son application, localement en Afrique occidentale et plus précisément au Bénin, dans le cadre du projet d'aménagement et de bitumage du tronçon Ouégbo-Toffo (situé dans l'extrême sud-est sur le même littoral commun du Bénin et du Togo) long de 12,25 km, difficile d'accès en saison pluvieuse causé par la présence de sols fins très plastiques, [18] se sont concentrés sur l'étude de trois sols à savoir : une argile noirâtre (Ar), un sable silteux jaunâtre (SS) et un sable argileux rougeâtre (SA), prélevés sur ce tronçon routier afin d'être traités à la chaux pour apprécier les modifications apportées et en tirer des solutions qui permettront une meilleure tenue des ouvrages routiers à aménager. Après étude, il ressort que seuls le sable silteux et le sable argileux de classe B2 ont vu leurs caractéristiques géotechniques des

paramètres mécaniques très améliorées et ont été acceptés en tant que matériaux de couche de forme ou d'assises de chaussée pour ce projet d'aménagement routier qui a été une réussite dans le sud du Bénin [19].

6. Conclusion

Cette étude présentée dans cet article s'inscrit dans une thématique de traitement de matériau naturel au liant hydraulique en vue de l'amélioration des performances géotechniques et mécaniques pour leur usage dans le domaine routier en général et dans les travaux de terrassement en particulier. Nous nous sommes intéressés précisément au traitement du sable argileux à la chaux et nous avons procédé dans un premier temps aux essais d'identification géotechnique du sable argileux cru en laboratoire à savoir l'essai de teneur en matières organiques, l'essai d'analyse granulométrique, l'essai de limites d'Atterberg, l'essai au bleu de méthylène afin d'apprécier ses aptitudes géotechniques pour son utilisation en assises de chaussée et dans un second temps nous avons procédé aux essais de portance à savoir l'essai Proctor modifié et l'essai CBR qui s'est révélé faible sur le sable argileux cru avec une valeur de 20%. En outre, nous avons également procédé aux essais d'identification sur le sable argileux stabilisé à la chaux ainsi que l'essai de portance qui s'est révélé évolutif avec une valeur passant de 20 % à 145%, soit une augmentation de 625 % donc jugé apte pour être utilisé en couche de fondation ou en couche de base à condition d'apporter une correction à sa formulation et plus précisément une correction à sa granulométrie en remplaçant une part du taux de fines contenu dans le matériau par des sables grossiers.

Références

- [1]- A. P'KLA, K. B. AMEY, K. NEGLO “Caractérisation géotechnique du sable silteux utilisé en couche de Chaussée au sud du Togo et du Bénin”, J. Rech. Sci. Univ. Lomé (Togo), 2016, Série E, 18(3): 185-194
- [2]- American Association Of State Highway And Transportation Officials (AASHTO) Guide For “ Design Of Pavement Structures”, Published by the AASHTO, 444 N. Capitol Street, N.W., Suite 249 Washington, D.C. 20001, 1993, 612p.
- [3]- Lomé-Wikipédia, “Administration, Démographie, Géographie, Localisation”
URL: <https://share.google/d710trFWtbA6ipZp>, (août 2025)
- [4]- Association française de normalisation AFNOR, Norme XP P94-047, “Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d’un matériau, méthode par calcination”, décembre 1998, Paris, URL: <https://urls.fr/2L0XEL>, (juillet 2024)
- [5]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF EN 933-1, “Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats-partie 1: détermination de la granularité-Analyse granulométrique par tamisage”, mai 2012, Paris, URL: <https://urls.fr/rIwxGM>, (juillet 2024)
- [6]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF ISO 17892-12 “Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols-Partie 12: détermination des limites de liquidité et de plasticité”, juillet 2018, Paris, URL: https://urls.fr/-Z-_Fm, (août 2024)
- [7]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF EN 933-9, “Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats-Partie 9: qualification des fines- Essais au bleu de méthylène”, février 2022, Paris, URL: <https://urls.fr/kyg-Vu>, (août 2024)
- [8]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF P 94-068, “Sols: reconnaissance et essais- Mesure de la capacité d’adsorption de bleu de méthylène d’un sol ou d’un matériau rocheux- Détermination de la valeur de bleu de méthylène d’un sol ou d’un matériau rocheux par l’essai à la tache”, octobre 1998, Paris, URL: <https://urls.fr/auYaN>, (août 2024)
- [9]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF P 94-093, “Sols: reconnaissance et essais- Détermination des références de compactage d’un matériau- Essai Proctor Normal - Essai Proctor Modifié”, octobre 2014, Paris, URL: <https://urls.fr/X7Muvu>, (août 2024)
- [10]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF P 94-078, “Sols: reconnaissance et essais- Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat – Mesure sur l’échantillon compacté dans le moule CBR”, mai 1997, Paris, URL: <https://urls.fr/X7Muvu>, (octobre 2024)
- [11]- I. MAMAH, “Rapport de projet d’amélioration des matériaux : caractérisation géotechnique du sable argileux amélioré à la chaux et de son étude économique”, Tropical Engineering Consult (TrEC), février 2025, N/Réf.: 01/2025/RPAM/DRI/DT/DG/TrEC, Lomé
- [12]- Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité : IDRRIM, “Guide des Terrassement, des Remblais et des couches de forme”, édition mai 2023, 9, rue de Berri – 75008 Paris, Internet : www.iddrim.com
- [13]- I. MAMAH, “Formulation d’un éco-géo-matériau à base des graveleux latéritiques associant des fibres de molinie bleue (*molinia caerulea moorhexe*) en vue d’une amélioration des caractéristiques mécaniques pour la durabilité des constructions en blocs de terre comprimée au Togo” Ph.D Thesis in Structural Engineering, Bircham International University (BIU), Madrid (2025) 179p.
- [14]- I. MAMAH, “Mini-projet de géotechnique routière : Dimensionnement Routier”, août 2016, 5^{ème} année, cycle Ingénieur, DER de génie civil, Ecole Nationale d’Ingénieurs-ABT de Bamako-Mali
- [15]- R. NADIR “l’essai CBR, un Outil Essentiel pour l’Evaluation de la capacité Portante des Sols en Géotechnique”. Novembre 2024, p.1-4. URL : <http://share.google/DELw1C6DUezRnlqDp>
- [16]- T. NGUYEN, “Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel”, thèse unique en génie civil, Université Paris-Est (2015) 317p.
- [17]- K. A. J. OUEDRAOGO, “Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux” thèse unique en génie civil, Université de Toulouse (2019) 151p.
- [18]- Y. TANKPINOU, N. SAIYOURI, R. FABRE, V. GBAGUIDI “Amélioration de sols fins au liant hydraulique routier”, Academic Journal of Civil Engineering (AJCE)-Special, France, 2020, Vol. 34 - Issue 1 : 437-444
- [19]- Ministère de l’Economie et des Finances, République du Bénin “Infrastructures et Transports: Programme Entretien et Construction de Routes et Infrastructures de Transport Rural (PECRITR)”, Projet de loi de finances pour 2020, Projet annuel de performance, Septembre 2019, www.finances.bj