

Evolution de la portance de sols d'assise latéritiques de chaussées soumis à des sollicitations climatiques cycliques.

Konaté Abdoulaye^{1,3}, Rosin-Paumier Sandrine², Sidibé Diaka³, Mechling Jean-Michel¹

¹ Université de Lorraine, CNRS, IJL, F-54000 Nancy, France

² Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France

³ ISMGB, Laboratoire LRA, Conakry, Guinée

RESUME

Les chaussées en Guinée sont sujet à des dégradations récurrentes et n'atteignent le plus souvent pas la durée de vie espérée. Face aux importantes sollicitations climatiques cycliques (saison sèche - saison pluvieuse), ces désordres pourraient provenir d'une évolution de la portance des sols d'assise de ces chaussées, constitués majoritairement de sols latéritiques. Deux latérites prélevées à Guéckédou (G) sur la route nationale N°1 (RN1) et à Dabola (D) sur la route nationale N°2 (RN2) ont été étudiées en laboratoire en vue de déterminer leurs comportements mécaniques. La détermination des caractéristiques géotechniques (la granulométrie, l'argilosité, la masse volumique des solides, la densité) a permis de les classer dans le GTR à la classe F1m, classe des sols fins (sable fin argileux, limon ou argile peu plastiques). En second lieu, des essais de compactage ont conduit à définir les masses volumiques sèches et les teneurs en eau à l'optimum Proctor normal à 1,67 g/cm³ et 18% pour G ; 1,78 g/cm³ et 16% pour D. Enfin, des éprouvettes compactées à l'optimum Proctor normal ont été soumises à 1, 2 ou 4 cycles de séchage-immersion pour simuler les conditions climatiques des régions tropicales. Les poinçonnements CBR effectués à la fin de chaque cycle montrent une diminution de la portance après le premier cycle de séchage-humidification mais qui tend ensuite vers une stabilisation.

Mots-clés : latérite, portance, sol support, durabilité, chaussée.

I. INTRODUCTION

La problématique des routes demeure un enjeu capital dans le processus de développement des pays africains au sud du Sahara. Malgré l'évolution de la science et des méthodes de mise en œuvre de ces infrastructures, force est de reconnaître que de nombreux pays africains de la zone intertropicale sont confrontés à des problèmes de dégradation des chaussées. L'élément commun de ces pays est la présence de latérites sous les infrastructures routières voir en couche d'assise des chaussées. Malgré les études déjà disponibles sur ces matériaux, leur comportement hydromécanique reste difficile à prévoir, tant la diversité des latérites est importante.

Des pays comme l'Inde, l'Australie ou encore le Brésil sont des pays dans lesquels la présence de latérites est tout aussi importante mais ils sont paradoxalement peu confrontés à ces problèmes de

dégradation récurrente des chaussées et c'est aussi une raison de plus pour se concentrer sur le cas africain. La poursuite et l'approfondissement des connaissances sur ce matériau en Afrique revêt une importance stratégique majeure.

La Guinée comporte de nombreux sols latéritiques sur tout son territoire qui se répartissent au sein de quatre régions naturelles des particularités géographiques et géologiques : la Basse-Guinée, la Moyenne-Guinée, la Haute-Guinée et la Guinée Forestière. Elle jouit d'un climat tropical humide caractérisé par l'alternance de deux saisons : la saison sèche de novembre à mai durant laquelle sévit le harmattan, un vent chaud et sec et la saison pluvieuse de mai à novembre, régie par la mousson ouest-africaine, un vent frais et humide. L'étude de Sidibé et al. (2022) a mis en évidence un problème de portance évolutive du sol support soumis à des sollicitations climatiques cycliques.

Les latérites sont les dépôts de surface les plus fréquents dans les régions tropicales et subtropicales (Fermor, 1911). Développées par une altération intensive et durable de la roche mère sous-jacente, les latérites sont enrichies en fer et en aluminium (Sivarajasingham et al., 1962). La revue bibliographique de Issiakou (2016) permet de caractériser les sols latéritiques au sens géotechnique comme des sols meubles, de granulométrie 0/20 à 0/40 mm comportant 10 à 35 % de fines (infra 80 μm) et 20 à 60% de fraction grenue (infra 425 μm). Les propriétés géotechniques des sols latéritiques présentent des variations significatives indépendamment de leur origine (Kumar, 2022 ; Grehoa, 2023) : la limite de liquidité peut varier entre 5% et 75,8% ; la limite de plasticité entre 12% et 48%, la masse volumique des solides varie de 2,50 à 3,02 g/cm³.

D'un point de vue géotechnique, les latérites guinéennes sont décrites comme des sols meubles sableux à graveleux plus grossier que la moyenne avec 30 à 80% de fraction grenue (de 2 à 40 mm) (Mamedov *et al.*, 2011 ; Ndiaye, 2013 ; Biswal et al., 2016 ; Sidibé *et al.*, 2022). Les tailles intermédiaires (80 μm -2mm) sont peu présentes, ce qui rend difficile la réalisation et l'interprétation de certains essais de caractérisation tels que, par exemple, les limites d'Atterberg pratiquées sur la fraction 0-400 μm . L'indice de plasticité se situe en général entre 10 et 35 (Bagarre, 1990) et la valeur de bleu de méthylène est généralement supérieure à 1,5g/100g. Ces deux informations renseignent sur l'argilosité de ces sols (Ndiaye, 2013). La fraction grenue des latérites présente des duretés variables en fonction notamment de la composition chimique de la roche mère (Ndiaye, 2013 ; Sidibé et al. 2022).

La création d'une route nécessite le dimensionnement d'une couche de forme située immédiatement sous la chaussée et ses accotements. La plateforme support de chaussée (PF) se situe à l'interface entre la chaussée et la couche de forme, son classement dépend de sa capacité portante et de ses caractéristiques mécaniques telles que définies dans le Guide des Travaux Routiers (CFTR, 2007). Les plateformes utilisées pour des charges légères (nommées PF1) présentent un module de déformation inférieur à 50 MPa. Dans le cas de charges modérées à lourdes, ce module doit être compris entre 50 et 120 MPa (PF2). Les catégories PF3 et PF4 sont destinées au support de charges lourdes ou aux conditions exigeantes, elles nécessitent des modules de déformation jusqu'à 200 MPa (PF3) voir au-delà (PF4). Ces classifications permettent de déterminer la plateforme la plus appropriée pour chaque projet routier en fonction des charges prévues et des conditions géotechniques.

Sous la couche de forme, la Partie Supérieure des Terrassements (PST), d'une épaisseur d'environ 1 m, peut-être simplement le sol naturel lorsque l'ouvrage est réalisé en déblai ou un matériau

rapporté lorsque la section est réalisée en remblai. L'essai CBR est utilisé pour évaluer la résistance et la portance des sols à un état de compactage donné (masse volumique sèche et teneur en eau donnée). Un indice CBR inférieur à 2% est insuffisant pour la construction (PST 0), jusqu'à 5% le sol est dit faible (PST 1) puis qualifié de moyen (PST2). A partir de 10 % le matériau est qualifié de moyen à bon (PST3) puis bon à partir de 15% (PST 4). Les très bons et excellents sols présentent des CBR respectivement supérieurs à 25 % (PST5) et 50% (PST6). Ces valeurs de CBR permettent de choisir les traitements et les améliorations nécessaires pour garantir une base de chaussée stable et durable.

Les sols latéritiques sont utilisés comme PST (Tockol, 1993 ; Quadri et al., 2012 ; Mbemge, 2023), mais des adaptations particulières sont souvent nécessaires afin de palier à un manque de portance susceptible d'entraîner des déformations au sein des différentes couches d'une structure routière (Issiakou, 2016 ; Ademila *et al.*, 2017 ; Savadogo et al. 2024). La portance d'un sol dépend de ses caractéristiques d'état mais également de sa résistance au cisaillement, susceptibles de varier d'une latérite à une autre.

Le degré de saturation des sols supports de chaussées sont susceptibles de varier, compte tenu des aléas des conditions hydriques et de mise en œuvre (AFNOR, 1997 NF P94-078). La présence d'eau tient en ce sens un rôle important dans l'accélération de la dégradation de la structure routière (CFTR, 2007). La mise en œuvre de ces matériaux sensibles à l'eau demande donc des précautions particulières. En période humide, leur portance est quasi-nulle ; en période sèche, leur portance est très bonne. La durabilité d'une route réalisée sur, ou avec, des matériaux latéritiques dépend alors directement de la période de sa réalisation et de sa situation dans le projet (déblai, remblai, drainage...) (Sidibé et al., 2022).

L'utilisation des sols en remblai est liée à leur classification géotechnique, et l'objectif de cette étude est d'étudier le comportement mécanique de deux sols latéritiques typiques de Guinée sous l'action du climat tropical humide. Les matériaux, prélevés in situ sont soumis à des essais de caractérisation géotechniques et minéralogiques, puis un état de compactage expérimental a été choisi sur la base des résultats de trois essais Proctor normal. Ensuite, afin de répondre à l'objectif de quantifier l'effet d'une succession de cycles séchage-immersion sur les capacités de portance des matériaux, 1, 2 ou 4 cycles de séchage-humification sont appliqués aux éprouvettes. A la fin de chaque cycle, un poinçonnement CBR (California Bearing Ratio) est effectué à l'état quasi-saturé et à l'état sec et comparé aux indices initiaux afin de juger du comportement du sol.

III. METHODOLOGIE

Cette partie décrit l'ensemble des modes opératoires utilisés dans cette étude. Les résultats d'identification sont décrits en partie IV et les résultats des essais cycliques sont donnés en partie V

A. Sites de prélèvement

La présente étude se focalise sur deux sites de prélèvements de sols latéritiques supports de chaussée, prélevé sur la RN1 près de Guéckédou et sur la RN2 près de Dabola (Fig. 1). Dabola est situé au centre du pays entre la Moyenne-Guinée et la Haute-Guinée tandis que Guekedou est Guinée forestière. Les matériaux concernés ont été prélevés à proximité des routes nationales en

Guinée qui ont fait l'objet de dégradations poussées au cours de la dernière décennie. Les matériaux prélevés sont étalés, séchés à l'air libre plusieurs semaines au cours de la saison sèche puis homogénéisés et ensachés.

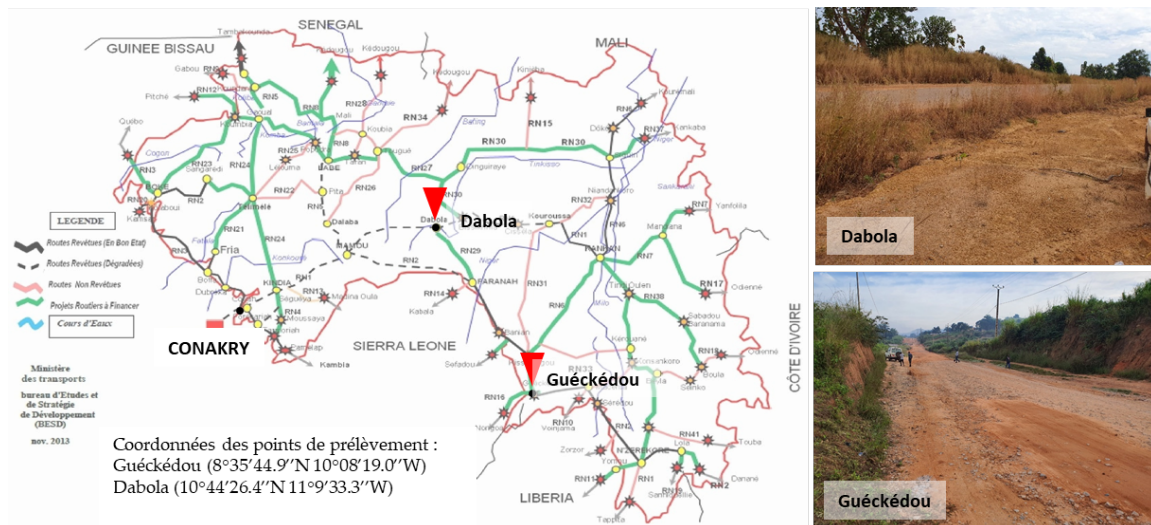


Figure 1. Localisation et aspects des sites de prélèvements près de Dabola (RN2) et de Guéckédou (RN1), modifié de Ministère des transports – BESD (nov. 2013).

B. Classification géotechnique des matériaux et détermination de l'état de compactage optimal

Pour chaque matériau, la teneur en eau naturelle et la masse volumique humide (AFNOR, 1993 NF X31-510) sont définis sur des agrégats intacts sélectionnés sur le terrain lors de l'échantillonnage. La masse volumique des solides a été déterminée avec un pycnomètre à hélium (NF EN ISO 17892-3) sur les matériaux secs préalablement porphyrisés au broyeur à anneaux.

Pour déterminer la classe géotechnique de nos deux matériaux, de nombreux essais d'identification ont été réalisés sur le matériau séché à l'air libre et homogénéisé. L'analyse granulométrique est réalisée par tamisage en phase humide selon la norme NF XP94-041. Les limites d'Atterberg sont définies par la méthode de la coupelle de Casagrande selon la norme ISO 17892-12. La différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité permet de définir l'indice de plasticité. La surface spécifique est définie en utilisant la valeur au bleu de méthylène (NF EN 17542-3).

B. Méthodes de caractérisation minéralogique des matériaux

Les deux matériaux ont été analysés par Diffraction des Rayons X, sur poudre grâce à un diffractomètre Brucker D8-Advance® équipé d'une anticathode au cuivre ($\text{CuK}\alpha$ $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$) en explorant les angles de diffraction (2θ) compris entre 5° (distance inter réticulaire correspondant aux argiles) et 70° . L'exploitation des diffractogrammes avec le logiciel Brucker EVA® a permis de définir la minéralogie de chaque matériau (partie IV.2).

C. Détermination de l'état de compactage optimum

Trois courbes de compactage Proctor normal sont réalisées pour chaque matériau selon la norme NF P94-093 afin de déterminer les paramètres de compactage optimaux. La masse volumique sèche maximale et la teneur en eau à l'optimum Proctor normal ont été retenus pour l'application des

cycles humidification-séchage. En vue des essais CBR, cinq éprouvettes ont été confectionnées à l'optimum Proctor normal pour chaque provenance de matériau. Les éprouvettes réalisées avec le matériau de Guékédou sont référencées Gx tandis que celles faites avec le matériau de Dabola sont référencées Dx .

Pour chaque éprouvette, environ 5 kg de matériau est tamisé à 5 mm et sa teneur en eau initiale est déterminée par séchage à 105°. La quantité d'eau nécessaire pour atteindre la teneur en eau optimale de compactage est ensuite ajoutée, puis le sol malaxé est clos hermétiquement pendant 24 heures afin d'atteindre une bonne homogénéisation. Le compactage est effectué dans un moule CBR de 151 mm de diamètre et 152 mm de hauteur, monté sur une embase et surmonté d'une rehausse. Un disque d'espacement de 25 mm est placé dans le moule ainsi qu'un papier filtre. L'éprouvette est compactée en trois couches successives de sol en appliquant 55 coups par couche de dame Proctor normale afin d'atteindre la masse volumique visée. Après retrait de la rehausse, la surface de l'éprouvette est soigneusement arasée. La teneur en eau initiale est vérifiée sur le matériau arasé.

D. Détermination des indices de portance

Les indices de portance sont des grandeurs utilisées pour caractériser les sols compactés dans le cadre de constructions routière. L'Indice Portant Immédiat (IPI) est mesuré à l'état de compactage Proctor normal. Il est généralement utilisé pour d'évaluer l'aptitude du sol pour supporter les engins de chantiers. L'essai normalisé (AFNOR, 1997) consiste à poinçonner le sol compacté avec un poinçon cylindrique en acier de $49,6 \pm 0,1$ mm à une vitesse de 1,27 mm/min. Au cours du poinçonnement, les forces à appliquer pour atteindre deux enfoncements conventionnels (2,5 mm et 5 mm) sont mesurés puis rapportés à l'enfoncement d'un matériau de référence pour les mêmes enfoncements (respectivement 13,35 kN et 19,93 kN). L'indice, exprimé en pourcentage par rapport à l'état de référence, correspond à la plus grande des deux valeurs obtenues.

L'indice CBR immédiat est réalisé sur une éprouvette compactée à l'état de compactage optimal et chargé. Dans cette étude, trois surcharges ont été utilisées pour atteindre 6833g. L'indice CBR immédiat rend compte de l'aptitude d'un sol compacté à soutenir la structure de chaussée et la circulation future. Pour les sols sensibles à l'eau, un essai appelé CBR immergé est réalisé après quatre jours d'immersion de la cellule afin de quantifier l'évolution de la portance à l'état supposé saturé.

Dans cette étude, les trois paramètres IPI, CBR immédiat et CBR immergé sont déterminés pour chaque sol après compactage. Des poinçonnements sont également réalisés sur des éprouvettes ayant subi l'application de cycles de séchage-immersion.

E. Application des cycles séchage-immersion

L'alternance climatique propre au climat tropical guinéen a été simulé par un essai accéléré de cycles de séchage-immersion. Des essais préliminaires ont été réalisés sur des éprouvettes compactées à l'optimum Proctor normal et placées en étuve à 60°C, 80°C et 110°C. L'éprouvette est supposée à l'équilibre lorsque deux pesées successives donnent des masses identiques. Les pesées régulières ont montré que le placement en étuve à 60°C ne permettait de réduire le degré de

saturation que de 30 points en 5 jours. Le séchage à 80°C est plus rapide mais seul le séchage à 110°C permettait d'atteindre un état proche de l'état sec en 3 jours, compatible avec les contraintes d'utilisation des enceintes. La réhumidification est plus lente. Lors de la réalisation des cycles, l'équilibre est supposé atteint lorsque deux pesées à 24 heures d'intervalle donnent les mêmes valeurs ou lorsque la teneur en eau initiale est atteinte.

Un diagramme représentant la succession des cycles et la position des poinçonnements pour chaque éprouvette est proposée en Figure 2. Trois éprouvettes sont préparées pour chaque matériau étudié (Guékédou et Dabola). Après compactage, les éprouvettes sont pesées (masse initiale), retournées et 3 surcharges représentant une masse totale de 6833 g sont placées sur chaque éprouvette. Les ensembles sont pesés puis introduits dans l'étuve à 105°C pour un premier séchage. L'évolution des masses des éprouvettes sont suivies par des pesées régulières jusqu'à atteindre l'état sec. L'évolution des masses est donnée en Fig.6. Un premier essai de poinçonnement CBR est effectué sur l'éprouvette 1 (CBR1 sec). Après poinçonnement, l'éprouvette est retournée, la platine et les surcharges repositionnées. Les ensembles sont alors immergés dans l'eau pour la seconde phase du cycle et suivis par des pesées régulières (Fig. 2). A l'issue de cette phase, un poinçonnement CBR est réalisé sur la face non sollicitée de l'éprouvette 1.

Les cycles se poursuivent pour les éprouvettes 2 et 3. Les poinçonnements sont réalisés à l'issue du second séchage (CBR2 sec) et de la seconde immersion (CBR2 immergé) pour l'éprouvette 2 et à l'issue du quatrième séchage (CBR4 sec) et de la quatrième immersion (CBR4 immergé) pour l'éprouvette 3 (Fig. 2). L'ensemble des résultats sont présentés en partie V.

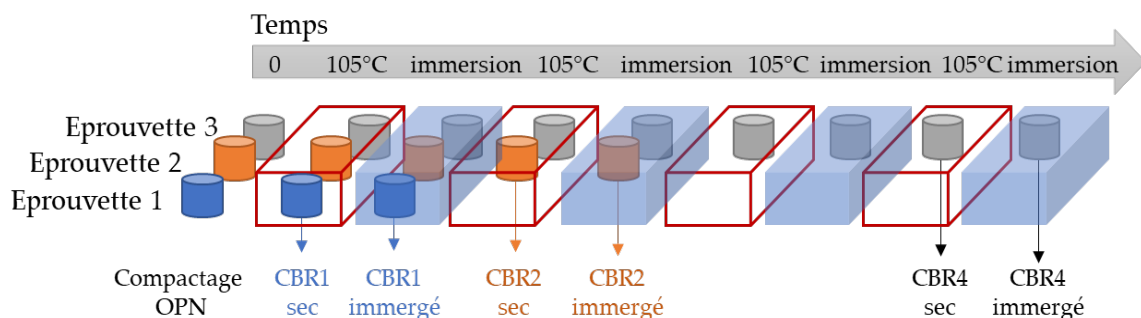


Figure 2. Diagramme représentant la succession des cycles de mouillage-séchage pour chaque éprouvette et la réalisation des poinçonnements CBR.

IV. CARACTERISATION PHYSIQUE ET MINERALOGIQUE DES SOLS

A. Granulométrie

Les analyses granulométriques des matériaux de Guékédou (G) et Dabola (D) sont représentés dans la figure suivante (Fig. 3). Elles indiquent des granulométries comparables bien que celle de Guékédou soit légèrement plus fine que celle de Dabola. En effet les D_{max} respectifs sont de 8mm (G) et 5 mm (D), avec un passant de 42 % à 63 μ m pour Guékédou et 48% pour Dabola. Dans les deux cas, les D_{max} sont largement inférieurs à 50mm et les proportions de fines (passant à 63 μ m)

sont élevées atteignant 48% pour Guéckédou et 42% pour Dabola. Ces sols sont finement granulés avec une forte proportion de grains très fins, ils appartiennent à la classe F des sols fins au sens du Guide des terrassements routiers (CFTR, 2007).

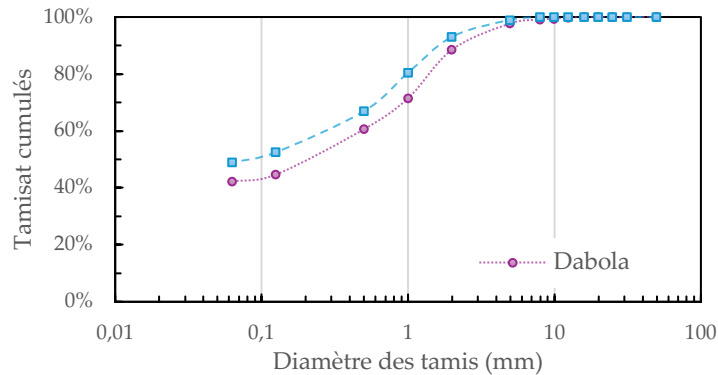


FIGURE 3. Courbes granulométriques de Guéckédou et Dabola

B. Minéralogie

Les deux clichés de diffraction sont représentés dans la figure suivante (Fig. 4). Les diffractogrammes indiquent la présence marquée du quartz et des feldspaths alcalins (microcline) qui proviennent des roches du substratum. Des argiles sont également présentes : de la kaolinite vraisemblablement mal cristallisée (évasement marqué des pics correspondants sur le diffractogramme) et de l'illite, uniquement présente dans l'échantillon prélevé à Guéckédou. De ce fait (plus de kaolinite et présence d'illite) le sol prélevé à Guéckédou serait le plus argileux.

D'autres phases sont possiblement présentes mais elles sont difficiles à mettre clairement en évidence du fait de pics qui ont du mal de se démarquer du bruit de fond des diffractogrammes, mais aussi en raison de pics qui coïncident avec certains autres des phases principales. On peut ainsi mentionner le possible (probable) présence de goéthite et d'hématite très mal cristallisées (bombement visible aux environ de $2\theta = 33^\circ$). De la gibbsite très mal cristallisée pourrait aussi correspondre au pic évasé détecté vers $2\theta = 37^\circ$). Un pic centré sur $2\theta = 28,6^\circ$ pourrait correspondre à la Pyrolusite sur l'échantillon de Guéckédou.

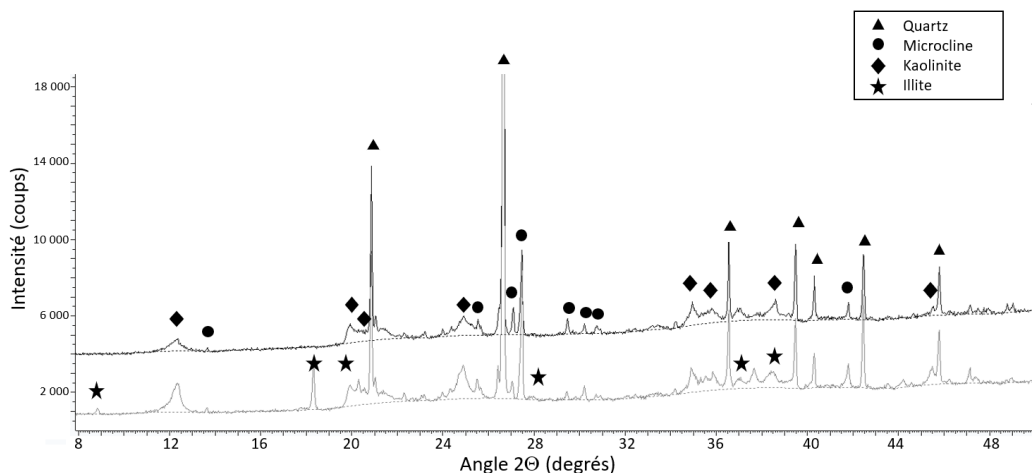


FIGURE 4. Diffractogrammes de rayons X obtenus sur les sols de Guéckédou (en bas) et Dabola (en haut)

C. Autre caractéristiques et classification

L'indice de plasticité correspond à la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité pour un sol donné. Cet indice caractérise l'argilosité de sols. Avec des valeurs de respectivement 21 et 22% pour Guéckédou et Dabola, ces sols sont moyennement argileux (Tab. 1).

Lors du prélèvement des matériaux sur site, deux prises d'essais de matériau ont été réalisées afin de déterminer la teneur en eau massique à l'état naturel sur site. Une valeur de 18,93% est atteinte pour Guéckédou (31 janvier 2023) et 11,13% pour Dabola (10 novembre 2022). Trois prélèvements de matériau non remanié ont également été réalisés pour le calcul des masses volumiques à la paraffine. A Guéckédou, les moyennes des valeurs obtenues permettent d'évaluer la masse volumique humide du matériau $\rho_h = 1,74 \text{ g/cm}^3$ pour une teneur en eau de 15,66%. Après séchage, la masse volumique sèche moyenne est de $\rho_d = 1,72 \text{ g/cm}^3$. Pour Dabola, les moyennes obtenues sont de $\rho_h = 1,83 \text{ g/cm}^3$ et $\rho_d = 1,79 \text{ g/cm}^3$ pour une teneur en eau de 7,12% à Dabola.

La valeur au bleu de méthylène notée V_{BS} , représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes du sol. La valeur de 0,8 g de bleu pour 100g de matériau sec pour Guéckédou et de 1,12 g/100g pour Dabola indique une sensibilité à l'eau des matériaux. Cependant, ces valeurs restent inférieures au seuil de 1,5 g/100g distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux. Les matériaux sont donc identifiés comme peu réactifs.

Les faibles valeurs de V_{BS} mènent à classer ces sols comme des sols de type F1, correspondant à des limons peu plastiques. Ces sols sont susceptibles de changer brutalement de consistance en fonction de leur teneur en eau. L'indice de plasticité est relativement élevé pour cette classe.

La masse volumique des grains solides, mesurée au pycnomètre à hélium, est de $2,60 \text{ g/cm}^3$ pour Guéckédou et de $2,67 \text{ g/cm}^3$ pour Dabola.

En comparaison avec les sols latéritiques de l'Afrique Sub-Saharienne décrits par Grehoa et al. (2023), les sols latéritiques étudiés présentent des limites de liquidité relativement élevées et des limites de plasticité cohérentes avec les valeurs publiées.

TABLEAU 1. Propriétés mesurées pour les matériaux de Guéckédou et de Dabola

Matériau	w in situ	W_L	W_P	I_P	VBS	$\rho_s \text{ g/cm}^3$	ρ_h in situ	ρ_d in situ
Guéckédou	18,93%	41%	20%	21	0,8 g/100g	$2,6043 \pm$ 0,0017	1,74 g/cm ³	1,72 g/cm ³
Dabola	11,13%	37%	15%	22	1,12 g/100g	$2,6675 \pm$ 0,0021	1,83 g/cm ³	1,79 g/cm ³

V. Propriétés mécaniques

A. Caractéristiques de compactage

Trois essais de compactage sont réalisés avec l'énergie Proctor normal pour chaque sol permettent de tracer les courbes de compactage (Fig. 5). Les valeurs à l'optimum Proctor Normal (OPN) sont relativement proches pour les deux matériaux de notre étude avec respectivement des teneurs en eau optimales de 18% (Guéckédou) et 16% (Dabola), et des masses volumiques sèches maximales de $1,67 \text{ g/cm}^3$ (Guéckédou) et $1,78 \text{ g/cm}^3$ (Dabola). La compacité légèrement plus faible du sol de

Guékédou pourrait être attribuée à sa texture plus fine et plus argileuse selon les analyses minéralogiques. Les masses volumiques sèches atteintes à l'OPN sont très proches de celles obtenues à l'état naturel par prélèvement in situ, pour rappel $1,72 \text{ g/cm}^3$ à Guékédou et $\rho_d = 1,79 \text{ g/cm}^3$ à Dabola (Tableau 1).

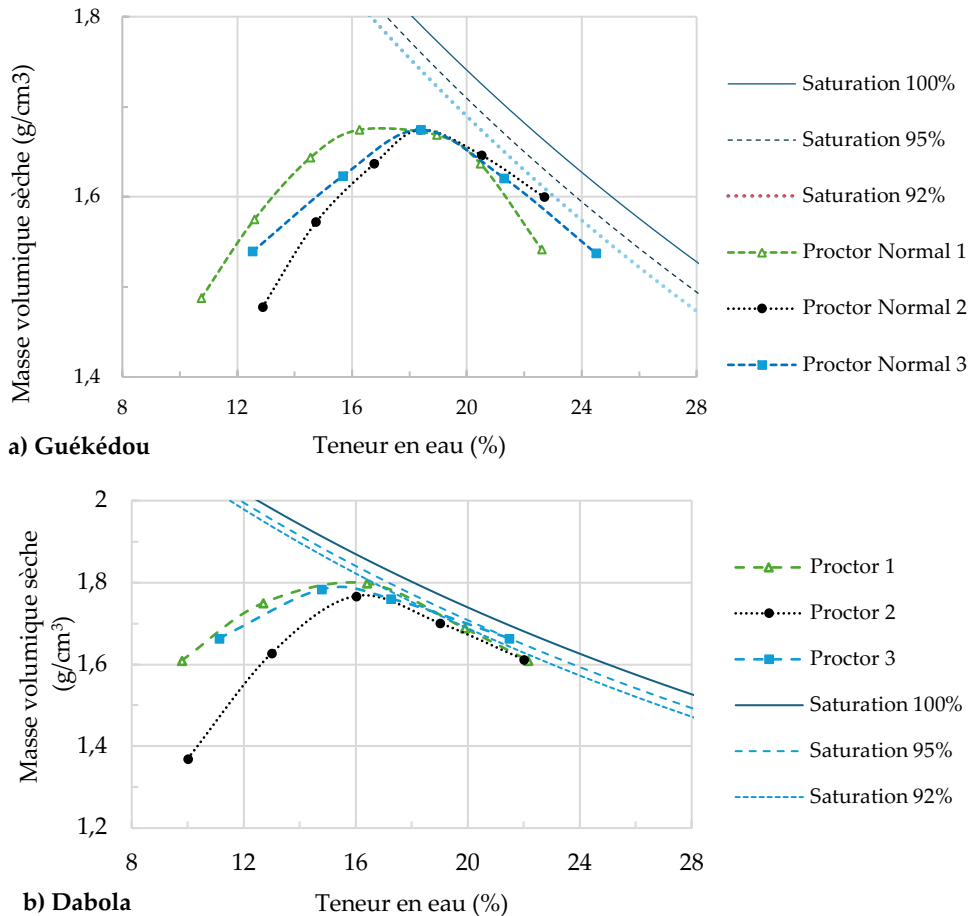


FIGURE 5. Courbes de compactage Proctor Normal pour a) Guékédou et b) Dabola

B. Indices IPI et CBR

L'indice de portance immédiat (IPI) exprime la valeur du poinçonnement CBR mesurée sans surcharge ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'optimum Proctor Normal (Tab. 2). La valeur de 10, atteinte sur le matériau de Guékédou, correspond à un sol relativement meuble et peu stable. Ce type de sol nécessite souvent des mesures de renforcement ou de stabilisation si l'on souhaite le rendre constructible ou y faire circuler des engins lourds. C'est particulièrement le cas des routes guinéennes sur lesquelles circulent de gros porteurs transportant fréquemment des denrées agricoles et des minerais. A Dabola, l'IPI de 7 indique une capacité portante modérée, qui peut être acceptable pour des constructions légères ou des activités temporaires. Cependant des précautions supplémentaires de renforcement du sol doivent être envisagées si des charges importantes sont appliquées. Ces valeurs IPI permettent de classer ces matériaux dans la classe F1m (CFT, 2007).

TABLEAU 2. Indices portants des sols de Guéckédou et Dabola

Matériau	Guéckédou	Dabola
IPI (%)	10,0	7,3
CBR immédiat (%)	11,3	8,5
CBR initial immergé (%)	11,5	7,8

Une seconde éprouvette permet de définir le CBR immédiat et le CBR immergé sous trois surcharges représentant une masse totale de 6833 g. La valeur CBR immédiat est obtenu après compactage et chargement tandis que la valeur CBR initial immergé est réalisée après 4 jours d'immersion afin d'évaluer la sensibilité à l'eau de l'éprouvette. En ce qui concerne les indices CBR immédiat, Guéckédou présente un indice de 11,3% correspondant à la classe PST 3, sol moyen à bon, ce qui suggère une capacité portante modérée du sol. Cela signifie que ce type de sol peut supporter des charges raisonnables sans subir de déformation significative. L'indice n'évolue pas suite à l'immersion ce qui suppose une faible sensibilité à l'eau. Le sol de Dabola en revanche présente un CBR immédiat de seulement 8,5 % qui diminue à 7,8 % en cas d'immersion. Ce sol compacté à l'optimum Proctor est de classe PST2, un sol moyen, qui peut être suffisant pour supporter des charges légères, mais impropre aux constructions pesantes et aux infrastructures permanentes comme les routes.

VI. ESSAIS CYCLIQUES

Les masses des éprouvettes sont suivies régulièrement par pesée au cours des cycles (Fig. 6). Les durées des paliers de séchage et de réhumidifications changent en fonction des mesures obtenues. Les paliers de séchage à 105°C durent au minimum 3 jours et les paliers de réhumidifications par immersion dans l'eau durent au minimum 5 jours. La Fig. 6 montre une bonne reproductibilité des masses obtenues à la fin des paliers.

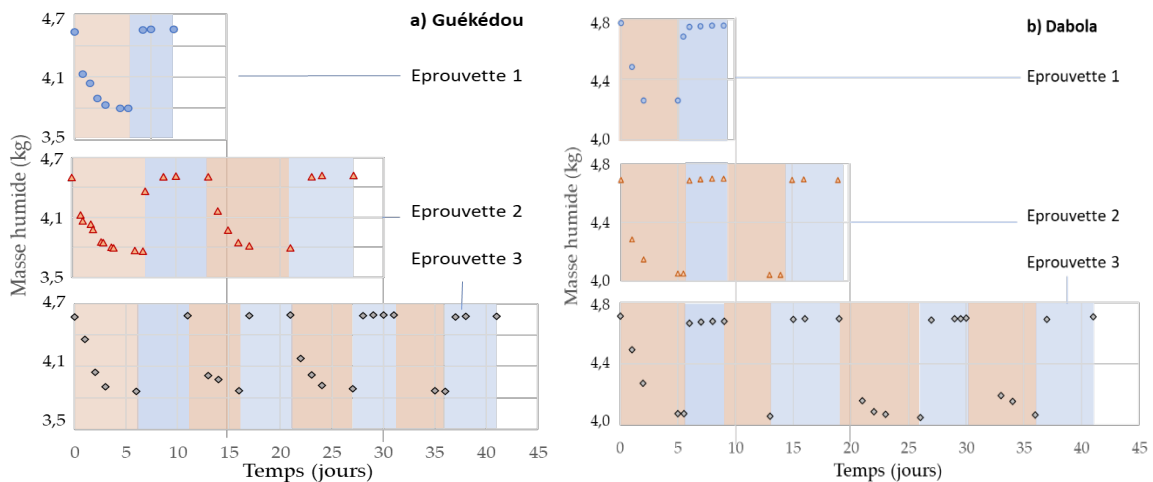


FIGURE 6. Evolution des masses des éprouvettes 1, 2 et 3 au cours de l'application des cycles de séchage-humidification a) Guéckédou et b) Dabola

Le tableau 3 présente les résultats des deux poinçonnements CBR réalisés sur chaque éprouvette (la Fig. 2 précise le phasage de chaque essai). Les indices CBR1 obtenus après un séchage à 105°C montrent une très forte augmentation des valeurs, cohérentes avec le retrait de l'éprouvette au cours du séchage. Pour les matériaux prélevés à Guéckédou, les valeurs à l'état sec semblent

diminuer significativement au fur et à mesure des cycles passant de 128,1% après le premier cycle à 109,9% et 93,1% après 2 et 3 cycles respectivement.

Pour les matériaux prélevés à Dabola, les valeurs semblent suivre la même tendance avec des valeurs de 134,7% puis 115,0% mais la valeur obtenue après quatre cycles est nettement plus importante. Cette valeur élevée devra être confirmée par d'autres essais, elle pourrait être liée à une densité plus élevée de l'éprouvette (1,80 g/cm³).

TABLEAU 3. Indices CBR immersion du sol de Guéckédou à l'issue des cycles

		Guéckédou	Dabola
Eprouvette 1	ρ_d (g/cm ³)	1,68	1,79
	CBR1 état sec (%)	128,1	134,7
	CBR1 après immersion (%)	14,7	11,9
Eprouvette 2	ρ_d (g/cm ³)	1,67	1,79
	CBR2 état sec (%)	109,9	115,0
	CBR2 après immersion (%)	11,5	9,9
Eprouvette 3	ρ_d (g/cm ³)	1,68	1,80
	CBR4 état sec (%)	93,1	177,0
	CBR4 après immersion (%)	14,0	10,3

L'indice CBR 1 immergé est obtenu sur l'éprouvette 1, après le 1^{er} séchage à 105°C puis une immersion (Fig. 2). La valeur obtenue pour Guéckédou, de 14,7 %, est supérieure au CBR immédiat immergé (Tab. 2 CBR_{initial immergé}= 11,5%). Cette augmentation s'explique par le séchage de l'éprouvette juste après son compactage, ce qui entraîne un retrait du matériau. Cependant, il montre également que la réhumidification du matériau conduit à un retour à des valeurs de la classe PST3, identique à la classe initiale. Après deux cycles, l'indice CBR2sec est de 11,5% ; un peu plus faible que CBR1sec mais cette évolution pourrait également être liée à la plus faible densité initiale de cette éprouvette. La valeur après 4 cycles (CBR4 sec) est de 14% proche de la valeur CBR1 sec. La succession des cycles montre une relative stabilité des valeurs immergées.

Une évolution similaire est obtenue pour Dabola avec une valeur CBR1sec à 11,9 %, supérieure au CBR_{initial immergé} de 7,8 % (Tab.2). Au bout de 2 cycles, la valeur de 9,9% est atteinte, légèrement inférieure à la précédente. La valeur finale, après 4 cycles est de 10,3%, ce qui la classerait en PST3. Les CBR obtenues après séchages sont supérieurs aux valeurs obtenues avant séchage mais l'évolution reste limitée lorsque l'on considère les valeurs après immersion. La succession des cycles semble indiquer une légère tendance à la dégradation des valeurs.

VIII. CONCLUSION

Les cycles de séchage-immersion des deux matériaux avec des valeurs CBR différentes ont montré une baisse sensible de la portance des sols après deux cycles de séchage-immersion. Cependant, les indices obtenus après quatre cycles sont plus élevés, suggérant que la multiplicité des cycles ne dégrade pas plus la portance des matériaux. Malgré l'évolution de la portance des matériaux entre les valeurs obtenues après un et deux cycles et leur stabilisation in fine, les valeurs CBR sont restées dans le même intervalle et n'ont pas conduit à un changement de classe de portance. Etant donné que l'année est répartie en deux saisons (sèche et pluvieuse) dans les régions tropicales, les deux

cycles pourraient correspondre à deux années de services. Une auscultation et un entretien des chaussées pourraient être programmé au bout de ces deux ans.

L'écart entre les indices CBR après immersion, de l'ordre de 10 %, et ceux obtenus après séchage, supérieures à 100 %, montre une forte relation entre l'état hydrique et les valeurs de portance obtenues. En période de fortes pluies, la portance des sols latéritiques est susceptible d'atteindre de très faibles valeurs, incompatibles avec les charges élevées circulant sur les voies. En revanche en période sèche, les valeurs obtenues sont très élevées mais cet essai ne permet pas de rendre compte des variations volumiques de l'éprouvette lors de l'application des cycles. L'étude de la durabilité des chaussées doit tenir compte de la période de réalisation des travaux et la conformation du projet (déblai, remblai, drainage...). La portance à l'état humide étant relativement faible au regard de la circulation intense sur les chaussées, l'utilisation de techniques de renforcement par traitement au liant hydraulique ou par lithostabilisation à travers l'ajout de nodule latéritique pourrait s'avérer efficace pour améliorer la durabilité des chaussées.

REFERENCES

- Ademila O. (2017). Engineering evaluation of lateritic soils of failed highway sections in Southwestern Nigeria. *Geosciences Research*, 2(3), 210-218. <https://dx.doi.org/10.22606/gr.2017.23006>
- AFNOR (1996). NF X31-510, Qualité des sols – Détermination de la masse volumique des mottes – Méthode par enrobage à la paraffine. Association Française de Normalisation, Paris, 8pp.
- AFNOR (1997). NF P94-078, Sols : reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR. Association Française de Normalisation, Paris, 12 pp.
- AFNOR (2014). NF P94-093, Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié. Association Française de Normalisation, Paris, 28 pp.
- Autret, P., Marchand, J., Puiatti D. (1983). Traitement des matériaux routiers au ciment (sols fins, latérites). Federation Routiere Internationale, V^e Conf. Routiere Africaine, Libreville.
- Biswal, D. R., Sahoo, U.C., & Dash S. R. (2016). Characterization of granular lateritic soils as pavement material. *Transportation Geotechnics*, 6, 108-122. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.10.005>
- CFTR (2007) Guide technique - Conception et réalisation des terrassements - Fascicule 1 : études et exécution des travaux & Fascicule 2 : organisation des contrôles. Comité Français pour les Techniques Routières, SETRA, Bagnex, France.
- Fermor L.L., (1911). III.—What is Laterite? *Geological magazine*, 8(10), 454-462. <https://doi.org/10.1017/S0016756800116619>
- Grehoa, A.M., Kouakou, C.H., Kouadio, K.C., Ouattara, S., Assande, A.A. & Emeruwa, E. (2023). « Application des essais géotechniques utilisés en construction routière aux sols latéritiques de Samo et de Songon (Bassin sédimentaire ivoirien) » *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 40(3), 1016-1031 ISSN 2028-9324
- ISO (2014), NF EN 17892-1 « Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 1 : détermination de la teneur en eau » Organisation internationale de normalisation 20 pp.

- ISO (2018), NF EN 17892-12, Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12 : détermination des limites de liquidité et de plasticité. Organisation internationale de normalisation 36 pp.
- ISO (2018), NF EN 17892-4, Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 4 : Détermination de la distribution granulométrie des particules. Organisation internationale de normalisation 41 pp.
- ISO (2015), NF EN 17542-3, Terrassements - Essais géotechniques en laboratoire - Partie 3 : Valeur de bleu de méthylène VBS d'un sol ou d'une roche. Organisation internationale de normalisation 23 pp.
- Issiakou M.S. (2016). Caractérisation et valorisation des matériaux latéritiques utilisés en construction routière au Niger. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, France. NNT: 2016BORD0340. tel-01511599
- Mamedov, V.I., Chausov A.A., & Kanishev A.I., (2011). Formation stages of the unique sangaredi bauxite-bearing group, Futa Jallon-Mandingo province, West Africa. *Minerals, Geology of Ore Deposits*, 53, 177-201. <https://doi.org/10.1134/S1075701511030044>
- Mbengue, M.T.M.; Lawane Gana, A.; Messan, A.; Mone, O.; Pantet, A. (2023). Effect of the Type of Lateritic Soil on the Effectiveness of Geomechanical Improvement Using a Low Quantity of Cement for Sustainable Road Construction. *Materials*, 16, 6891. <https://doi.org/10.3390/ma16216891>
- Ndiaye M., (2013). A contribution to the study of lateritic soils from Senegal and Brazil. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, Université Cheikh Anta Diop (Dakar), 150 pp.
- Quadri, H.A. Adeyemi, O.A., & Olafusi O.S. (2012). Investigation of the geotechnical engineering properties of laterite as a subgrade and base material for road constructions in Nigeria. *Civil and Environmental Research*, 2(8), 23-32. <http://doi.org/10.12691/ajcea-11-2-4>
- Santha Kumar G., Saini, P.K., Deoliya, R., Mishra, A.K., & Negi S.K. (2022). Characterization of laterite soil and its use in construction applications: A review. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200120>
- Savadogo N., Traore Y. B., Kocty R. & Mone O (2024). Stabilization of lateritic soil with Portland cement and crushed granite for pavement base courses. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 23(03), 3090–3099.
- Sidibé, D., Lecomte, A., Somparé, M., & Loua H. (2022). Practicability of paved roads in the tropical climate of Guinea. *J. of Mech. and Civ. Eng.* 19(3), 34-49. <http://doi.org/10.9790/1684-1903053449>
- Sivarajasingham S., Alexander, L. T., Cady, J.G., & Cline M.G. (1962). Laterite. *Advances in agronomy*, 14, 1-60. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60435-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60435-6)
- Tockol I. (1993). Contribution à l'étude des graveleux latéritiques dans les pays du Sahel : Cas des routes non revêtues. Thèse de doctorat, Université de Moncton, CA.