



Caractérisation mécanique des résidus de phosphate traités au stabilisant Basemastic BMGP5, utilisables en couches d'assise de chaussée dans le Sud-Est du Togo

Israël MAMAH¹, Higinio Menendez MILANES², Kaboudja Djagri WADJA³

Komla BOUAMEY⁴

¹ Docteur PhD en ingénierie des Structures, Consultant à TrEC et Enseignant-Chercheur à l'Université FORMATEC, 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'étude géotechnique des résidus de phosphate afin d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques à travers le traitement par un polymère basemastic BMGP5 afin d'évaluer son impact sur la portance des sols routiers. Ces résidus phosphatés n'étant pas des matériaux conventionnels en géotechnique routière nécessitent une amélioration des performances mécaniques afin d'envisager leurs utilisations dans les couches d'assise des chaussées d'où le développement d'un composite au basemastic. La première phase consistait au prélèvement des échantillons de matériau à la carrière de Kpémé pour des essais géotechniques d'identification. La deuxième phase a visé la fabrication des éprouvettes de résidus de phosphate traitées au basemastic avec trois dosages de 25%, 35% et 50% et la troisième phase réservée aux tests de résistance mécanique des éprouvettes durcies à 7 jours d'âge. En effet, après étude, ce matériau à l'état naturel et même convenablement compacté, n'est pas utilisable en couches d'assise des routes car son $CBR_{95}=11 < 35$ est faible. Cependant, ces résidus de phosphate améliorés au basemastic peuvent être utilisés en couche de fondation et en couche de base de chaussée avec un CBR à 95% de compacité donnant des résultats probants de 105, 122 et 163 > 35 et 80, les résistances à la compression de 3,84 MPa, 4,50 MPa et 5,57 MPa ainsi que les résistances à la traction respectivement de 0,41 MPa, 0,49 MPa et 0,70 MPa conformément aux prescriptions sur les matériaux améliorés en couches de chaussées de classe des trafics T1, T2, T3, T4 et T5 du CEBTP.

Mots-clés: résidus phosphatés, amélioration, basemastic BMGP5, CBR, résistance en compression, traction.

Mechanical characterization of phosphate residues treated with the Basemastic BMGP5 stabilizer, usable in road base layers in the Southeast of Togo

Abstract

The aim of this study is the geotechnical investigation of phosphate residues in order to improve their mechanical properties through treatment with a BMGP5 basemastic polymer to assess its impact on the bearing capacity of road soils. These phosphate residues, not being conventional materials in road geotechnics, require an improvement in mechanical performance in order to consider their use in pavement sub-base layers, hence the development of a basemastic composite. The first phase involved sampling the material from the Kpémé quarry for geotechnical identification tests. The second phase focused on the production of phosphate residue specimens treated with basemastic at three dosages of 25%, 35%, and 50%, and the third phase was dedicated to mechanical strength tests of the specimens cured for 7 days. Indeed, after study, this material in its natural state and even when properly compacted is not suitable for road base layers because its $CBR_{95}=11 < 35$ is low. However, these phosphate residues improved with basemastic can be used in the subgrade and base layers of pavement, with a 95% compaction CBR giving convincing results of 105, 122, and $163 > 35$ and 80, compressive strengths of 3.84 MPa, 4.50 MPa, and 5.57 MPa, as well as tensile strengths of 0.41 MPa, 0.49 MPa, and 0.70 MPa respectively, in accordance with the specifications for improved pavement layer materials for traffic classes T1, T2, T3, T4, and T5 of CEBTP.

Keywords: phosphate residues, improvement, BMGP5 base mastic, CBR, compressive strength, tensile strength.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.18605468>

1. Introduction

Les matériaux naturels d'apport souvent extraits et utilisés pour les travaux routiers en zone tropicale comme au sud du 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, les résidus de phosphate faisant l'objet de beaucoup de réticence de la part des constructeurs dans le domaine routier à cause de ses faibles performances géotechniques et mécaniques en termes de portance CBR, de son caractère non grenu, de sa faible résistance à la compression et à la traction. Pour cela, la latérite disponible quasiment en abondance sur l'étendue du territoire togolais a été pendant longtemps utilisée [1]. De nos jours, les emprunts latéritiques répondants aux spécifications techniques pour leur utilisation en couche de structure de chaussée routières sont de plus en plus rares. Par ailleurs, il est constaté que l'adaptation des prescriptions techniques aux résidus de phosphate reste complexe du fait de la méconnaissance du comportement de ce matériau à court et à long terme. Par contre, conscient des nouvelles exigences environnementales pour les routes, il devient nécessaire d'étudier l'impact de son traitement au produit polymérique naturel basemastic BMGP5 qui dépasse les spécifications routières comparé à la latérite et au solciment en procédant à une caractérisation mécanique des paramètres géotechniques de ce matériau [2, 3, 4] afin d'apporter notre contribution à la stabilisation des résidus phosphatés relative aux spécifications techniques de l'Association Américaine des Responsables des Autoroutes des Etats et des Transports (AASHTO) et au Centre d'Essais du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) [5, 6, 1].

2. Présentation du produit polymère basemastic BMGP5 et avantages

2.1. Présentation

Basemastic BMGP5 est essentiellement un produit de revêtement et des couches d'assise des routes à base de plastique qui a une capacité de charge supérieure et peut supporter le trafic le plus lourd. Développés par les experts chimistes et ingénieurs de la société Américaine, Advanced Road Technologie Solutions (ARTS), le BMGP5 est

un produit de revêtement naturel vert, durable et sans carbone qui surpassé la chaussée d'asphalte mélangé à chaud conventionnelle en termes de résistance structurelle et de durabilité.

Par contre, Basemastic LLC est une société Américaine, enregistrée dans l'Etat du Maryland-USA. Fondée en 2010, elle a pour but de réduire les pertes associées aux méthodes de construction de routes traditionnelles et de changer les attentes mondiales concernant les délais, les budgets et les localités en matière de développement des infrastructures. Les produits basemastic sont notamment utilisés avec un rendement supérieur pour l'étanchéité dans la construction des routes avec les technologies de revêtement les plus innovantes.

Les produits basemastic sont économiques, non toxiques, sans danger pour l'environnement et extrêmement solides, avec une application unique qui lie physiquement et chimiquement les particules de sol ou de chaussée. Cela signifie une résistance à la compression améliorée, une résilience à la traction élevée et une imperméabilité à l'eau. Un récipient contenant le stabilisant basemastic BMGP5 est présenté à la *figure 1* [2, 4].



Figure 1 : Récipient de capacité 20 litres du polymère basemastic BMGP5

2.2. Avantages de basemastic pour les routes

La conception des routes varie considérablement d'un pays à l'autre, mais est généralement calculée en fonction des paramètres de performance qui doivent être atteints. Une autoroute aura un profil de conception beaucoup plus large qu'une route rurale ou urbaine. Cependant, tous les profils de route ont généralement trois couches : la couche de fondation, la couche de base et la couche de roulement.

En effet, les méthodes traditionnelles sont basées uniquement sur une méthode de terrassement simple compacté avec de l'eau et parfois non stabilisée pour créer la couche de base ou l'accent est particulièrement mis sur l'aspect visible du revêtement asphalté lorsque la couche de roulement commence à se dégrader, ce qui se manifeste par des fissures et des nids de poule, qui est généralement dû à des défaillances de la couche de fondation ou la couche de base qui sont sensibles à l'eau et à l'érosion vibratoire. En intégrant dans l'une ou la totalité de ces trois couches/section de la route, cela permet aux constructeurs de bénéficier de plusieurs avantages essentiels qui réduisent considérablement les pertes traditionnelles associées à la construction de routes modernes. Le produit basemastic économise plus de 30% des coûts par rapport aux méthodes conventionnelles, assure la route, imperméable et durable, réduit à 50% les coûts de maintenance, contrôle et préserve la poussière et l'érosion, sans danger pour l'environnement, non toxique, non corrosif, non allergène, non inflammable, assure la sécurité des travailleurs et économise 100% de la consommation d'énergie [2].

3. Matériel et méthodes

3-1. Matériel

Le matériel utilisé pour l'identification et les propriétés géotechniques du matériau des sept (7) principaux essais réalisés sur chacun des deux (2) matériaux (résidus de phosphate et le résidu de phosphate amélioré au polymère basemastic) 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°C et 500°C, d'un tamis à ouverture carrée de 2 mm de côté, d'une enceinte avec un dessicateur, d'une enceinte thermique ou étuve de dessiccation à température réglable à 50°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 [7].
- 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 [8].
- 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 [9].
- 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 [10].
- 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. [11].
- Pour l'essai de résistance à la compression et l'essai de résistance à la traction par fendage des éprouvettes respectivement selon la norme NF EN 12390-3 et NF EN 12390-6, une presse hydraulique à béton est essentiellement utilisée [1, 12].

3.2. Méthodes

La méthode utilisée consiste à échantillonner le résidu de phosphate sur la carrière située à Kpémé (localité côtière située au sud-est du Togo, à proximité de Lomé, la capitale) 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 résidus phosphatés sont recueillis dans des sacs puis transportés au laboratoire où toutes les dispositions techniques nécessaires seront prises pour la réalisation des essais [13]. Les essais sont faits selon l'ordre chronologique suivant : les essais d'identification : 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] ; les essais de résistance mécanique sur les éprouvettes : l'essai de résistance à la compression dans l'air, l'essai de résistance à la compression dans l'air plus quatre (4) jours dans l'eau et l'essai de résistance à la traction [1, 12, 13].

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 résidu phosphaté prélevé sur la carrière de Kpémé. Il est le rapport de la masse de matières organiques contenues dans un échantillon de résidu de phosphate, 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) [7].

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 de résidu phosphaté de Kpémé est de 0,3% et cette valeur étant inférieure à 2% (Moy.= 0,3% < 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.

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 constituants l'échantillon de résidu phosphaté de Kpémé selon la norme NF EN 933-1 en utilisant une série de tamis à mailles carrées de dimensions normalisées disposées verticalement emboités les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes, du haut vers le bas. Le matériau de résidu de phosphate 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 passant.

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 résidu phosphaté présenté à la *figure 2*. Cette courbe granulométrique obtenue nous a permis de déterminer la classe granulaire de notre matériau.

L'analyse du tableau et de la courbe granulométrique du résidu phosphaté en provenance de Kpémé révèlent que le matériau contient 45% d'éléments très fins caractérisés par la présence des fillers et farines avec $d \leq 0.08\text{mm}$ et 55% d'éléments moyens caractérisés par la présence du sable fin avec $D \leq 12.5\text{ mm}$.

En conclusion, le résidu phosphaté de Kpémé est de la classe granulaire 0/12,5 donc c'est un matériau fin à 45% d'éléments fin ($\%80\mu = 45\% > 20\% \Rightarrow$ 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 et mécaniques à savoir l'indice de plasticité I_p , la portance CBR, la résistance à la compression et la résistance à la traction répondent aux aptitudes géotechniques routières [8].

Tableau 2 : Tableau d'analyse granulométrique par tamisage

Granulométrie			
Masse sèche (g):		2658	
Tamis	Refus cumulé	% ref cum	Passants (%)
0,08	1466	55	45
0,16	927	35	65
0,2	669	25	75
0,315	488	18	82
0,5	410	15	85
0,8	344	13	87
1	314	12	88
1,25	287	11	89
1,6	235	9	91
2	216	8	92
2,5	190	7	93
3,15	168	6	94
4	150	6	94
5	126	5	95
6,3	105	4	96
8	90	3	97
10	72	3	97
12,5	50	2	98
14	0	0	100
16	0	0	100
20	0	0	100
25	0	0	100
31,5	0	0	100

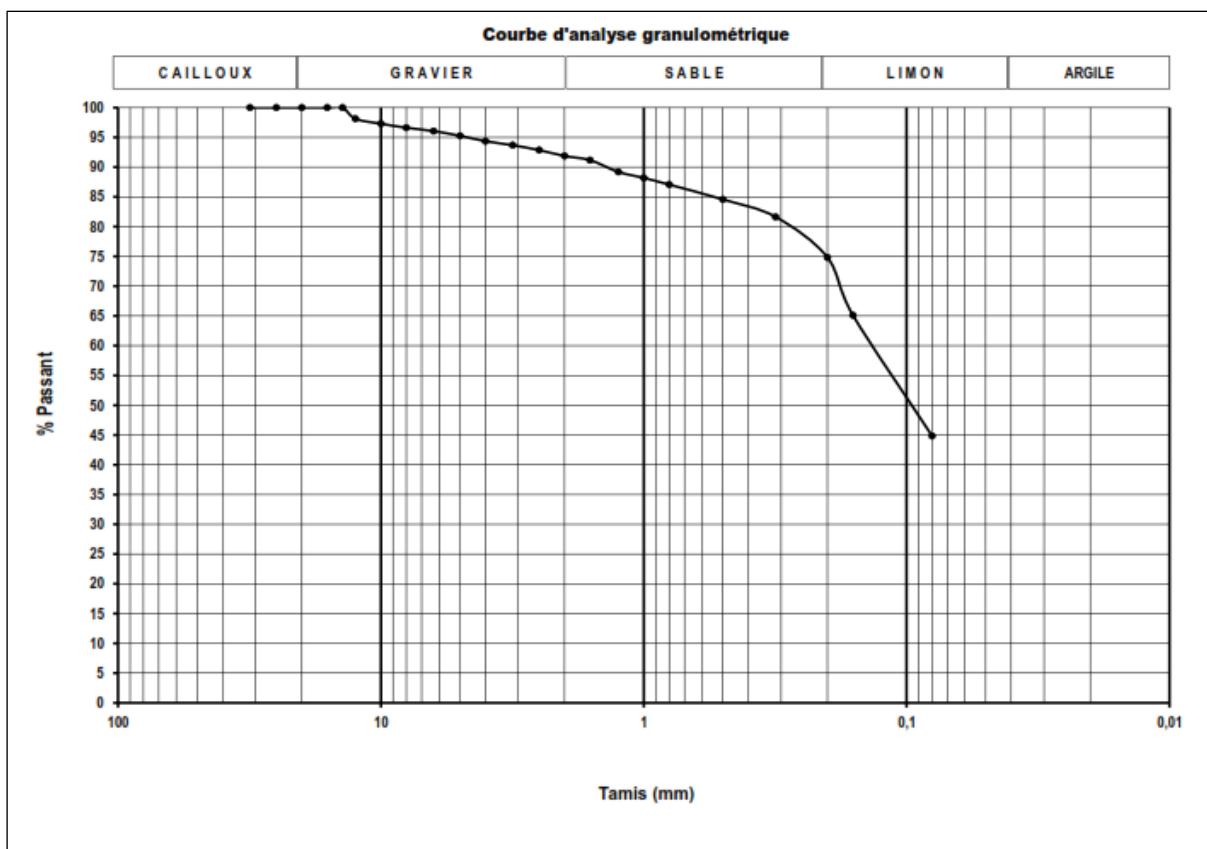


Figure 2 : Courbe d'analyse granulométrique du résidu de phosphate de Kpémé

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

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 (sol phosphaté 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*).

L'indice de plasticité du sol phosphaté naturel est :

$$I_p = 55\% - 32\% \\ I_p = 23\%$$

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 $15 < I_p = 23 < 40 \Rightarrow$ le résidu de phosphate est un sol phosphaté plastique et l'indice de plasticité $I_p = 23 < 30 \Rightarrow$ le matériau d'apport est bon.

En conclusion, dans un premier temps, le sol phosphaté de Kpémé 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 $\%80\mu$ (45%) soient $< 20\%$ [9].

3.2.1.3.2. Classification du sol phosphaté 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 Ig du résidu de phosphate 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* [6].

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							
	A1a	A1b			A2-4	A2-5	A2-6	A2-7										
% passant: au tamis de 2mm au tamis de 0,4mm au tamis de 80 μ	<50 ≤30 <15	- <50 <25	- >51 <10	- <35 <35	- <35 <35	- <35 <35	- >36 >36	- >36 >36	- >36 >36	- >36 >36	- >36 >36	- >36 >36						
Caractéristiques de la fraction passant au tamis de 2mm WL Ip																		
Indice grpe Ig	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)

$$\begin{aligned} \text{Si } I_P < 10 & \quad d = 0 \\ \text{Si } 10 < I_P < 30 & \quad d = I_P - 10 \\ \text{Si } I_P > 30 & \quad d = 20 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_g &= 0.2 \times a + 0.005 \times a \times c + 0.01 \times b \times d \\ &= (0.2 \times 10) + (0.005 \times 10 \times 15) + (0.01 \times 30 \times 13) \end{aligned}$$

$$I_g = 6.65 \approx 7 \Rightarrow \text{le sol phosphaté est du groupe A}_{7-5}(7) :$$

Sol phosphaté au comportement faible d'où la nécessité d'être traité afin de l'améliorer [4].

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 auxquelles s'ajoutent le test de résistance à la compression et le test de résistance à la traction selon les prescriptions du Centre d'Essais du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP).

3.2.2.1. L'essai Proctor modifié

Pour la mesure en laboratoire, l'essai Proctor Modifié a consisté à damer un échantillon de résidu phosphaté 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 [10].

- Essai Proctor du résidu phosphaté cru

Au vu des résultats de l'essai Proctor modifié sur le sol phosphaté, il ressort d'après la courbe Proctor qu'à l'optimum, la teneur en eau optimale $\omega_{opm} = 15,6\%$ équivaut à une densité sèche maximum $\gamma_d \text{max} = 1,86$ et compacté à 95%.

Le *tableau 5* et la *figure 3* présentent les valeurs des résultats de l'essai Proctor modifié.

Tableau 5 : Valeurs de l'essai Proctor à l'optimum du résidu phosphaté cru

O.P.M		N
$\gamma_d \text{ max} =$	1,860 t/m³	55 coups
$W_{opm} =$	15,6 %	25 coups
		12 coups
DATE DE L'ESSAI :		27/10/2025

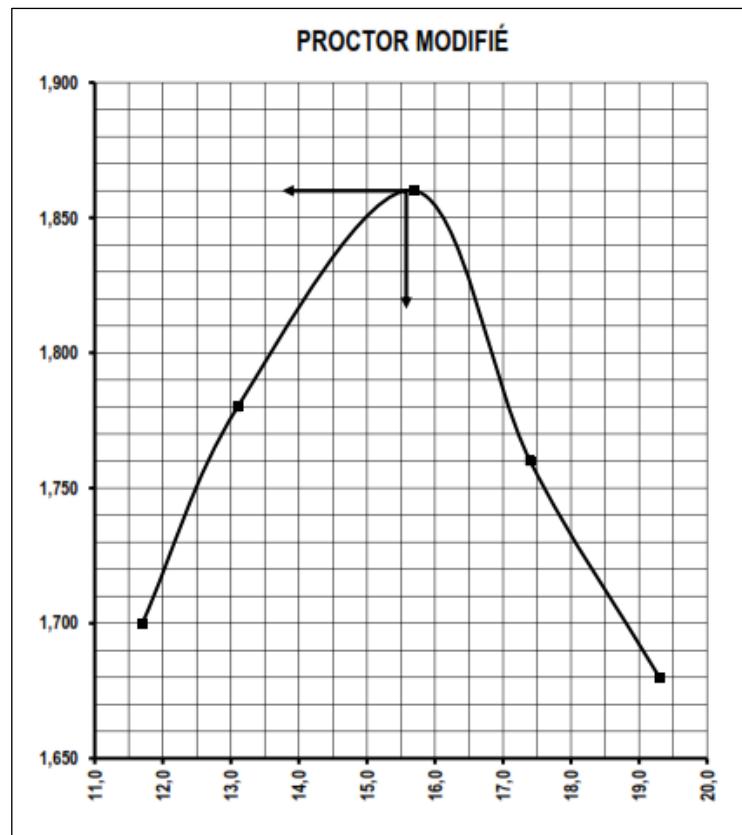


Figure 3 : Courbe Proctor Modifiée du sol phosphaté cru de Kpémé

- **Essai Proctor du sol phosphaté traité au polymère basemastic BMGP5**

(25% de basemastic et 75% d'eau, 35% de basemastic et 65% d'eau et 50% de basemastic et 50% d'eau)

Au vu des résultats de l'essai Proctor modifié sur le résidu de phosphate traité au polymère basemastic, il ressort d'après la courbe Proctor qu'à l'optimum, le sol phosphaté traité à (25% de basemastic + 75% d'eau), (35% de basemastic + 65% d'eau) et (50% de basemastic + 50% d'eau) ont respectivement une teneur en eau optimale $\omega_{opm} = 14,6\%$, $\omega_{opm} = 12,3\%$ et $\omega_{opm} = 9,9\%$ équivalent à une densité sèche maximum respectivement égales à $\gamma_d \text{max} = 1,81$; $\gamma_d \text{max} = 1,77$ et $\gamma_d \text{max} = 1,68$ et compacté à 95% => le sol phosphaté traité au polymère basemastic a les aptitudes des exigences géotechniques de l'essai Proctor à être utilisé en couches de chaussée. Par ailleurs, comparativement au sol phosphaté cru, le sol phosphaté traité au polymère basemastic absorbe moins d'eau ($\omega_{opmcru} = 15,6\% > \omega_{opt} = 14,6\%$; $\omega_{opm} = 12,3\%$ et $\omega_{opm} = 9,9\%$) avec diminution de sa masse volumique ($\gamma_d \text{maxcru} = 1,86 > \gamma_d \text{max} = 1,81$; $\gamma_d \text{max} = 1,77$ et $\gamma_d \text{max} = 1,68$), soit des diminutions respectives de 2,68% ; 4,84% et 9,68% équivalentes à 0,05 ; 0,09 et 0,18. Ces valeurs régressives confirment que le traitement au polymère basemastic du sol phosphaté compacté entraîne un allègement de la masse volumique. Le **tableau 6, 7 et 8** ainsi que la **figure 4, 5 et 6** présentent les valeurs des résultats de l'essai Proctor modifié.

Tableau 6: Valeurs de l'essai Proctor à l'optimum du sol phosphaté traité au polymère basemastic BMGP5
(25% de basemastic et 75% d'eau)

O.P.M		N
$\gamma_d \text{ max} =$	1,810 t/m^3	
$W_{opm} =$	14,6 %	55 coups
		25 coups
		12 coups
DATE DE L'ESSAI	03/11/2025	

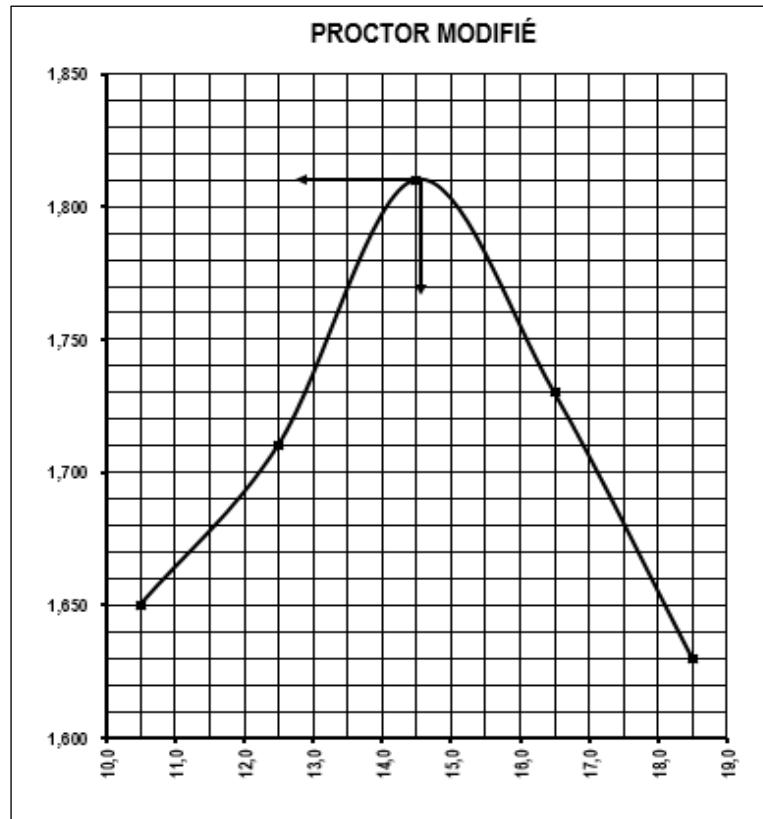


Figure 4 : Courbe Proctor Modifiée du sol phosphaté traité au basemastic (25% de basemastic et 75% d'eau)

Tableau 7 : Valeurs de l'essai Proctor à l'optimum du sol phosphaté traité au polymère basemastic BMGP5 (35% de basemastic et 65% d'eau)

O.P.M		N
γ_d max =	1,770 t/m ³	55 coups
W_{opm} =	12,3 %	25 coups
		12 coups
DATE DE L'ESSAI :		03/11/2025

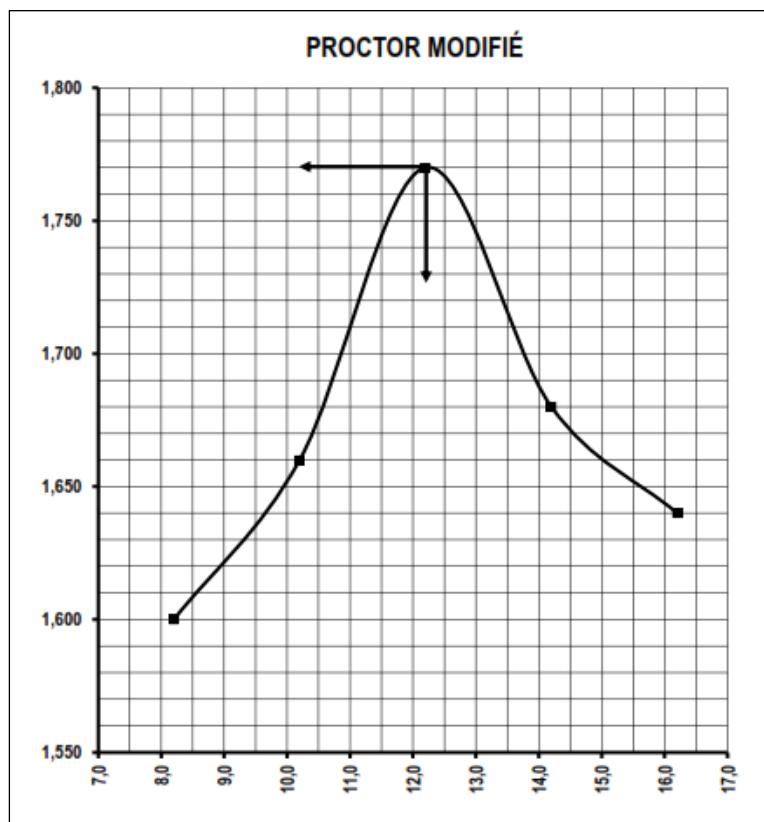


Figure 4 : Courbe Proctor Modifiée du sol phosphaté traité au basemastic (35% de basemastic et 65% d'eau)

Tableau 8 : Valeurs de l'essai Proctor à l'optimum du sol phosphaté traité au polymère basemastic BMGP5 (50% de basemastic et 50% d'eau)

O.P.M		N
γ_d max =	1,680 t/m ³	55 coups
W _{optm} =	9,9 %	25 coups
		12 coups
DATE DE L'ESSAI :		03/11/2025

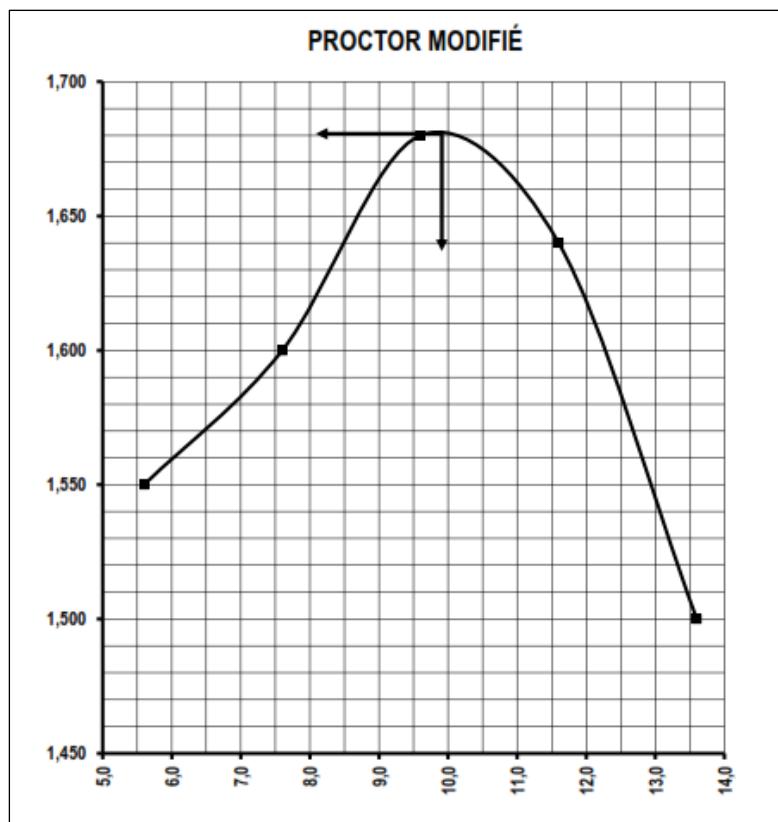


Figure 6 : Courbe Proctor Modifiée du sol phosphaté traité au basemastic (50% de basemastic et 50% d'eau)

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 sol phosphaté et du sol phosphaté traité au basemastic. 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 au basemastic, l'essai CBR (Californian Bearing Ratio) après immersion a été réalisé sur les matériaux naturels (sol phosphaté) et améliorés à la basemastic. 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 7*) 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 CBR₉₅ [11].



a-Conservation des éprouvettes CBR par immersion dans l'eau

b-Dispositif de l'essai CBR

Figure 7 : 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 9** [14, 15].

- 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.

Tableau 9: 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 sol phosphaté cru : échantillon 1

Au vu des résultats de l'essai CBR à 95% de la compacité avec une densité sèche $\gamma_d = 1,77$ sur le sol phosphaté cru, il ressort que ce matériau est de la classe de portance S3 car $10 < CBR = 11 < 15$, un CBR = 11 \Rightarrow sol moyen, acceptable pour certaines applications car $7 < CBR = 11 < 20$ mais pas excellent ou idéal pour les fondations des routes d'où la nécessité de le traiter à 25%, 35% et 50% de basemastic BMGP5 pour l'améliorer.

Les valeurs obtenues de l'essai CBR du sable argileux cru sont présentées à travers le **tableau 10** et la **figure 8**.

Tableau 10: valeurs CBR du sol phosphaté cru

Compacité	γ_d t/m ³	CBR	W imb.	Gonfl.
100,0%	1,860	17	17,2%	
95,2%	1,770	11	17,8%	0,00%
89,8%	1,670	3	19,1%	
DATE DE L'ESSAI:				31/11/2025

CBR, FONCTION DE LA COMPACITE

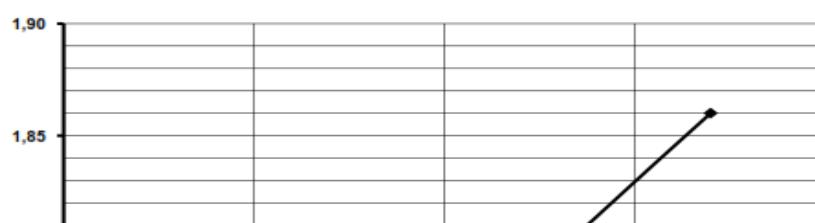


Figure 8 : Courbe CBR du sol phosphaté cru

3.2.2.2.2. Valeurs obtenues de l'essai CBR du sol phosphaté traité à 25% de basemastic : échantillon 2

Au vu des résultats de l'essai CBR à 95 % de la compacité avec une densité sèche $\gamma_d = 1,68$ sur le sol phosphaté traité à 25% de basemastic et 75% d'eau, il ressort que ce sol traité a un CBR = 105 > 50 => Excellent sol, de classe S5 car son indice portant CBR = 105 > 35 donc idéal pour les fondations des routes. Ce sol peut être également utilisé comme couche de base car CBR = 105 > 80 .On peut de ce fait conclure que le traitement du résidu de phosphate au basemastic a amélioré de façon spectaculaire le CBR avec une croissance exponentielle passant de 11 à 105, soit une augmentation de 854,54%.

Les résultats obtenus de l'essai CBR du sol phosphaté traité sont présentés au **tableau 11** et la **figure 9**.

Tableau 11 : valeurs CBR du sol phosphaté traité à 25% de basemastic

Compacité	$\gamma_d \text{ t/m}^3$	CBR	W imb.	Gonfl.
100,0%	1,810	128	15,1%	
95,0%	1,720	105	15,8%	0,00%
90,1%	1,630	75	17,3%	
DATE DE L'ESSAI:	10/11/2025			

CBR, FONCTION DE LA COMPACITE A 25% DE BASEMASTIC ET 75% D'EAU

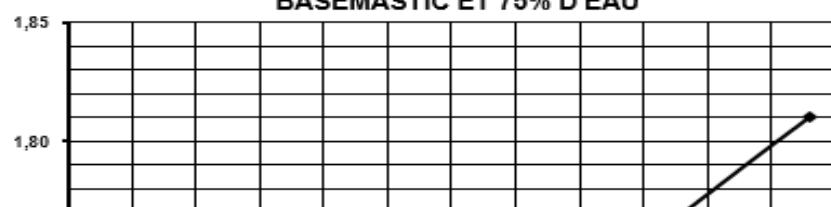


Figure 9 : Courbe de l'évolution du CBR avec le dosage au basemastic à 25%

3.2.2.3. Valeurs obtenues de l'essai CBR du sol phosphaté traité à 35% de basemastic : échantillon 3

Au vu des résultats de l'essai CBR à 95 % de la compacité avec une densité sèche $\gamma_d = 1,68$ sur le sol phosphaté traité à 35% de basemastic et 65% d'eau, il ressort que ce sol traité a un CBR = 122 > 50 => Excellent sol, de classe S5 car son indice portant CBR = 122 > 35 donc idéal pour les fondations des routes. Ce sol peut être également utilisé comme couche de base car CBR = 122 > 80 .On peut de ce fait conclure que le traitement du résidu de phosphate au basemastic a amélioré de façon spectaculaire le CBR avec une croissance exponentielle passant de 11 à 122, soit une augmentation de 1009%.

Les résultats obtenus de l'essai CBR du sol phosphaté traité sont présentés au **tableau 12** et la **figure 10**.

Tableau 12 : valeurs CBR du sol phosphaté traité à 35% de basemastic

Compacité	γ_d t/m ³	CBR	W imb.	Gonfl.
100,0%	1,770	148	12,8%	
94,9%	1,680	122	13,5%	0,00%
89,8%	1,590	93	14,7%	
DATE DE L'ESSAI:	10/11/2025			

CBR, FONCTION DE LA COMPACITE A 35% DE BASEMASTIC ET 65% D'EAU

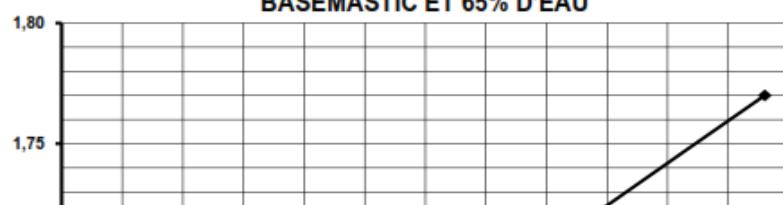


Figure 10 : Courbe de l'évolution du CBR avec le dosage au basemastic à 35%

3.2.2.4. Valeurs obtenues de l'essai CBR du sol phosphaté traité à 50% de basemastic : échantillon 4
 Au vu des résultats de l'essai CBR à 95 % de la compacité avec une densité sèche $\gamma_d = 1,6$ sur le sol phosphaté traité à 50% de basemastic et 50% d'eau, il ressort que ce sol traité a un CBR = 163 > 50 => Excellent sol, de classe S5 car son indice portant CBR = 163 > 35 donc idéal pour les fondations des routes. Ce sol peut être également utilisé comme couche de base car CBR = 163 > 80 .On peut de ce fait conclure que le traitement du résidu de phosphate au basemastic a amélioré de façon spectaculaire le CBR avec une croissance exponentielle passant de 11 à 163, soit une augmentation de 1382%.

Les résultats obtenus de l'essai CBR du sol phosphaté traité sont présentés au **tableau 13** et la **figure 11**.

Tableau 13 : valeurs CBR du sol phosphaté traité à 50% de basemastic

Compacité	γ_d t/m ³	CBR	W imb.	Gonfl.
100,0%	1,680	215	10,7%	
95,2%	1,600	163	11,9%	0,00%
89,9%	1,510	127	13,4%	
DATE DE L'ESSAI:	10/11/2025			

CBR, FONCTION DE LA COMPACITE A 50% DE BASEMASTIC ET 50% D'EAU

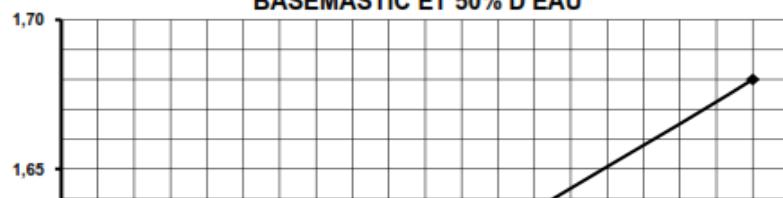


Figure 11 : Courbe de l'évolution du CBR avec le dosage au basemastic à 50%

Le graphique de figure 12 présente l'évolution du CBR des éprouvettes de sols phosphatés crus et ceux traités au basemastic à 25%, 35% et 50%.

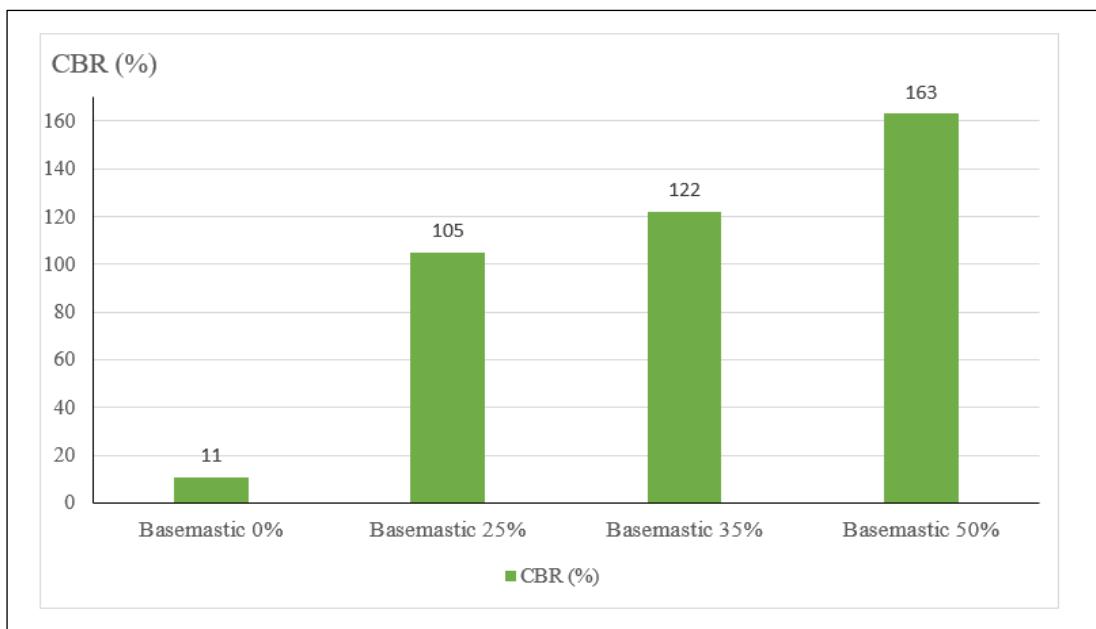


Figure 12 : Graphique représentant l'évolution du CBR des éprouvettes des sols phosphatés crus et des sols phosphatés traités au basemastic

3.3. Confection et caractérisation mécanique des éprouvettes

3.3.1. Confection des éprouvettes

La confection de chaque éprouvette de volume standard $V = 1570 \text{ cm}^3$ de mélange des résidus phosphatés intégrant le polymère basemastic a été faite et présentée dans le *tableau 14* selon les dosages et les proportions suivants [4] :

Tableau 14 : dosage et poids des matériaux utilisés pour le mélange d'une éprouvette de 1570 cm^3

Echantillon	Dosage en eau et stabilisant	Poids matériau du mélange
Echantillon 1.	0% de Basemastic 100% d'eau	Résidus phosphatés = 2920 g Eau = 456 g
Echantillon 2.	25% de Basemastic 75% d'eau	Résidus phosphatés = 2920 g Eau = 342 g Basemastic = 114 g
Echantillon 3.	35% de Basemastic 65% d'eau	Résidus phosphatés = 2920 g Eau = 159,6 g Basemastic = 296,4 g
Echantillon 4.	50% de Basemastic 50% d'eau	Résidus phosphatés = 2920 g Eau = 228 g Basemastic = 228 g

3.3.2. Caractérisation mécanique des éprouvettes

La détermination des résistances en compression et en traction par fendage sont données par les expressions suivantes:

- Pour la résistance à la compression σ_c , les éprouvettes sont chargées par une force P sur une face circulaire de diamètre D [16, 1, 12] :

$$\sigma_c = \frac{4P}{\pi D^2}$$

La *figure 13* présente une éprouvette soumise à une charge de compression à la presse à béton.



Figure 13 : Test de résistance en compression d'une éprouvette traitée au basemastic

- Pour la résistance à la traction par fendage σ_t , les éprouvettes sont posées sur un contact linéaire h sur les deux faces opposées, une section de diamètre D et soumises à une charge P [16, 1, 12] :

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi D^2 h}$$

La *figure 14* présente une éprouvette soumise à une charge de traction à la presse à béton.



Figure 14 : Test de résistance en traction par fendage d'une éprouvette traitée au basemastic

4. Résultat

Les tableaux 15, 16 et 17 présentent les valeurs des résistances à la compression des éprouvettes conservées dans l'air, la résistance à la compression des éprouvettes conservées dans l'eau et la résistance à la traction par fendage des éprouvettes conservées dans l'air et dosées respectivement à 25%, 35% et 50% de basemastic [4].

Tableau 15 : valeurs des résistances à la compression et à la traction des éprouvettes dosées à 25% de basemastic

		ETUDE									
		RAPPORT D'ESSAIS DE STABILISATION AU BASEMASTIC									
Provenance : KPEME											
Date : 10/11/2025			Dosage : 25 % de basemastic et 75 % d'eau						Opérateur : AKPAKA Freddy		
N°	Date de confection	Date écrasement	Age	Poids éprouvette	Volume éprouvette	Densité Humide	W% de moulage	Densité sèche	Résist. à la compression (bars)		Résist. à la traction (bars)
									Charge KN	Re _{3j} air	R _{C_{3j}} air + 4 j eau
1	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3371	1570	2,15	15,6	1,86	32,22	41,04	
2	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3374	1570	2,15	15,6	1,86	28,17	35,89	
3	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3373	1570	2,15	15,6	1,86	30,13	38,38	
4	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3372	1570	2,15	15,6	1,86	20,24		25,78
5	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3370	1570	2,15	15,6	1,86	18,08		23,03
6	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3373	1570	2,15	15,6	1,86	19,66		25,04
7	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3372	1570	2,15	15,6	1,86			14,07
8	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3374	1570	2,15	15,6	1,86			4,48
9	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3373	1570	2,15	15,6	1,86			12,29
											3,91
											12,67
											4,04
									Moyenne	38,44	24,62
											4,14

Tableau 16 : valeurs des résistances à la compression et à la traction des éprouvettes dosées à 35% de basemastic

		ETUDE																			
RAPPORT D'ESSAIS DE STABILISATION AU BASEMASTIC																					
Provenance : KPEME																					
Date : 10/11/2025			Dosage : 35 % de basemastic et 65 % d'eau			Opérateur : AKPAKA Freddy															
N°	Date de confection	Date écrasement	Age	Poids éprouvette	Volume éprouvette	Densité Humide	W% de moulage	Densité sèche	Résist. à la compression (bars)		Résist. à la traction (bars)										
									Charge KN	Re _{3j} air	R'C _{3j} air + 4 j eau	Charge KN	Rt _{3j} air								
1	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3370	1570	2,15	15,6	1,86	36,11	46,00											
2	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3372	1570	2,15	15,6	1,86	35,02	44,61											
3	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3370	1570	2,15	15,6	1,86	34,88	44,43											
4	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3372	1570	2,15	15,6	1,86	28,41		36,19										
5	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3374	1570	2,15	15,6	1,86	30,16		38,42										
6	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3371	1570	2,15	15,6	1,86	27,48		35,01										
7	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3372	1570	2,15	15,6	1,86				15,88	5,06								
8	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3374	1570	2,15	15,6	1,86				16,18	5,15								
9	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3371	1570	2,15	15,6	1,86				14,56	4,64								
									Moyenne	45,01	36,54		4,95								

Tableau 17 : valeurs des résistances à la compression et à la traction des éprouvettes dosées à 50% de basemastic

		ETUDE																			
RAPPORT D'ESSAIS DE STABILISATION AU BASEMASTIC																					
Provenance : KPEME																					
Date : 10/11/2025			Dosage : 50 % de basemastic et 50 % d'eau			Opérateur : AKPAKA Freddy															
N°	Date de confection	Date écrasement	Age	Poids éprouvette	Volume éprouvette	Densité Humide	W% de moulage	Densité sèche	Résist. à la compression (bars)		Résist. à la traction (bars)										
									Charge KN	Re _{3j} air	R'C _{3j} air + 4 j eau	Charge KN	Rt _{3j} air								
1	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3371	1570	2,15	15,6	1,86	43,26	55,11											
2	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3371	1570	2,15	15,6	1,86	45,09	57,44											
3	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3374	1570	2,15	15,6	1,86	42,91	54,66											
4	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3371	1570	2,15	15,6	1,86	33,96		43,26										
5	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3370	1570	2,15	15,6	1,86	35,18		44,82										
6	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3373	1570	2,15	15,6	1,86	35,51		45,24										
7	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3373	1570	2,15	15,6	1,86				22,06	7,03								
8	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3373	1570	2,15	15,6	1,86				21,5	6,85								
9	03/11/2025	10/11/2025	7 jrs	3374	1570	2,15	15,6	1,86				23,18	7,38								
									Moyenne	55,74	44,44		7,08								

Les graphiques des figures 15 et 16 présentent respectivement l'évolution de la résistance à la compression et à la traction des éprouvettes de sols phosphatés traités au basemastic à 25%, 35% et 50%.

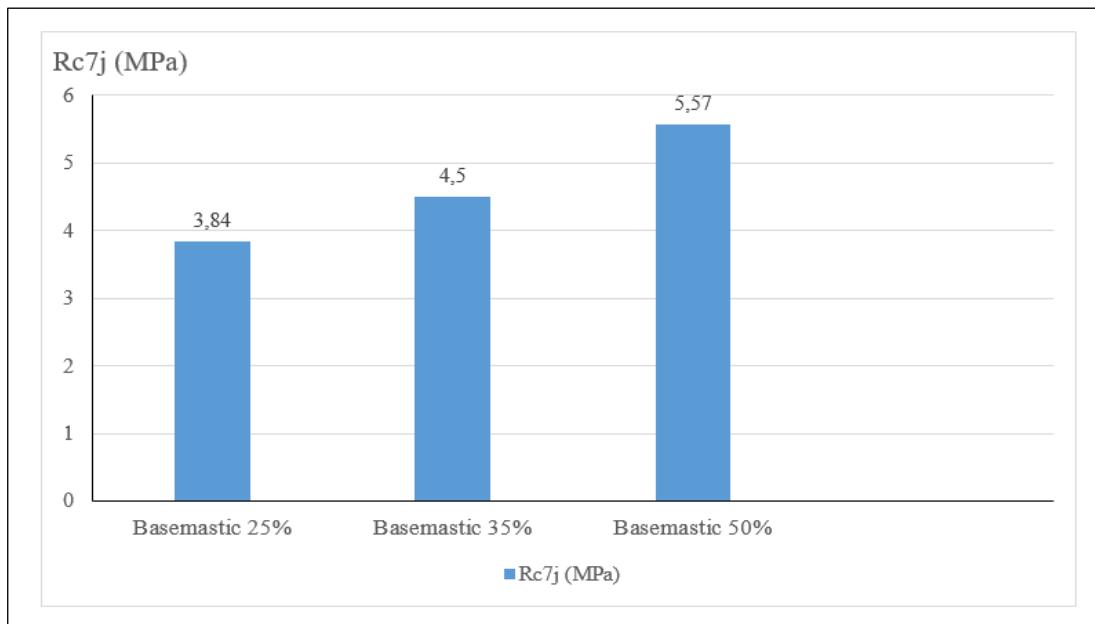


Figure 15 : Graphique représentant l'évolution de la résistance à la compression à 7 jours d'âge dans l'air des éprouvettes des sols phosphatés traités au basemastic

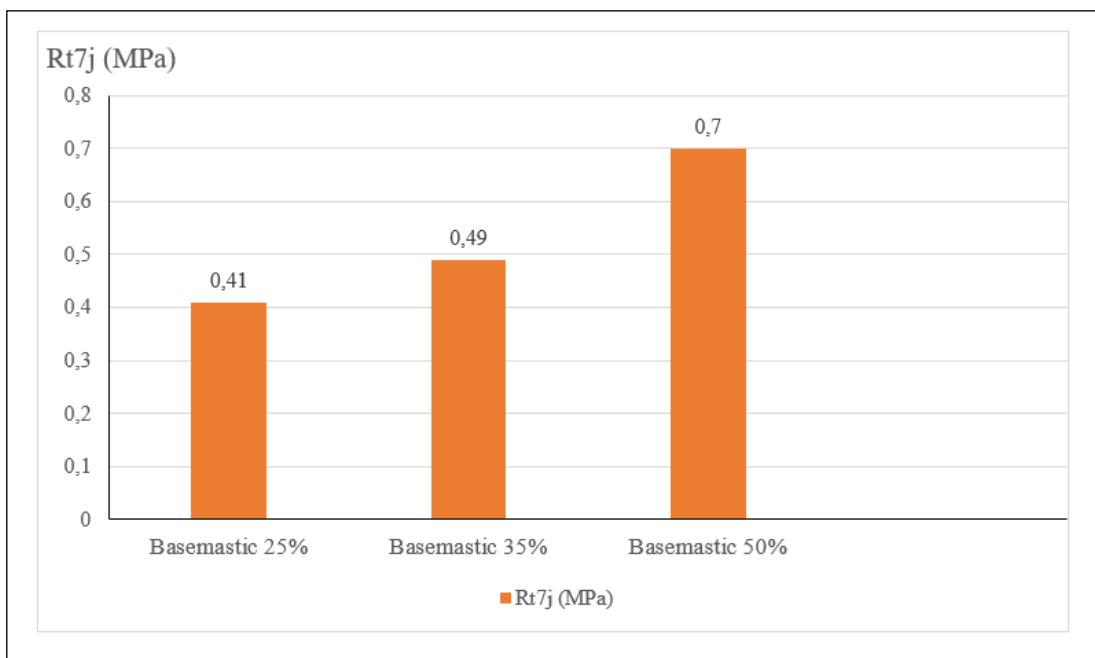


Figure 16 : Graphique représentant l'évolution de la résistance à la traction à 7 jours d'âge dans l'air des éprouvettes des sols phosphatés traités au basemastic

5. Discussion

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 au basemastic 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 du résidu phosphaté cru aura les aptitudes à être utilisé en couche de fondation à condition qu'il soit amélioré parce que :
 - $I_p = 23 < 30 \Rightarrow$ Bon
 - $\% 80\mu = 45 \% > 20 \% \Rightarrow$ Non
 - $CBR = 11 < 35 \Rightarrow$ Non

Ce traitement fut fait précédemment dans le cadre de notre étude à travers le traitement du sol phosphaté au basemastic.

- L'échantillon 2 traité à 25% de basemastic 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 résidus phosphatés supérieurs aux passants à 80 microns dans le matériau parce que :

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

- $I_p = 23 < 30 \Rightarrow$ Bon
- $\% 80\mu = 45 \% > 20 \% \Rightarrow$ Non
- $CBR = 105 > 35 \Rightarrow$ Bon

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

- $I_p = 23 < 30 \Rightarrow$ Bon
- $\% 80\mu = 45 \% > 20 \% \Rightarrow$ Non
- $CBR = 105 > 80 \Rightarrow$ Bon

- L'échantillon 3 traité à 35% de basemastic 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 résidus phosphatés supérieurs aux passants à 80 microns dans le matériau parce que :

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

- $I_p = 23 < 30 \Rightarrow$ Bon
- $\% 80\mu = 45 \% > 20 \% \Rightarrow$ Non
- $CBR = 122 > 35 \Rightarrow$ Bon

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

- $I_p = 23 < 30 \Rightarrow$ Bon
- $\% 80\mu = 45 \% > 20 \% \Rightarrow$ Non
- $CBR = 122 > 80 \Rightarrow$ Bon

- L'échantillon 4 traité à 50% de basemastic 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 résidus phosphatés supérieurs aux passants à 80 microns dans le matériau parce que :

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

- $I_p = 23 < 30 \Rightarrow$ Bon
- $\% 80\mu = 45 \% > 20 \% \Rightarrow$ Non
- $CBR = 163 > 35 \Rightarrow$ Bon

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

- $I_p = 23 < 30 \Rightarrow$ Bon
- $\% 80\mu = 45 \% > 20 \% \Rightarrow$ Non
- $CBR = 163 > 80 \Rightarrow$ Bon

Par ailleurs, les prescriptions du Centre d'Essais du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) relatives à la résistance en compression et à la résistance en traction à 7 jours d'âge dans l'air des sols améliorés utilisables en couches de chaussée sont également des indicateurs essentiels de performance mécanique du matériau traité et sont présentées dans le **tableau 18** [4, 1].

Tableau 18 : Prescription sur les matériaux améliorés en couches de chaussée (CEBTP 1984)

Paramètres	CEBTP (trafic T4-T5)		CEBTP (trafic T1-T3)	
	Base	Fondation	Base	Fondation
CBR min	160	80	--	60
Rc7 jrs air (MPa)	1,8 - 3	$\geq 1,00$	--	0,5
R'c/Rc	--	$\geq 0,5$	--	0,5
Rt 7 jrs air	$\geq 0,3$	--	--	-

Au vu des prescriptions ci-dessus, il convient de noter que l'échantillon 2 (sol phosphaté traité à 25% de basemastic), l'échantillon 3 (sol phosphaté traité à 35% de basemastic) et l'échantillon 4 (sol phosphaté traité à 50% de basemastic) présentent des résistances à la compression et à la traction supérieures aux valeurs normatives du CEBTP respectivement comme suit [4] :

- Echantillon 2 : $R_{c7jrs} = 3,84$ MPa
 $R_{t7jrs} = 0,41$ MPa
- Echantillon 3 : $R_{c7jrs} = 4,50$ MPa
 $R_{t7jrs} = 0,49$ MPa
- Echantillon 4 : $R_{c7jrs} = 5,57$ MPa
 $R_{t7jrs} = 0,70$ MPa

A cet effet, ces sols phosphatés améliorés à 25%, 35% et à 50% au basemastic pourront être utilisés en couche de fondation et en couche de base des chaussées des trafics de classe T1, T2, T3, T4 et T5 parce que les valeurs des résistances sont suffisamment élevées, évolutives d'un dosage progressif de basemastic à un autre donc respectant ainsi les prescriptions requises par le Centre d'Essais du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP).

Par ailleurs, hormis son usage aux Etats-Unis, cette technologie de traitement de couches des sols routiers avec le produit basemastic est déjà utilisée dans plusieurs pays africains, où elle a permis de prolonger la durée de vie des routes tout en facilitant la réhabilitation de voies dégradées. Comme exemple, nous pouvons citer la phase d'expérimentation de cette technologie du produit basemastic qui a été expérimenté sur un tronçon de 5 kilomètres, situé dans l'enceinte du centre de radio thérapie de l'hôpital de Tengandogo au Burkina Faso et qui a été d'une réussite incontestable. Cette réussite a été possible grâce au partenariat entre la société Basemastic LLC et le ministère des infrastructures du Burkina Faso sous la coordination d'une séance de travail approfondie avec les services techniques concernés, notamment le Laboratoire national du bâtiment et des travaux publics (LNBTP) et la Direction générale de la normalisation et des études techniques (DGNET) [17].

6. Conclusion

Cette étude présentée dans ce rapport s'inscrit dans une thématique de traitement de matériau naturel au polymère de basemastic BMGP5 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 des résidus de phosphates au basemastic et nous avons procédé dans un premier temps aux essais d'identification géotechnique du sol phosphaté cru en laboratoire à savoir l'essai de teneur en matières organiques, l'essai d'analyse granulométrique et l'essai de limites d'Atterberg 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 à 95% de compacité qui s'est révélé faible sur les résidus de phosphate cru avec une valeur de 11. En outre, nous avons également procédé aux essais de portance ainsi que les tests de résistance mécanique des sols phosphatés traités à 25%, 35% et 50% de basemastic qui se sont révélés évolutifs avec des valeurs de CBR passant de 105 ; 122 à 163 soit une augmentation respective de 854,54% ; 1109% et 1382% ; une résistance à la compression respectivement de 3,84 MPa, 4,50 MPa et 5,57 MPa ainsi que la résistance à la traction respectivement de 0,41 MPa, 0,49 MPa et 0,70 MPa. Ses valeurs évolutives des performances géotechniques et mécaniques permettent donc de conclure l'aptitude des sols phosphatés traités au basemastic à être utilisés en couche de fondation et en couche de base à condition d'apporter une correction à leur formulation et plus précisément une correction à leur granulométrie à cause de leur caractère non grenu en remplaçant 26% de fines contenu dans le matériau par des résidus de phosphates grossiers.

Références

- [1]- Basemastic, votre solution économique et environnementale pour les travaux publics, 76p.
- [2]- Centre National de Recherche et d'Expérimentation en Bâtiment et Travaux Publics CNREX-BTP, “ Les caractéristiques mécaniques et chimiques du produit polymère (BMGP5) : Utilisation du produit polymère dans la construction des routes”, Rapport géotechnique, client : Basemastic Mali-Sarl, deuxième version, Bamako, juillet 2020.
- [3]- I. MAMAH, “Formulation d'un matériau routier à base des résidus de phosphate traités au polymère Basemastic BMGP5”, Rapport géotechnique de projet d'étude de matériaux, N/Réf.:05/2025/RPEBMGP5/DRI/DT/DG/TrEC, Décembre 2025.
- [4]- I. MAMAH, H. M. MILANES, K. D. WADJA, K. BOUAMEY “Caractérisation géotechnique du sable argileux traité à la chaux, utilisable en couches de chaussée dans l'extrême Sud-Ouest du Togo”, Revue Internationale de la Recherche Scientifique (Revue-IRS), vol.3 N°5 : (4637-4652) Septembre 2025
- [5]- A. PKLA, 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
- [6]- I. MAMAH, H. M. MILANES, M. A. N. EL-REEDY, A. A. SHAHRI “Formulation et caractérisation mécanique d'un éco-géo-matériau à base des graveleux latéritiques intégrant des fibres de molinie bleue pour la durabilité des constructions en blocs de terre comprimée (BTC) au Togo”, Revue Internationale de la Recherche Scientifique (Revue-IRS), vol.3 N°4 : (3985-4001) Août 2025
- [7]-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.
- [8]- 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.
- [9]- 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)
- [10]- 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)
- [11]- 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)
- [12]- 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)

[13]-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)

[14]- Ministère des Infrastructures du Burkina Faso, “ Un partenaire américain propose des solutions innovantes pour les routes burkinabè”, Réception en audience de M. Franck Ovis SEDRO, président-directeur général de l’entreprise américaine Basemastic LLC, par M. Adama Luc SORGHO, ministre des Infrastructures et du Désenclavement, 5 mai 2025, Ouagadougou, URL: <https://urls.fr/qeFE0c>, (décembre 2025)

[15]- 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

[16]- 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>

[17]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF EN 12390-3, “Essai pour béton durci-Partie 3: résistance à la compression des éprouvettes”, juin 2019, Paris, URL: <https://urls.fr/aiECbM>, (septembre 2024)