

Caractérisation géomécanique et évaluation en construction routière des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya (Nord-Kivu, R.D. Congo)

Kitima Mwibandwa Aimé

Département de Génie civile, BP 1334, Institut Supérieur Pédagogique et Technique / ISPT-BUKAVU

aimekitima85@gmail.com

doi: <https://doi.org/10.37745/bjmas.2022.04165>

Published August 31, 2024

Citation : Aimé K.M. (2024) Caractérisation géomécanique et évaluation en construction routière des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya (Nord-Kivu, R.D. Congo), *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies* 5(4),41-60

Abstract : *The objective of this work is to evaluate the geotechnical characteristics of pozzolanic materials from Kanyaruchinya in the Democratic Republic of Congo, in order to define the practical modalities of their use in road construction. After a detailed macroscopic description of the materials in the field, the taken samples were subject to a geotechnical identification. The geotechnical work focused on the realization of identification and compaction tests by reference to French standards. The obtained results show that the studied materials are porous and loose. The Kanyaruchinya pozzolanas are of vacuolar and scoriaceous structure, and present a variability of color going from brick red to dark brown, yellow and black due to the iron oxidation states. These materials consist of high gravel content (47–76%), moderate sand content (21–44%) and low to moderate pebble content (2–30%). With a maximum grain diameter (25–40 mm) smaller than 60 mm, these materials can be used in road construction without risk of segregation. The studied pozzolanas are less fine ($3\% < C_{80\mu m} < 4\%$) and non-plastic. The CBR (California Bearing Ratio) of the studied pozzolana has an average value of 31%. These materials can be used as sub-base layer for low volume traffic T1 despite their maximum dry density (MDD) values lower than 1.80. This use is confirmed by their maximum grain diameter of less than 60 mm and grading modulus values between 1.65 and 2.70. The optimization of their use in sub-base layer for all volume traffics and in base course requires an improvement by adding a fine-grained, high-density material such as clay sand, sandy clay, clay lateritic. This operation could raise the MDD values. However, a compaction energy higher than that obtained for traditional materials is necessary for the implementation of these materials in their natural state.*

Keywords: pozzolanic materials, geotechnics, road construction, Kanyaruchinya, Democratic Republic of Congo.

Résumé

Le présent travail a pour objectif d'évaluer les caractéristiques géotechniques des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya en République Démocratique du Congo, afin de définir les modalités pratiques de leur utilisation en construction routière. Après une description macroscopique détaillée des matériaux sur le terrain, les échantillons prélevés ont fait l'objet

d'une identification géotechnique. Les travaux de laboratoire ont porté sur la réalisation des essais d'identification et de compactage par référence aux normes françaises. Les résultats obtenus montrent que les matériaux étudiés sont poreux et meubles. Les pouzzolanes de Kanyaruchinya sont de structure vacuolaire et scoriacée, et présentent une variabilité de couleur allant de rouge brique à brun foncé, jaune et noire due aux états d'oxydation de fer. Ces matériaux sont constitués de fortes teneurs en graviers (47 – 76 %), de teneurs modérées en sables (21 – 44 %) et de teneurs faibles à modérées en cailloux (2 – 30 %). De diamètre maximal des grains (25 – 40 mm) inférieur à 60 mm, ces matériaux peuvent être utilisés en construction routière sans risque de ségrégation. Les pouzzolanes étudiées sont moins fines ($3\% < C_{80\mu m} < 4\%$) et non plastiques. L'indice portant CBR (*California Bearing Ratio*) des pouzzolanes étudiées a une valeur moyenne de 31 %. Ces matériaux peuvent être utilisés en couche de fondation pour les trafics faibles T1 malgré leurs valeurs de densité sèche maximale (DSM) inférieure à 1,80. Cette utilisation est confirmée par leur diamètre maximal des grains inférieur à 60 mm et par leur valeur de module de classement comprise entre 1,65 et 2,70. L'optimisation de leur utilisation en couche de fondation pour tout type de trafic et en couche de base nécessite une amélioration par ajout d'un matériau à granulométrie fine et à forte densité tel que le sable argileux, l'argile sableuse, l'argile latéritique, etc. Cette opération pourrait relever les valeurs de DSM. Cependant, une énergie de compactage supérieure à celle obtenue pour les matériaux traditionnels est nécessaire pour la mise en œuvre de ces matériaux à l'état naturel.

Mots clés : matériaux pouzzolaniques, géotechnique, construction routière, Kanyaruchinya, République Démocratique du Congo.

INTRODUCTION

L'utilisation de matériaux pouzzolaniques dans la construction de routes présente un intérêt évident dans les pays volcaniques en raison de leur abondance et de leur faible coût d'exploitation, ce qui les rend économiquement intéressants (ISTED, 1987). La zone de Kanyaruchinya appartenant à la province volcanique des Virunga dans le fossé tectonique du Kivu à l'Est de la République Démocratique du Congo est le siège d'un volcanisme récent (Tertiaire-Quaternaire) (Smet et al., 2016). Les éruptions explosives des volcans satellites des Virunga ont libéré d'importantes quantités de pouzzolanes qui recouvrent le vaste champ de lave et le socle précambrien sur une superficie estimée de 2300 à 2500 km² (Denaeyer, 1972 ; Villeneuve et al., 2022). Cependant, la construction routière est fortement consommatrice de ressources naturelles minérales et la qualité de la route dépend de celle des matériaux utilisés (ISTED, 1987). De plus, les performances mécaniques des Pouzzolanes s'avèrent parfois médiocre et surtout variables d'une région à une autre. Leur utilisation nécessite donc un minimum de connaissance de leurs propriétés géotechniques afin d'éviter leur gaspillage et d'élaborer des recommandations visant à optimiser leur condition de mise en œuvre. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce présent travail ayant trait à l'évaluation des caractéristiques géotechniques des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya (R.D.Congo) afin de définir les modalités pratiques de leur utilisation en construction routière.

Milieu naturel

La zone de Kanyaruchinya est située à une dizaine de kilomètres au Nord de la ville de Goma au pied du flanc sud du volcan Nyiragongo dans le territoire portant le même nom. Cette zone s'étend entre 1°15'0'' et 1°45'0'' de latitude Sud et entre 29°01'40'' et 29°25'10'' de longitude Est. (Fig. 1). Le climat est de type montagneux à quatre saisons alternant entre deux saisons sèches et deux saisons de pluie avec une pluviométrie comprise entre 20,7mm et 133,7 mm (Lebrun, 1942). Les *Andosols* développés sur les laves basaltiques du vaste champ volcanique des Virunga occupent la quasi – totalité de la zone de Kanyaruchinya et supportent une forêt dense sèche constituée des *Sclérophylles* (Robyns, 1948 ; Cazenave-Piarrot et al., 2015 ; Badriyo et al., 2021 ; Pouclet, 2021 ; Villeneuve et al., 2022) (Fig. 2). Le relief peu accidenté de Kanyaruchinya est constitué des plaines légèrement inclinées vers l'Ouest et de quelques collines ou anciens cônes adventifs de scories dont le plus élevé est celui de Mugara (1800 m) (Robyns, 1948). Dans ce vaste champ volcanique, les ruissellements de surface sont rares à travers le paysage à cause de la perméabilité élevée des coulées basaltiques qui le recouvre (Lebrun, 1938). Le drainage s'effectue par un réseau de rivières souterraines qui alimente au sud de la zone, le bassin du lac Kivu à la hauteur de 1,3 km³ d'eau par an (Ross et al., 2015 ; Barenbold, 2020).

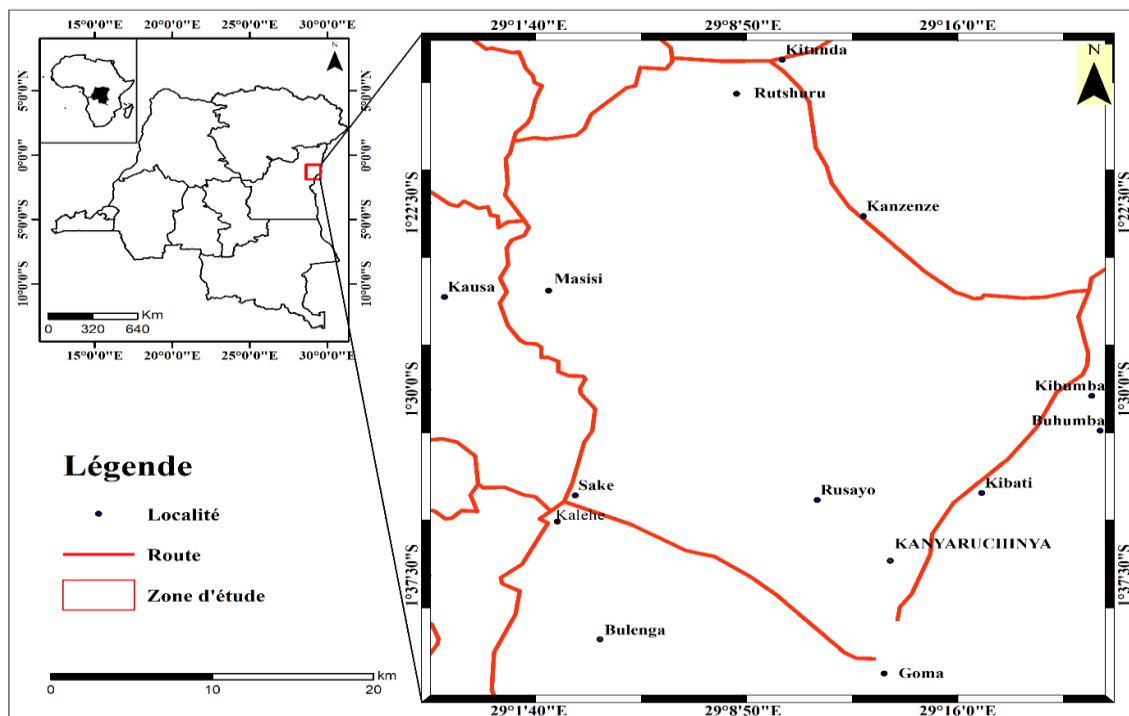


Figure 1. Localisation de la zone d'étude (image open Street map, 2022)

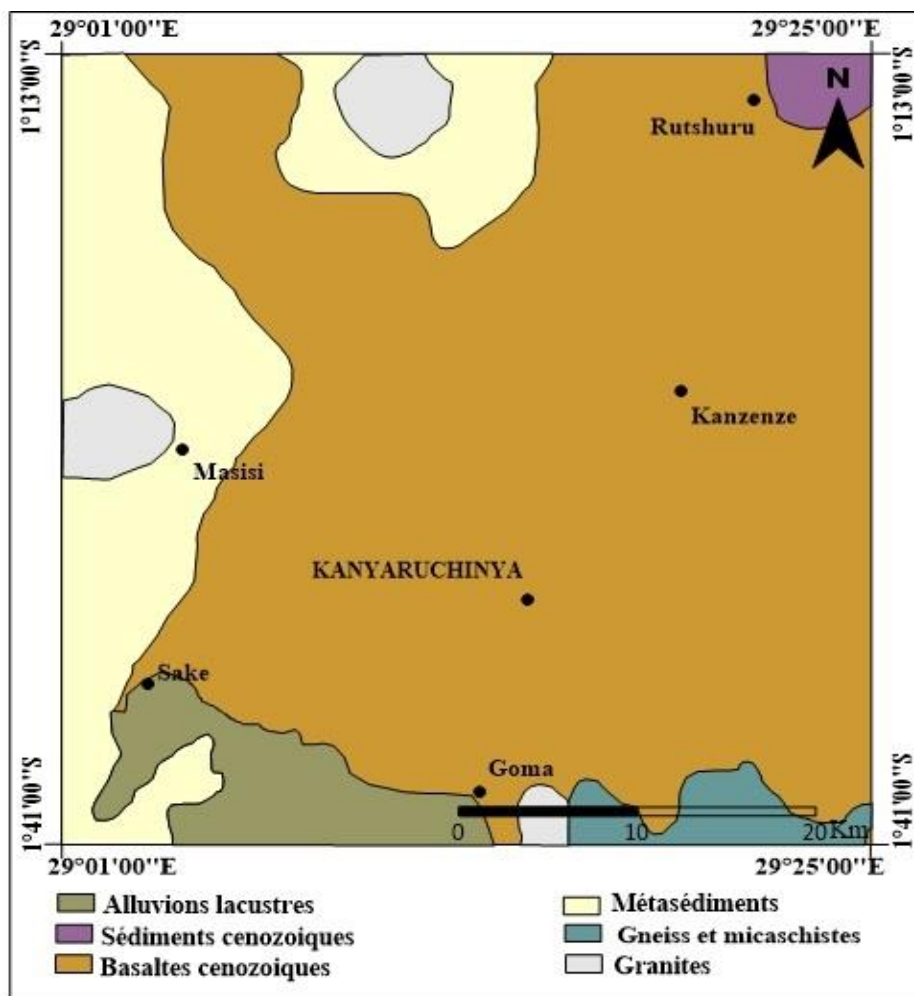


Figure 2. Géologie de la zone de Kanyaruchinya et ses environs (Cazenave-Piarrot et al., 2015)

Matériel et méthodes

Travaux de terrain

Les travaux de terrain ont consisté en la reconnaissance générale de la zone d'étude, à la localisation des sites et points de prélèvement ainsi qu'au prélèvement et à la description des échantillons. Les échantillons ont été prélevés à Mugara. C'est un vaste cône de scories volcaniques de 1800 m. Le prélèvement des échantillons a été effectué à l'aide d'une pelle mécanique par grattage sur les fronts de taille des carrières, par la méthode des tas coniques. Les échantillons prélevés étaient ensuite emballés dans des sacs. Au total, 05 échantillons de 50 kg chacun ont été prélevés. L'encodage des échantillons a été effectué à l'aide d'un marqueur indélébile. La nomenclature adoptée comporte un préfixe des trois premières lettres du nom du site où l'échantillon a été prélevé. Par exemple, MUG désigne un échantillon prélevé dans le site de Mugara (carrière). Le chiffre romain indique le rang du site (carrière) et le chiffre arabe

indique le rang de l'échantillon (Tab. 1). Le matériel utilisé pour la localisation comprend un appareil photo et un appareil récepteur GPS.

Tableau 1. Code de l'échantillon prélevé par site

| Sites | Code de l'échantillon |
|------------|-----------------------|
| Mugara I | MUG 01 |
| Mugara II | MUG 02 et MUG 03 |
| Mugara III | MUG 04 et MUG 05 |

Travaux de laboratoire

Les essais géotechniques ont été réalisés au Laboratoire de Génie civil de la Faculté des Sciences et Technologies Appliquées de l'Université Libre des Pays de Grands Lacs/ULPGL-Goma (R.D. Congo). Il s'agit des essais d'identification géotechnique et de compactage par référence aux normes françaises. Les essais mécaniques tels que la compression simple et la traction indirecte réalisés n'ont pas été satisfaisants compte tenu du caractère non plastique des pouzzolanes de Kanyaruchinya. L'essai Los Angeles réalisé sur ces matériaux n'a pas aussi abouti.

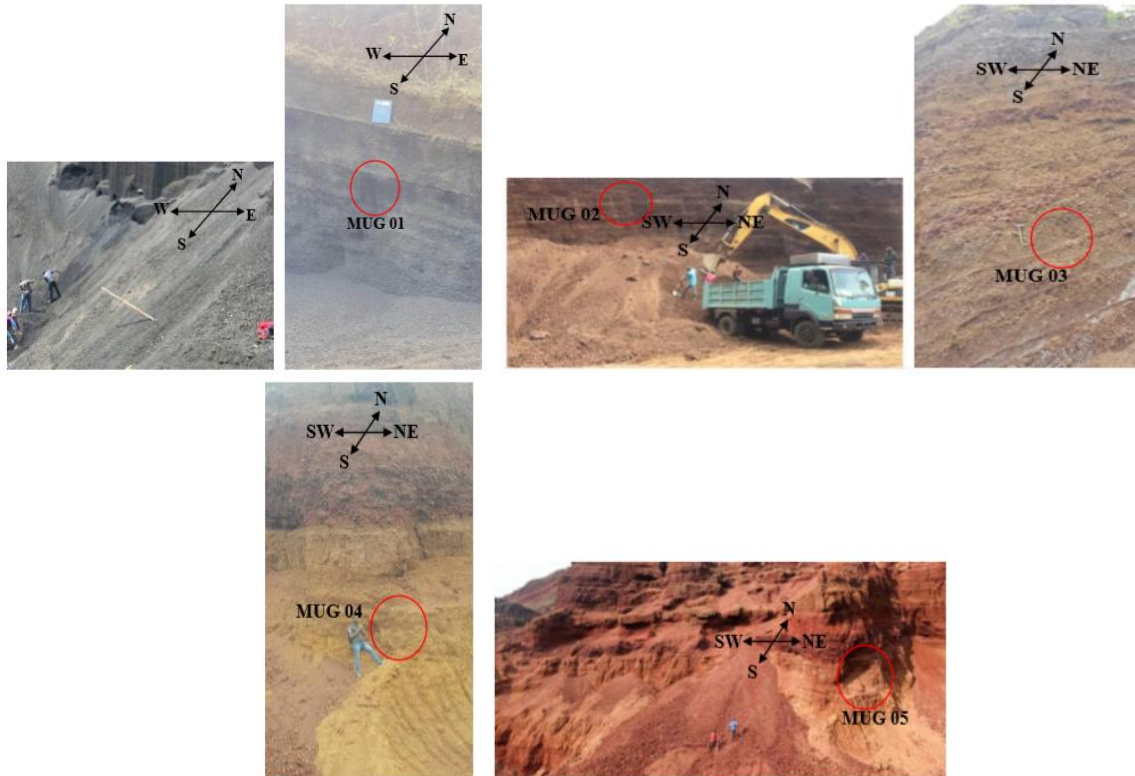
Méthodes d'exploitation des données géotechniques

L'exploitation des données géotechniques a consisté en la comparaison des résultats aux spécifications établies et en leur classification géotechnique. La comparaison des résultats obtenus aux spécifications a été effectuée par référence aux normes AFNOR (Association Française de Normalisation) et à l'exploitation des documents de référence tels que, le guide de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux (CEBTP, 1984) et les recommandations de l'Institut des Sciences et des Techniques de l'équipement et de l'Environnement pour le Développement sur les matériaux volcaniques et leur utilisation en technique routière (ISTED, 1987). La classification des matériaux pouzzolanique de Kanyaruchinya s'est faite par référence au système LCPC (Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées).

Résultats

Description de matériaux étudiés

Les matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya sont de couleur rouge brique à brun foncé, jaune et noire. De structure scoriacée ou vacuolaire, ils sont poreux et meubles.



Figures 3 : Bancs de prélèvement des matériaux

Caractéristiques physiques des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya

Poids volumique des grains solides

Les valeurs de poids volumique des grains solides des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya sont présentées par la figure 4. Les valeurs de paramètres varient entre 1,60 et 2,35 gf/cm^3 pour une valeur moyenne de 2,00.

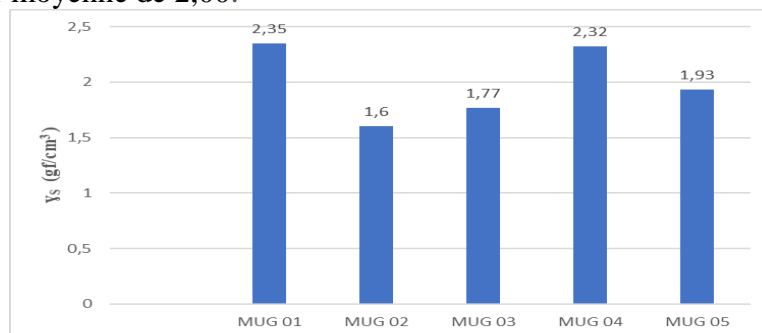


Figure 4 : Valeurs de poids volumique des grains solide

Analyse granulométrique par tamisage

Les données d'analyse granulométrique par tamisage de matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya sont rendues par les courbes granulométriques de la figure 5. L'exploitation de ces courbes montre que les matériaux étudiés sont constitués de teneurs fortes en gravier, faibles à modérées en sables et très faibles en cailloux. Les teneurs de gravier oscillent entre 47 et 76

%, soit une moyenne de 60 % (Tab. 2). Celles de sable varient entre 21 et 44 % pour une teneur moyenne de 30 % (Tab. 2). Les valeurs de cailloux s'étalent entre 2 et 30 %, soit une valeur moyenne de 10 % (Tab. 2). Les matériaux pouzzolaniques étudiés sont constitués d'un diamètre maximal compris entre 25 et 40 mm (Tab. 2). Ils se composent donc de 20 à 44 % de squelette, 11 à 21 % de mortier et 3 à 4 % de fines, soit 3,6 % de fines en moyenne (Tab. 2). Les valeurs du coefficient d'uniformité varient entre 15 et 300 pour une moyenne de 96,4 (Tab. 2). Les valeurs du coefficient de courbure oscillent entre 0,8 et 52,08 pour une valeur moyenne de 16,23 (Tab. 2).

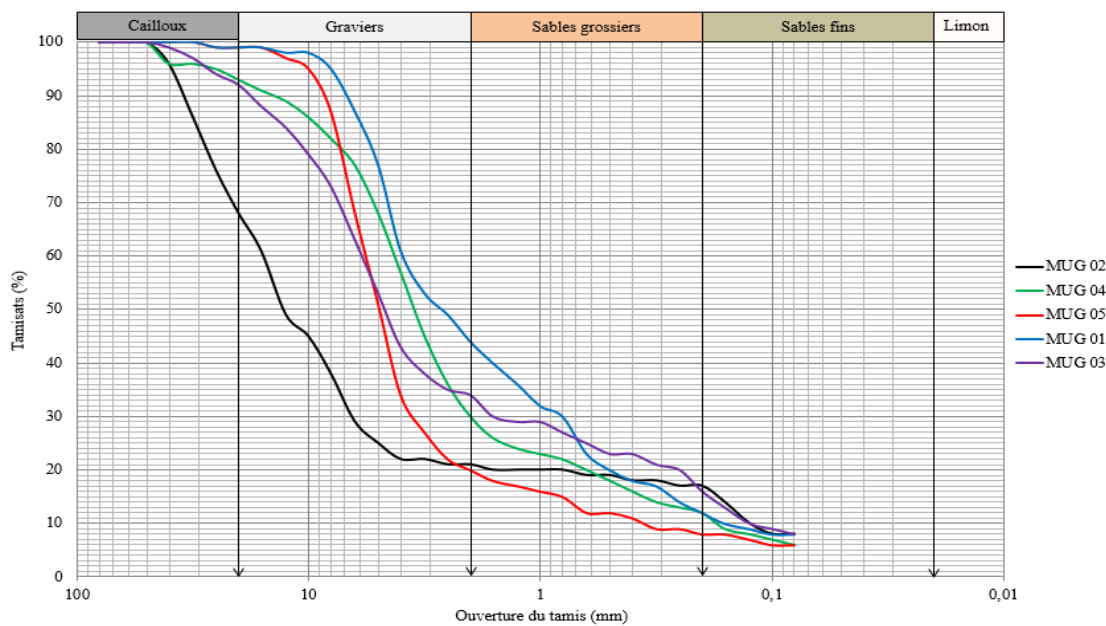


Figure 5. Courbes granulométriques des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya

Tableau 2. Valeurs des caractéristiques granulométriques, des coefficients d'uniformité et de courbure des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya

| Echantillon | D_{max} (mm) | $C_{80\mu m}$ | Sables $0,02 < \phi < 2mm$ | Graviers $2 < \phi < 20mm$ | Cailloux $20 < \phi < 100mm$ | C_u | C_c | Squelettes (%) | Mortiers (%) |
|-------------|-------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------------------|-----------------|
| MUG 01 | 25 | 3 | 44 | 54 | 2 | 21,0 | 0,84 | 44 | 18 |
| MUG 02 | 40 | 4 | 21 | 47 | 30 | 300 | 52,08 | 21 | 18 |
| MUG 03 | 40 | 4 | 32 | 60 | 8 | 100 | 10,03 | 34 | 21 |
| MUG 04 | 40 | 4 | 30 | 61 | 8 | 46 | 11,5 | 30 | 16 |
| MUG 05 | 25 | 3 | 22 | 76 | 2 | 15 | 6,7 | 20 | 11 |

Paramètres de plasticité

Les résultats de cet essai montrent que les matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya présentent des valeurs de limites de liquidité (LL) qui s'étalent entre 25,7 et 43,1 %. Les valeurs

de limites de plasticité (LP) n'ont pas été déterminées ainsi que celles correspondantes d'indice de plasticité et de consistance (Fig. 6).

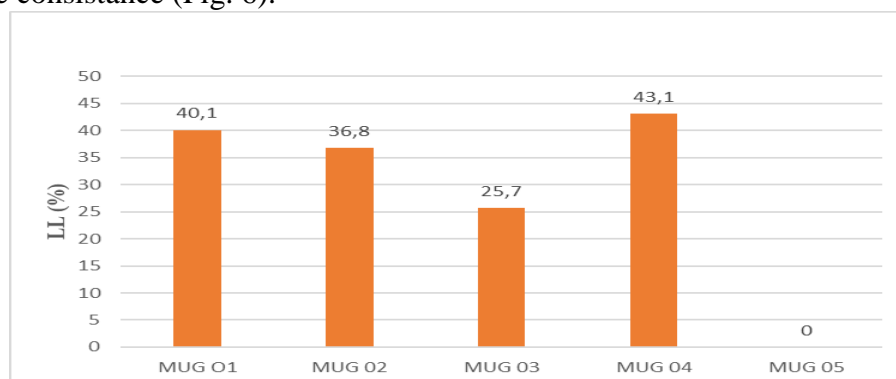


Figure 6 : Caractéristiques déterminées à partir des limites d'Atterberg

Valeur au bleu de méthylène du sol VBS

Les résultats de cet essai révèlent que les matériaux pouzzolaniques étudiés ont des valeurs de bleu de méthylène qui varient entre 1,4 g/100 g et 2,5 g/100 g pour une valeur moyenne de 2,06 g/100 g (Fig. 7).

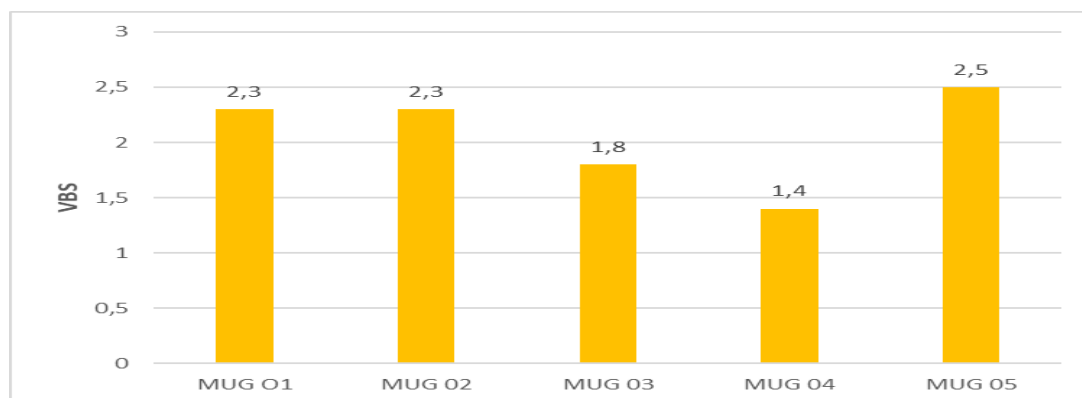


Figure 7 : Valeurs au bleu de méthylène des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya

Paramètres dérivés

De tous les paramètres dérivés étudiés sur les Pouzzolanes de Kanyaruchinya, seul le module de classement (Gm) est déterminé. Les valeurs de ce paramètre varient entre 2,35 et 2,66 pour une valeur moyenne de 2,50 (Fig. 8).

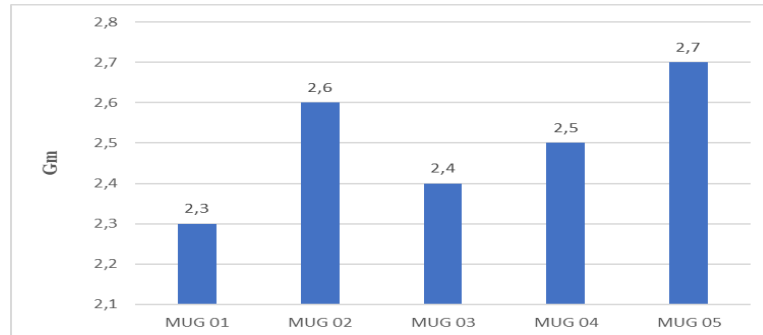


Tableau 8. Valeurs du module de classement des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya

Paramètres de compactage

Proctor modifié

Les données de l'essai Proctor modifié des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya sont rendues par les courbes Proctor de la figure 9. L'exploitation de ces courbes montre que les valeurs de teneur en eau à l'optimum Proctor modifié (TE – OPM) varient entre 8,10 et 31 % pour une valeur moyenne de 18,04 % (Fig. 10). Les matériaux pouzzolaniques étudiés présentent des valeurs de densité sèche maximale (DSM) qui s'étalent entre 1,15 et 1,34, soit une valeur moyenne de 1,23 (Tab. 3).

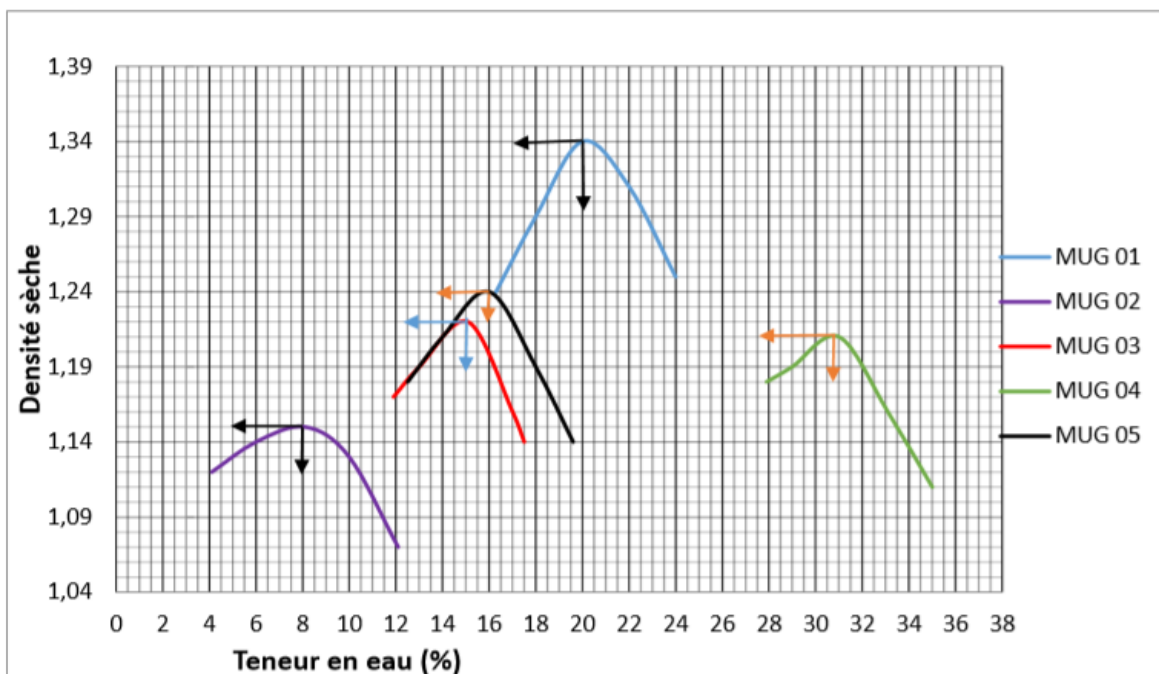


Figure 9 : Courbes Proctor modifié des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya

Californian bearing ratio

Les résultats de l'essai CBR à 95 % OPM de matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya sont présentés dans le tableau 3. Les valeurs de la portance CBR des matériaux étudiés oscillent entre 17 et 50 % pour une valeur moyenne de 31 % (Tab. 3).

Tableau 3 : Valeurs des paramètres de compactage de matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya

| Matériau | TE – OPM (%) | DSM | CBR |
|----------|--------------|------|-----|
| MUG 01 | 20,00 | 1,34 | 39 |
| MUG 02 | 8,10 | 1,15 | 50 |
| MUG 03 | 15,10 | 1,22 | 26 |
| MUG 04 | 31,00 | 1,21 | 17 |
| MUG 05 | 16,00 | 1,24 | 25 |

DISCUSSION

Matériaux Pouzzolaniques de Kanyaruchinya

De l'observation visuelle sur terrain des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya à travers les bancs d'emprunts, il en ressort que ces matériaux affleurent par séquences de dépôts. La description des échantillons issus de ces séquences de dépôts montre que les matériaux étudiés sont poreux et meubles. De structure scoriacée et vacuolaire, ces matériaux sont riches en fer. Ils sont de couleur rouge brique à brun foncé, jaune et noire. Cette variabilité des couleurs serait due aux états d'oxydation du fer (ISTED, 1987 ; Rocher, 1992).

En effet, on considère que lorsque les projections pyroclastiques tombent à une température supérieure à 600 ° C, donc à proximité du point d'éjection (faciès cœur de cône), elles sont suffisamment chaudes, peuvent s'oxyder au contact de l'air et favoriser la formation de l'hématite, stable à ces températures, ce qui n'est pas le cas de la goethite. Tel est le cas des échantillons MUG 04 et MUG 05 du site de prélèvement Mugara III. Les projections déposées en périphérie, sont trop refroidies pour s'oxyder. Le fer est alors à un état réduit (Fe_3O_4), d'où la teinte grise à noire : c'est le faciès base de cône à celui du saupoudrage. Ceci concerne les échantillons issus des sites de prélèvement Mugara I et II (MUG 01, MUG 02 et MUG 03).

Caractéristiques physiques

Poids volumiques de grains solides

La valeur moyenne de poids volumique des grains solides des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya (2,00 gf/cm³) est inférieure à 2,85 gf/cm³, minimum requis au matériaux traditionnels pour une excellente performance en construction routière (Nwaiwu et al., 2006 ; Paige-Green et al., 2015). Cette faible valeur moyenne du poids volumique de grains solides des matériaux pouzzolaniques étudiés traduit également leur faible densité. Ceci serait due à leur faible teneur en particules fines (3 – 4 %) et à la structure vacuolaire qui les caractérise (CEBTP, 1984 ; ISTED, 1987). Cette valeur moyenne du poids volumique de grains solides de matériaux

pouzzolaniques de Kanyaruchinya est similaire à celle obtenue sur les matériaux pouzzolaniques du Madagascar (2,00 gf/cm³) (Halifa, 2000).

Analyse granulométrique par tamisage

Granulométrie

Les résultats des caractéristiques granulométriques de matériaux pouzzolaniques étudiés montrent que le diamètre maximal des grains (D_{max}) varie de 25 mm à 40 mm. Ces valeurs de diamètre maximal des grains sont légèrement supérieures à celles obtenues sur les matériaux similaires en Ethiopie (20-37,5 mm) (Teshome, 2015) et en Tanzanie (26 mm) (Chengula et Mkeni, 2021). Les matériaux pouzzolaniques étudiés contiennent une faible teneur en fines ($3 < C_{80\mu m} < 4$). Ce qui explique leur manque de cohésion. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus sur les pouzzolanes du Cameroun (5 %) (Lobe Bille et al., 2022). Cette faible teneur en fines ($3 < C_{80\mu m} < 4$), couplée aux valeurs de diamètre maximal de grains (25 à 40mm) des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya justifient leur utilisation en construction routière sans risque de ségrégation (CEBTP, 1984). Les matériaux étudiés étant constitués de teneurs moyennes fortes en graviers (60 %), faibles à modérées en sables (30 %) et faibles en cailloux (10 %), ils sont donc qualifiés de graviers sableux avec un peu de cailloux. Le coefficient d'uniformité permet d'exprimer l'étalement de la courbe granulométrique. La valeur moyenne du coefficient d'uniformité des matériaux étudiés est élevée (96,4). Ceci indique que l'écart entre D_{10} et D_{60} est élevé et qu'au sein de matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya il y a plus de particules de diamètres équivalents (Robitaille, 1997). Les résultats similaires du coefficient d'uniformité ont été trouvés sur les pouzzolanes de Madagascar (Halifa, 2020). Le coefficient de courbure permet de décrire la forme de la courbe granulométrique entre les diamètres effectifs D_{10} et D_{60} (Fig. 15). La valeur moyenne du coefficient de courbure de matériaux pouzzolaniques de la zone d'étude est élevée (16,23). La granulométrie de matériaux étudiés est ainsi mal graduée et qu'au sein de ces matériaux, il y a absence de certains diamètres entre les diamètres effectifs D_{10} et D_{60} (Robitaille, 1997). Les résultats similaires du coefficient de courbure ont été trouvés sur les matériaux pouzzolaniques de Madagascar (3,20) (Halifa, 2020).

Interprétation des fuseaux granulométriques

Afin de savoir si les seuils des éléments grossiers et fins des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya sont soit largement dépassés ou insuffisants aussi bien qualitativement que quantitativement pour leur utilisation en couche de fondation, une comparaison est faite ici entre les courbes granulométriques de matériaux étudiés et le fuseau granulométrique type recommandé (CEBTP, 1984). D'une façon globale, les courbes granulométriques de Pouzzolanes de Kanyaruchinya ne sont pas correctement inscrites dans le fuseau de spécification pour une utilisation en couche de fondation (Fig. 10). Seul le matériau MUG 02 a une courbe granulométrique presque bien inscrite dans le fuseau de spécification. Les autres matériaux (MUG 01 MUG 03, MUG 04 et MUG 05) ont présenté des courbes avec une fraction granulométrique comprise entre 4 et 30 mm faisant significativement déborder les branches supérieures des courbes hors du fuseau de spécification pour une utilisation en couche de fondation (Fig. 10). Ceci indique qu'une correction granulométrique est nécessaire pour

l'utilisation de ces matériaux dans le corps de chaussées par ajout d'un matériau à granulométrie fine et à forte densité comme le sable argileux, l'argile sableuse, l'argile latéritique, etc.

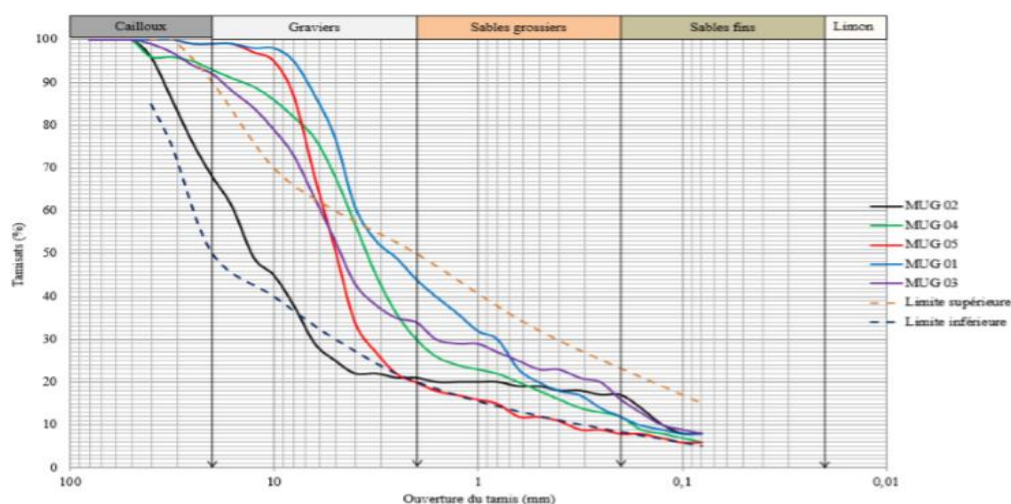


Figure 10 : Position des courbes granulométriques de matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya dans le fuseau de spécification pour la couche de fondation (CEBTP, 1984)

Paramètres de plasticité

Les essais de limite d'Atterberg effectués sur les cinq échantillons de matériaux pouzzolaniques de la zone d'étude ont permis de déterminer seulement les limites de liquidité. Les caractéristiques de plasticité (limite de plasticité LP et IP) ne l'ont pas été suite au caractère granulaire de matériaux pouzzolaniques étudiés. Ceci conduirait à penser que les matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchnya n'ont pas encore subi un début d'altération et sont donc caractérisés par une teneur très moins faibles en fines (ISTED, 1987). Ces résultats sont similaires à ceux obtenus en Ethiopie (Teshome, 2015), en Tanzanie (Chengula et Mkeni, 2021), en Madagascar (Halifa, 2020) et au Cameroun (Lobe Bille et al., 2022).

Classification LCPC

Cette étude faisant état de la caractérisation géotechnique des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya en vue de leur utilisation en construction routière, l'un des systèmes de classification le plus adapté est la classification LCPC. Ce système de classification tient compte de la granulométrie et des limites d'Atterberg. Les résultats de classification d'après ce système en fonction de $C_{80\mu m}$, C_{2mm} , C_{20mm} , C_u et C_c permettent de dire que les matériaux étudiés sont généralement des graviers propres mal gradués (Gw) et propres bien gradués (Gb) (Tab. 5).

Tableau 5 : Résultats de classification LCPC

| | MUG 01 | MUG 02 | MUG 03 | MUG 04 | MUG 05 |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $C_{80\mu m}$ (%) | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| $C_{2 mm}$ (%) | 44 | 21 | 34 | 30 | 20 |
| $C_{20 mm}$ (%) | 99 | 68 | 92 | 93 | 99 |
| C_u | 21,0 | 300 | 100 | 45,98 | 15 |
| C_c | 0,84 | 52,08 | 10,03 | 11,5 | 6,7 |
| Classe LCPC | Gb | Gw | Gw | Gw | Gw |

Selon le LCPC, les différentes classes retrouvées sont :

- **Gb** : grave propre bien graduée ;
- **Gw** : grave propre mal graduée.

Valeur au bleu de méthylène

Les matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya présentent des valeurs de VBS relativement élevées (1,4 à 2,5 g/100 g). Ce qui conduirait à qualifier la fraction fine de ces matériaux de limoneuse. Les matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya sont riches en oxyde de fer. Les valeurs élevées de VBS dans les matériaux pouzzolaniques étudiés seraient le fait non pas de l'absorption de bleu de méthylène par les particules argileuses mais plutôt par les colloïdes d'oxydes de fer en suspension dans la solution (Alexander et al., 1962 ; Lyon Associates, 1971 ; Autret, 1980). D'après ces travaux, le bleu de méthylène n'est pas seulement absorbé par les particules argileuses dans un matériau, mais aussi et surtout par les colloïdes d'oxyde de fer présents dans ce matériau.

Paramètres dérivés

Les paramètres dérivés servent à quantifier l'influence de la plasticité des fines sur la performance générale du matériau, qui dépend de la proportion et de la nature de celles-ci (Charman, 1988 ; Bello et Osinubi, 2010). Le module de classement (Gm) est le seul paramètre dérivé qui a été déterminé sur les matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya suite à leur faible teneur en fines (3 – 4 %). La valeur moyenne du module de classement (Gm) des matériaux pouzzolaniques étudiés est de 2,5 > à 1,5, minimum recommandé pour une utilisation en construction routière (Charman, 1988 ; Bello et Osinubi, 2010).

Caractéristiques de compactage

Paramètres Proctor

Les résultats de l'essai Proctor modifié fournissent les valeurs caractéristiques de paramètres de compactage des matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya, que sont la teneur en eau optimale (TE-OPM) et la densité sèche maximale (DSM). La valeur moyenne de la teneur en eau à l'optimum Proctor modifié (TE – OPM) des matériaux pouzzolaniques étudiés est de 18,04 %. Cette valeur moyenne est similaire à celle obtenue au Cameroun (18,20 %) (Lobe Bille et al., 2022), supérieure à celle obtenue au Madagascar (14,5 %) (Halifa, 2020) et en Tanzanie (14,5 %) (Chengula et Mkeni, 2021) mais inférieure à celles obtenues en Ethiopie (25,19 %) (Berhanu, 2009) et (22,18 %) (Teshome, 2015) (Fig. 11). La valeur moyenne de la densité sèche maximale (DSM = 1,23) de pouzzolaniques de Kanyaruchinya est faible. La faible

valeur de ce paramètre serait due à la structure vacuolaire et scoriacée de ces matériaux (CEBTP, 1984 ; ISTED, 1987). Cependant, cette faible valeur de densité sèche maximale n'est pas un critère qui doit les faire rejeter en construction routière, car pour pallier à cette lacune, il faudra juste apporter une énergie de compactage supérieure à celle obtenue sur les matériaux traditionnels lors de la mise en œuvre (CEBTP, 1984 ; ISTED, 1987). Ce surcroît d'énergie permettra d'assurer une fragmentation des éléments qui va alors améliorer la granulométrie et par effet même, la compacité de ces matériaux. Cette valeur moyenne de densité sèche maximale de matériaux étudiés est inférieure à celles obtenues sur les pouzzolanes de l'Ethiopie (1,26 ; 1,35) (Berhanu, 2009 ; Teshome, 2015), de Madagascar (1,66) (Halifa, 2020) et du Cameroun (1,50) (Lobe Bille et al., 2022) (Fig. 12).

Essai CBR

Les matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya se répartissent en deux classes de portance CBR à savoir S4 et S5. La valeur moyenne de l'indice portant CBR à 95 % OPM de ces matériaux est de 31 %. La valeur moyenne de l'indice portant CBR de matériau pouzzolanique étudié est comprise dans la fourchette de celles signalées en Ethiopie (38,5 %) (Berhanu, 2009) et (59 %) (Teshome, 2015), au Madagascar (33,46 %) et au Cameroun (36 %) (Lobe Bille et al., 2022) (Fig. 13).

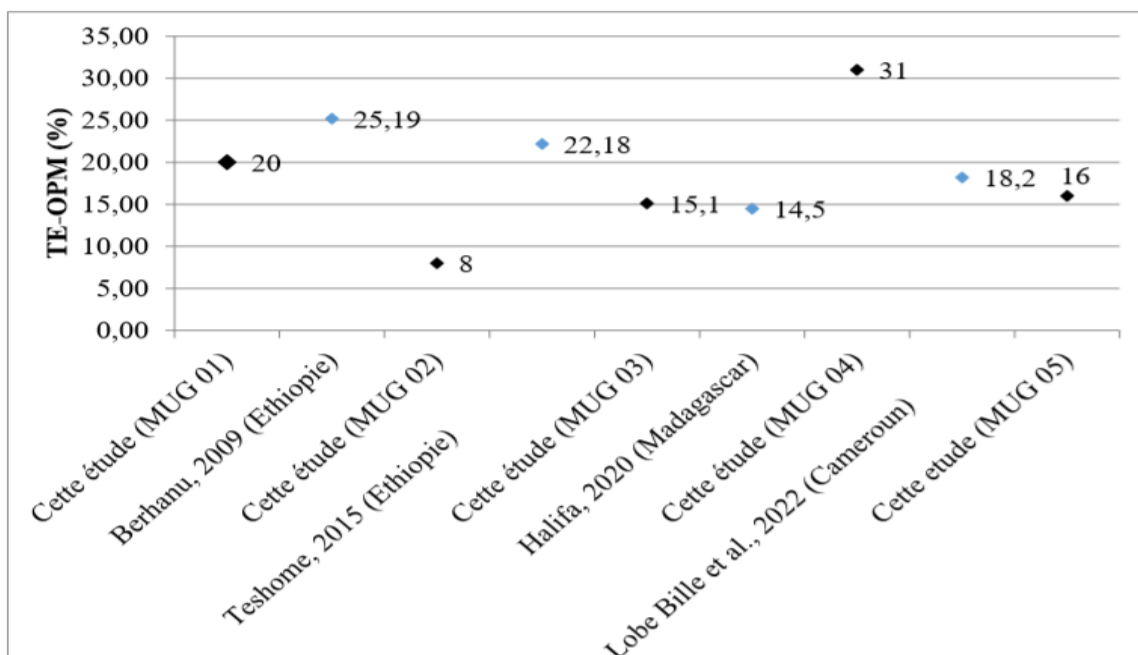


Figure 11. Comparaison des valeurs de TE – OPM avec celles des travaux antérieurs

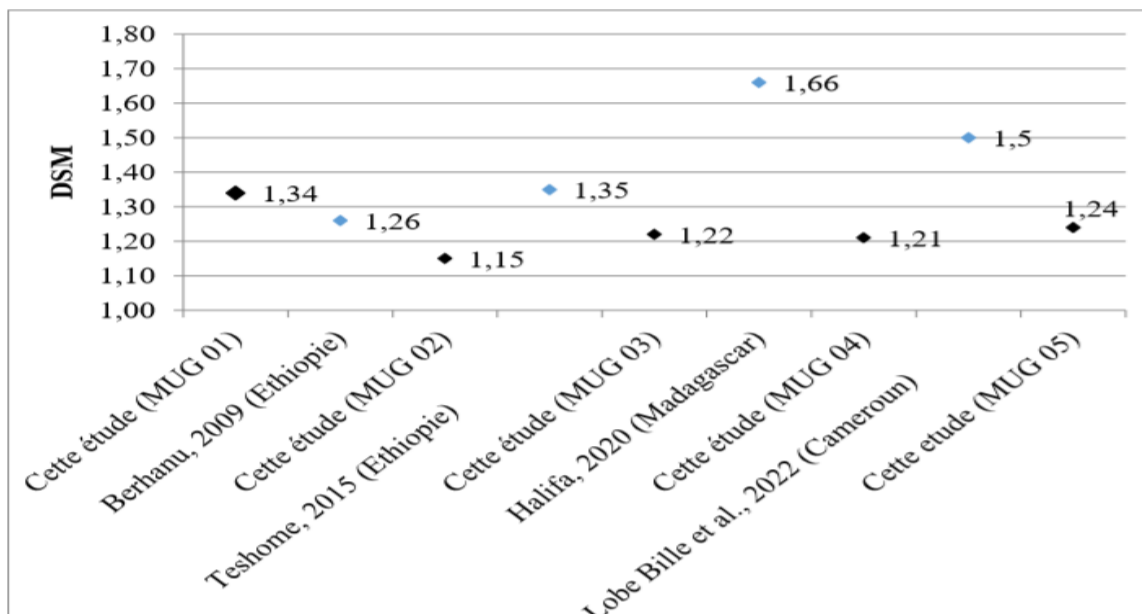


Figure 12 : Comparaison des valeurs de DSM avec celles des travaux antérieurs

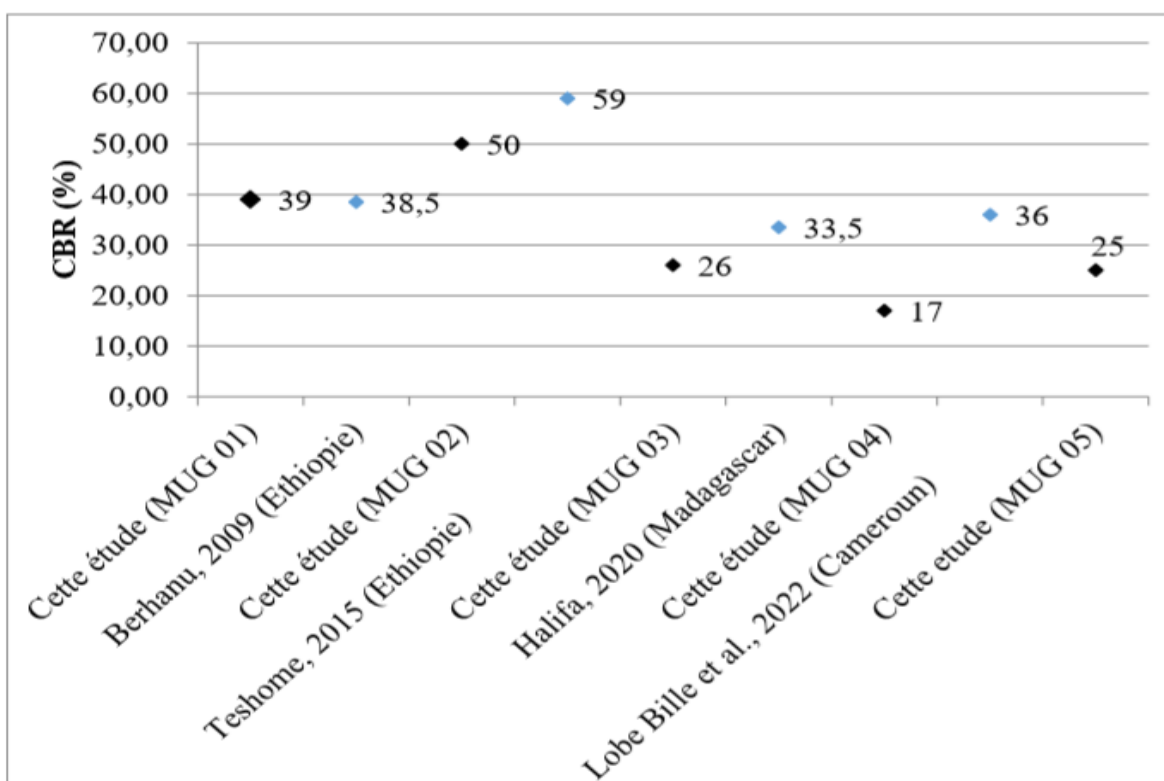


Figure 13 : Comparaison des valeurs de CBR avec celles des travaux antérieurs

Intérêts des matériaux en construction routière

Les matériaux utilisés en couche de chaussées ont de faibles performances si leur poids volumique des grains solides est inférieur à $2,75 \text{ gf/cm}^3$ et, d'excellentes performances, si la valeur de ce paramètre est supérieure ou égale à $2,85 \text{ gf/cm}^3$ (De Graft Johnson et al., 1972 ; Nwaiwu et al., 2006 ; Paige – Green et al., 2015). Les matériaux pouzzolaniques de Kanyaruchinya ont une valeur moyenne de poids volumique des grains solides ($2,00 \text{ gf/cm}^3$) inférieure à $2,75 \text{ gf/cm}^3$.

Ces matériaux présentent donc de faibles performances en construction routière. D'une façon globale, les pouzzolanes de Kanyaruchinya s'insèrent partiellement dans le fuseau de spécification pour la couche de fondation. Une correction granulométrique est nécessaire pour leur utilisation dans le corps de chaussées. L'ajout d'un matériau à granulométrie fine serait indiqué. Les paramètres dérivés servent à quantifier l'influence de la plasticité des fines sur la performance générale du matériau, qui dépend de la proportion et de la nature de celles-ci (Charmon, 1988 ; Bello et Osinubi, 2010). La valeur moyenne du module de classement (Gm) des pouzzolanes de Kanyaruchinya est de 2,50. Pour une utilisation en couche de base des chaussées à faibles trafic, la valeur de Gm doit être supérieure ou égale à 1,5 (Charman, 1988 ; Nwaiwu et al., 2006). Les matériaux pouzzolaniques étudiés sont donc utilisables en couche de fondation pour tout type de trafic et en couche de base pour les chaussées à faible trafic, sous réserve des caractéristiques de compactage, notamment la portance CBR. La valeur moyenne de densité sèche maximale (DSM) des matériaux étudiés (1,23) est inférieure à 1,80, minimum requis pour une utilisation en couche de fondation (CEBTP, 1984). La faible valeur de ce paramètre est due à la structure vacuolaire et scoriacée de ces matériaux. La valeur moyenne de portance CBR de ces matériaux pouzzolaniques (31 %) est inférieure à 35 %. Ces matériaux peuvent donc être utilisés en couche de fondation pour les chaussées à faible trafic (T1 – T2), malgré leurs valeurs de densité sèche (DSM) inférieure à 1,80. Cette utilisation en couche de fondation est confirmée par leur diamètre maximal des grains inférieurs à 60 mm. L'optimisation de leur utilisation en couche de fondation pour tout type de trafic et en couche de base nécessite une amélioration par ajout d'un matériau à granulométrie fine et à forte densité comme le sable argileux, l'argile sableuse, l'argile latéritique, etc. Cependant, une énergie de compactage supérieure à celle obtenue pour les matériaux traditionnels est nécessaire pour la mise en œuvre de ces matériaux à l'état naturel.

CONCLUSION

A partir de la présente étude, l'évaluation des caractéristiques géotechniques de Pouzzolanes de Kanyaruchinya a été faite dans la zone subsaharienne (R.D. Congo). Les pouzzolanes étudiées, rencontrées dans un immense gisement volcanique, sont meubles et poreuses, de couleur rouge brique à brun foncé, jaune et noire avec une structure vacuolaire et scoriacée. Les matériaux étudiés sont moins fins et non plastiques avec un diamètre maximal de grains inférieur à 60 mm. Ils peuvent être utilisés dans la construction routière sans risque de ségrégation. La valeur moyenne de densité sèche maximale (DSM) des Pouzzolanes de Kanyaruchinya est inférieure à 1,80, minimum requis pour une utilisation en couche de fondation. Une énergie de compactage supérieure à celle obtenue pour les matériaux

traditionnels est nécessaire pour la mise en œuvre de ces matériaux à l'état naturel. La valeur moyenne de l'indice portant CBR des pouzzolanes de Kanyaruchinya est de 31 %. Ces matériaux peuvent être utilisés en couche de fondation pour des faibles trafics T1 – T2.

Bibliographie

- AFNOR (1991) Norme française NF P94–061-2 : Sols : reconnaissance et essais – Détermination de la masse volumique des particules solides des sols – Méthode du pycnomètre à eau. Association Française de Normalisation, Paris.
- AFNOR (1993) Norme française NF P98–051, Sols : reconnaissance et essais, Détermination des limites d'Atterberg, Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau. Association Française de Normalisation, Paris.
- AFNOR (1995) Norme française NF P94–050 : Sols : reconnaissance et essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux – Méthode par étuvage. Association Française de Normalisation, Paris.
- AFNOR (1996) Norme française NF P98–056 : Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique Méthode par tamisage à sec après lavage. Association Française de Normalisation, Paris.
- AFNOR (1997) Norme française NF P94–078 Sols : reconnaissance et essais, Indice CBR après immersion – Indice CBR immédiat – Indice Portant Immédiat. Association Française de Normalisation, Paris.
- AFNOR (1998) Norme française NF P94 – 068 Sols : reconnaissance et essais : Mesure de la capacité d'absorption 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
- AFNOR (1999) Norme française NF P94–093, Sols : reconnaissance et essais, Détermination des références de compactage d'un matériau, Essai Proctor normal – Essai Proctor modifié.
- Alexander LT, Cady JG (1962) Genesis and Hardening of Laterite in soils. Technical Bulletin N°.1282,103.
- Autret P (1980) Latérites et Graveleux latéritiques. ISTED – LCPC, 1 – 42.
- Badriyo A, Chazot G, Kamgang P (2021) Pure forsterite in Nyiragongo lavas: evidence for subsolidus oxidation of volcanic rocks. *Acta Geochim.* 10.1007/s 11631 – 021 – 00513.
- Barenbold F, Boehrer B, rillir R, Mugisha A, Von Tumpling W, Umutoni A, Schmid M (2020) No increasing risk of a limnic eruption at Lake Kivu: inter comparison study reveals gas concentrations close to steady state. *Plos one* 15(8): e 0237836.
- Bello AA, Osinubi KJ (2010) Attenuative capacity of compacted three reddish brown tropical soils. *Continental journal of Engineering and Sciences* 5(2), 39 – 54.
- Berhanu G (2009) Stabilizing gravels for heavily trafficked base course. *EEA.Vol. 26.*
- Berniers R (2008) La pouzzolane, Roche à tout faire. *Mines et carrières, Revue de la Sim*, 5p.
- Burnotte JL (1952) Les sols du Kivu : les sols de cendrées volcaniques. *Com.Nat. Kivu.n° II. Sér.3*, 69.
- Cazenave-Piarrot A, Ndayirukiye S, Valton C (2015) Atlas des pays du Nord-Tanganyika. Marseille, IRD Editions, 144.

Published by the European Centre for Research Training and Development UK

- CEBTP (1984) Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. Centre d'expertise du Bâtiment et des travaux publics, Saint – Rémy – les – Chevreuse, (France), 155.
- Charman JH (1988) Laterite in road pavements. Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), Special Publication 47, Westminster – London, 71.
- Chengula DH, Mnkeni JK (2021) Improving Properties of Cinder Blended Materials for Construction of Low Volume Roads in Mbeya Region Tanzania. American Journal of Construction and Building Materials. Vol. 5, n°. 1. 22 – 31.
- Chevin P (1984) Utilisation des matériaux volcaniques de la Réunion en technique routière. Rapport CEBTP
- Chevin P (1988) Recherche des propriétés physiques et mécaniques de la pouzzolane en vue de la fabrication de bétons légers. Rapport CEBTP, Lab. De la Reunion, (France).
- Davis RE (1950) « A review of pozzolanic materials and their use in concretes », symp. on pozzolanic materials in Mortars and concretes, ASTM STP – 99, 3 – 15p.
- Denaeyer ME (1952) Mission géologique de l'office des cités africaines. Mém. Master. Section des Sciences techniques. Inst. Royal colonial belge, 259.
- Denaeyer ME (1972) Les laves du fossé tectonique de l'Afrique centrale (Kivu, Rwanda, Toro - Ankore) I. Supplément au recueil d'analyse de 1965. II. Magmatologie. III. Magmatogenese. Ann. Mus. roy. Afr. Centr. in 8,sc.géol.72,XII,134.
- Dron R (1975) Les pouzzolanes et la pouzzolanité. Revue des matériaux de construction, n° 692, janvier – février 1975, 27 – 30.
- Fournier M, Geoffray JM (1978) Le liant pouzzolane – chaux. Bull. Liaison labo. P. et Ch., n° 93, 70 – 77.
- Furiant V, Houst Y (1980) Les matériaux pouzzolaniques et leurs utilisations. Laboratoire des matériaux pierreux de l'EPF, Lausanne, chronique LMP.
- Halifa TA (2020) Influence des propriétés chimiques des pouzzolanes sur leurs caractères géotechniques dans la zone Ouest de l'île de Ngazidja. Mém. Master. FS. Sci., univ. D'Antananarivo, 119.
- Hammond AA (1983) « Pozzolana cements for low cost housing », Appropriate Building Materials for low cost Housing, produc. Symp. Nairobi, Kenya, E et F.N. Spon, New York, 73 – 83.
- Harichane K, Ghrici M (2011) Effet de la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur le compactage et la résistance des sols mous argileux. INVAC. N°.20 – 154.
- ISTED (1987) Les matériaux volcaniques : utilisation en technique routière. Synthèses, Paris (France), 84.
- Lebrun J (1937-1938) Etude sur la flore et la végétation des champs de lave au nord du lac Kivu (Congo Belge).
- Lebrun J (1942) La végétation du Nyiragongo. Inst. Parcs Nationaux du Congo oriental. INEAC., Série Scientifique n°1 :9-38.

- Lobe Bille JF, Ngo'o ze A, Onana LV, Ekodeck GE (2022) Effects of pozzolana addition and geogrid reinforcement of lateritic clays in the sub – Saharan zone (West Cameroon): implications for road construction.
- Lyon Associates (1971) Laterite and lateritic soils and other problem soils of Africa. Inc. Baltimore Maryland, USA Building and Road Institute, 64 – 140.
- Massari M (1987) Détermination des capacités épuratoires des sols de la Réunion vis-à-vis des polluants chimiques et bactériologiques. Ecole Nat. Sup. des Tech. Indus. Et des Mines d'Ales. Centre d'Anal. Chim. De Génie de l'Environ. Indus. Et d'énerg, décembre 1987.
- Massaza (1976) Chimie des additions pouzzolaniques et ciments mélangés. Memento, 73, vol 1, 3 – 38.
- Millogo Y (2008) Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuse et latéritique du Burkina Faso améliorées aux liants hydrauliques : application au génie civil (bâtiment et route). Thèse Doctorat, Université d'Ouagadougou (Burkina Faso), 144.
- Nwaiwu CMO, Alkali IBK, Amed UA (2006) Properties of ironstone lateritic gravels in relation to gravel road pavement construction. Geotechnical and Geological Engineering 24, 283 – 284.
- Paige – Geen P, Pinard M, Netterberg F (2015) A review of specifications for lateritic materials for low volume roads. Transportation Geotechnics 5, 86 – 98.
- Poucllet A (2021) Nyiragongo and Nyamulagira: a review of volcanic activity in the Kivu rift, western branch of the East African rift system. Bull volc 83: 10.1007/S00445 - 01435 – 6.
- Rasamoela MF (2009) Caractéristiques géotechnique et chimique des pouzzolanes dans la région de Betafo. Mém. Master. Depart. Géologie, univ. Antananarivo.
- Robitaille V (1997) Mécanique des sols : théorie et pratique. ISBN 2 – 89113 – 658 – 6.
- Rocher Ph (1992) Memento Roche et minéraux industriels : Ponces et Pouzzolanes. Rapport BRGM R 36447 SGN/GEO – 92, France, 47.
- Rocher Ph (2012) La pouzzolane : fiche détaillée. BRGM 1 – 5p.
- Ross K, Gashugi E, Gafasi E, Wuest A, Schmid M (2015) Characterisation of the subaquatic groundwater discharge that maintains the permanent stratification within Lake Kivu; East Africa. Plos one 10(3): e 01212717. doi:10. 1371/journal.
- Scholer CH, Peyton RL (1949) “Experience with pouzzolanic material in Kansas”, Symp. on use of Pozzolanic materials in Mortars and concretes, ASTM Spec. Techn. Pub. 99.
- SETRA et LCPC (1979) La technique française des assises de chaussées aux liants hydrauliques et pouzzolaniques. Dossier d'information. Ministère des transports, 31.
- Smets B, Delvaux D, Ross KA, Poppe S, Kervyn M, D'oreye N, Kervyn F (2016) The role of inherited crustal structures and magmatism in the development of rift segments : Insights from the Kivu basin, western branch of the East African Rift. Tectonophysics 683. 62 – 76.
- SNPP et DRIRE (1988) La Pouzzolane : l'avenir en projection. Plaquette d'information, Syndicat national des producteurs de Pouzzolane et Drire. Auvergne, 9.
- Teshome TH (2015) The use of Natural Pozzolana (volcanic Ash) to stabilize cinder Gravel for a road Base. Th.Doc.univ. Addis Ababa university, 110p.

Published by the European Centre for Research Training and Development UK

- Thibaut PM, Rançon J. Ph, Rossif (2001) Evaluation des ressources et potentiel de valorisation des matériaux pouzzolaniques de la Réunion. BRGM /RP – 50865 – FR.
- Uweri ring (2014) The East African Rift System. Austrian journal of earth sciences. Vol.107/1/132 – 146.
- Zuang H (1979) Les substrats en cultures sans sol : caractéristiques générales. Document INVUFLEC, n° 418/ 30, 28.