

Application des essais géotechniques utilisés en construction routière aux sols latéritiques de Samo et de Songon (Bassin sédimentaire ivoirien)

[Applied of geotechnical tests used in road construction to the lateritic soils of Samo and Songon (Ivorian sedimentary basin)]

Abalé Martial Grehoa, Conand Honoré Kouakou, Koffi Clément Kouadio, Souleymane Ouattara, Aka Alexandre Assande, and Edjikémé Emeruwa

Université Felix HOUPHOUET BOIGNY, Unité de formation des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Laboratoire des Sciences du sol, de l'eau et des Géomatériaux, 08 BP 2600 Abidjan 08, Côte d'Ivoire

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In Côte d'Ivoire, the base layers on road are generally made from lateritic soils which must respect specification in order to guarantee its quality. Unfortunately, most of the road bases made with lateritic soils from the sedimentary basin degrade early. This investigation aims to determine the geotechnical characteristics of the natural lateritic soils from sedimentary basin used for road construction to understand the reasons for their early degradation. Thus, soils from Songon and Samo were subjected to tests, to know their intrinsic properties. Particle size distribution, Atterberg limits and methylene blue test, modified Proctor, California Bearing Ratio (CBR), and chemical and mineralogical tests were performed. The soils of Samo and Songon contain appreciable quantities of iron and aluminum oxides and silica, but small quantities of titane, manganese and magnesium oxides. They are mainly composed of kaolinite and quartz. Furthermore, they are massive consisted of sand packed in fine matrix (49 % and 46 %) for soil of Samo and (62 % and 33 %) for soil of Songon but no gravel. The dry densities, the optimum moisture content and CBR at 95 % of maximum dry density obtained for the soil of Samo and Songon are respectively 1.83; 15.2 %, 24 % and 1.88; 16.7 %, 20 %. These soils are not suitable for use as base layers on road because they are still in a primary stage of lateritic soils formation.

KEYWORDS: Laterite, base layers on road, Proctor, CBR.

RESUME: En Côte d'Ivoire les couches d'assises sont généralement faites à base de sols latéritiques qui doivent respecter une spécification bien déterminée afin de garantir sa qualité. Malheureusement, la plupart des assises de routes réalisées à base des sols latéritiques du bassin sédimentaire se dégradent précocement. Cette étude a pour objectif de déterminer les caractéristiques géotechniques des sols latéritiques naturels du bassin sédimentaire utilisé pour la construction des routes pour comprendre les raisons de leur dégradation prématurée. Ainsi, des sols de Songon et de Samo ont été soumis à une série d'essai, afin de connaître leurs propriétés intrinsèques. Il s'agit des essais d'analyse granulométriques, de limite d'Atterberg et au bleu de méthylène, Proctor, CBR et des analyses chimique et minéralogique. Les sols de Samo et de Songon contiennent des quantités appréciables des oxydes de fer et d'aluminium, et de la silice, mais de faibles quantités d'oxydes de titane, de manganèse, de magnésium. Ils sont composés essentiellement de kaolinite et de quartz. En outre ils sont constitués massive de sable emballée dans une matrice fine (49% et 46 %) pour le sol de Samo et (62% et 33%) pour le sol de Songon mais pas de graviers. Les densités, l'optimum Proctor et l'indice CBR obtenues pour les sols de Samo et Songon sont respectivement de 1,83, 15,2 %, 21 % et de 1,88, 16,7 %, 20 %. Ces sols ne peuvent pas être utilisés en couches d'assise de route car ils sont encore à un stade primaire de la latéritisation.

MOTS-CLEFS: Latérite, portance, assise de route, Proctor, CBR.

1 INTRODUCTION

Le réseau routier d'un pays constitue l'un des patrimoines qui revêt une importance capitale dans son développement. En effet, la route est un moyen de communication qui permet des échanges sociaux économiques et culturels entre les peuples. Elle constitue un indicateur du dynamisme économique d'une région. La route au plan technique est composée de plusieurs couches dont la durabilité et longévité dépendent en partie de la couche de fondation et de la couche de base. Ces couches qui transmettent et atténuent les efforts dus aux pneumatiques au support de la route doivent être de bonne qualité afin de freiner la dégradation de route. Elles sont généralement faites à base de sols graveleux latéritiques et doivent respecter une spécification bien déterminée en fonction du type de trafic (CBR \geq 80%, densité sèche \geq 2, pourcentage de fine \leq 35% et l'indice de plasticité \leq 15%) [1].

Les sols latéritiques se présentent sous diverses formes notamment les cuirasses latéritiques, les carapaces latéritiques, les graveleux latéritiques et enfin les sols fins latéritiques. Ce sont les produits de la désagrégation des roches dont la formation est fonction de plusieurs paramètres: le climat, la topographie, les facteurs entropiques, la nature de la roche de départ et les facteurs dia-génétiques (P. Reiffsteck, 2007) []. Dans le bassin sédimentaire ivoirien, ils se sont développés à partir de résidus provenant du socle cristallin. En outre, de nombreux auteurs ont réalisé des études géotechniques sur les sols latéritiques. Le tableau I résume quelques-unes des propriétés des latérites sub-sahariennes. Il confirme leur grande variabilité de leurs propriétés suivant les pays.

Tableau 1. Comparaison des sols latéritiques étudiés avec quelques sols latéritiques en Afrique du sud saharien [3]

Pays	Type de Roche	Régime climatique	WL	WP	IP	<80 μ m	w (%)	ρ_s	CBR (%)	AASHTO Classification	Références
Ghana	Granite	Tropical	-	-	-	30	12	2	-	-	Gidigas, (1983)
Côte d'Ivoire	Granite	Tropical	48	24	24	21	10	2,1	30	A-2-6	Bohi, (2008)
Congo	-	Tropical	80	-	40	35	19	1,7	30	A-2-7	Bohi, (2008)
Ouganda	-	Subtropicale	38	17	22	34	13	-	19	A-2-6	Zelalem, (2005)
Kenya	-	Subtropical	45	31	14	28	19	-	52	A-2-7	Zelalem, (2005)
Gambie	-	Subtropicale	36	16	20	22		-	-	A-2-6	Zelalem, (2005)
Tanzanie	-	Subtropicale	34	19	10	25	9	2,1	22	A-2-4	Zelalem, (2005)
Ethiopie	Granite, schiste	Subtropicale	68	33	32	58	28	1,7	15	A-2-5	Zelalem, (2005)
Senegal	Schiste	Semi-aride	25	16	16	20	9	1,9	86	A-2-7	Bohi, (2008)
Niger	-	Semi-aride	21	11	10	25	9	2,1	22	A-2-4	Zelalem, (2005)
Nigeria	Gneiss, quartzite	Semi-aride	30	16	14	52	18	2,5	60	A-2-6	Bello et Adegoke, (2010)
Burkina-Faso	Granite	Semi-aride	22	12	10	11	7	2,2	43	A-2-7	Millogo et al, (2008)
Soudan	-	Aride	21	12	9	27	21	-	-	A-2-4	Zelalem, (2005)

WL: limite de liquidité; WP: limite de Plasticité; IP: indice de plasticité; <80 μ m teneur en fine; w: teneur en eau; ρ_s : densité sèche; CBR: Californian Briding Ration;

De même [2] montrent que la variabilité des propriétés géotechniques des sols latéritiques utilisés en construction routière est remarquable au niveau local. Ils prouvent aussi que la nature de la roche originelle dont sont issus les sols latéritiques formés sous un même climat à des influence sur la variabilité de leur propriétés géotechnique.

En Côte d'Ivoire, les sols latéritiques utilisés pour construire les routes sont issus de différents emprunts situés dans les environs de son tracé. Dans la zone sud du pays, l'absence de formations latéritiques au sens strict du terme [] a favorisé l'emploi des formations de fin du bassin sédimentaire (le continental terminal) comme matière première pour assise de routes. Les routes conçues avec ce matériau, malgré les précautions techniques de mises en œuvre et le respect des règles de dimensionnement se dégradent de façon précoce. Plusieurs raisons sont évoquées pour expliquer ce constat parmi lesquelles la qualité et la grande variabilité des sols latéritiques utilisé pour la conception des assises de route (couche de fondation et couche de base) cependant elles n'ont pas été confirmées scientifiquement.

Ainsi, cette étude a pour objectif de vérifier que les caractéristiques géotechniques des sols latéritiques naturels du bassin sédimentaire utilisé pour la construction des routes respectent ou non les recommandations et de les comparer afin d'infirmier ou de confirmer les raisons énumérées plus haut. Par conséquent, deux échantillons de sol prélevés dans deux localités différentes dans les formations du continental terminal ont été soumis à des analyses chimiques, minéralogiques et mécaniques.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 LOCALISATION DES SITES DE PRÉLÈVEMENT DES DIFFÉRENTS SOLS

Les sols étudiés ont été prélevés dans les localités de Samo et de Songon. Ces localités sont situées dans le bassin sédimentaire côtier de la Côte d'Ivoire. Les deux sites de prélèvements ont pour coordonnées 5°58'N, 5°28'W et 9°31'N; 5°49'W respectivement Samo et Songon

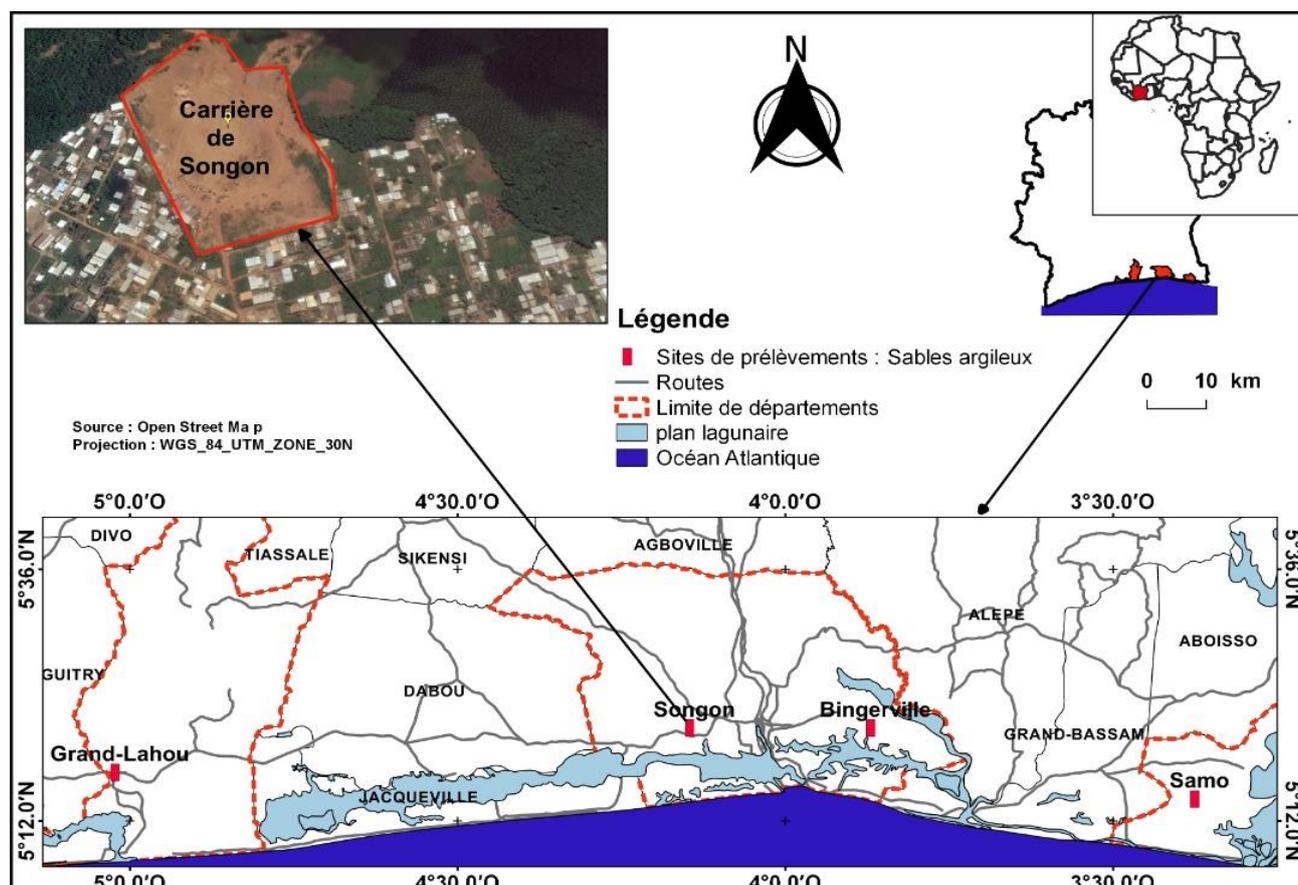


Fig. 1. Situation géographique des sites de prélèvement

2.2 MÉTHODES D'ÉTUDE

2.2.1 ANALYSE CHIMIQUE: FLUORESCENCE DES RAYONS X

L'analyse chimique permet de déterminer la composition chimique des échantillons de sol. Elle est réalisée sur la fraction fine du sol par fluorescence des rayons X à l'aide d'un spectromètre EDXRF (énergie dispersive de fluorescence des rayons X). L'appareil utilisé est de type Niton® XL3t. La longueur d'onde maximum est de $2,5 \cdot 10^{-5} \mu\text{m}$ et une énergie est de 50 KeV. Les résultats sont exprimés sous forme de pourcentage d'oxyde.

2.2.2 ANALYSE MINÉRALOGIQUE: DIFFRACTION DES RAYONS X

L'analyse minéralogique a été effectuée par diffraction aux rayons X. Les échantillons de sols ont d'abord été broyés dans un mortier en porcelaine puis la matière organique a été détruite respectivement avec de l'acide chlorhydrique et l'eau oxygénée à 10 %. Ensuite, ils ont été rincés et séchés. Au terme de ces opérations, les échantillons sont placés sur des lames pour l'analyse. Ces différentes lames sont positionnées dans le diffractomètre et l'acquisition lancée. Cette acquisition s'est faite entre 5° à 90° avec des pas de $0,04^\circ$ chaque 2s. Le diffractomètre utilisé est un Siemens D5005 avec une radiation $K\alpha_1$ de cuivre ($\lambda = \text{Cu}K\alpha = 1,542 \text{ \AA}$).

Sur les diffractogrammes obtenus les différentes phases cristallines ont été identifiées à l'aide de logiciel Match version 3. Les différentes phases minérales déterminées à la DRX sont quantifiées grâce aux pics des éléments chimiques par la méthode de Rietvelt. Cette méthode est une technique d'analyse qualitative et pseudo-quantitative des minéraux retrouvés. Les diffractogrammes des échantillons analysés ainsi que les quantités des minéraux sont fournis par l'appareil.

2.2.3 ANALYSE GÉOTECHNIQUES

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

L'analyse granulométrique des échantillons a été effectuée suivant les normes [4], [5]. Après séchage le matériau est pesé puis versé sur une colonne de tamis constitué par l'emboîtement des tamis de maille carré, classé de haut en bas dans l'ordre de maille décroissante, après une vibration de 3 à 5 minutes à 400 tours par minute. Les tamis sont repris un à un en commençant par celui qui a le plus grand diamètre et, les refus pesés. Le tamisage est complété par la sédimentométrie lorsque la proportion de passant au tamis de $63 \mu\text{m}$ est supérieure à 10 %. La sédimentométrie permet de mesurer grâce à un densimètre la densité des suspensions à divers instants. Les proportions des refus cumulés selon leur taille sont reportées sur un graphe semi-logarithmique en vue de tracer la courbe d'analyse granulométrique de l'échantillon. Les différentes courbes obtenues permettent de déterminer la distribution des particules de sol en fonction de leur taille.

LIMITE D'ATTERBERG

Les limites d'Atterberg sont un ensemble de deux valeurs (limite de liquidité et limite de plasticité) qui correspondent aux teneurs en eau à partir desquelles un sol change de comportement. Ils interviennent dans la classification des sols. Ils permettent aussi par projection des valeurs dans le tableau de Casagrande de déterminer le degré de plasticité et d'apprécier la teneur en argile d'un sol. Les limites Atterberg ont été déterminés selon la norme [6] sur la fraction granulométrique dont la taille est inférieure $400 \mu\text{m}$. La limite de liquidité (WL) est obtenue grâce à l'appareil de Casagrande et la limite de plasticité (WP) par la méthode des rouleaux. L'indice de plasticité est évalué par la différence entre WL et WP.

ESSAI AU BLEU DE MÉTHYLÈNE

L'essai au Bleu de méthylène permet de révéler la présence de fines de nature argileuse et d'en déterminer la concentration. La méthode consiste à contrôler l'absorption de bleu de méthylène injecté dans un bain aqueux contenant la prise d'essai, en observant le comportement d'une goutte de suspension déposée sur une feuille de papier filtre (méthode de la tâche). Elle est réalisée selon la norme []. La prise d'essai est de 200 g de sol de classe O/2. La valeur au bleu du sol (VBS) est comparée aux valeurs données dans le tableau de classification des sols [7].

ESSAI PROCTOR MODIFIÉ

L'essai Proctor permet de déterminer la teneur en eau correspondant à la densité sèche maximale d'un sol compacté avec une énergie donnée [8].

L'essai Proctor modifié est réalisé selon la norme française [8]. Une masse de matériau d'environ 6 kg est mouillée avec une quantité d'eau d'environ 120 ml puis malaxée. Le mélange ainsi obtenu est introduit par couche dans le moule Proctor préalablement solidarifiée, rehaussé, lubrifié et les disques d'espacement placés au fond. Sur chaque couche, 56 coups sont appliqués en raison de 8 séquences de 7 coups. La première couche doit être plus dense que les autres. Après le compactage de la dernière couche, la rehausse est retirée et le moule est soigneusement rasé en opérant radialement du centre vers la périphérie du moule. L'ensemble du moule avec le matériau est pesé puis le matériau est démoulé. Des échantillons représentatifs sont extraits pour en déterminer la teneur en eau. L'essai est répété plusieurs fois à des teneurs en eau différentes qui évoluent de 2 % en 2%. Les valeurs obtenues permettent de tracer les courbes Proctor puis déterminer les valeurs optimales.

ESSAI CBR

L'essai CBR permet de mesurer la portance d'un sol (sa résistance au poinçonnement) en fonction de son état, de sa densité et de son humidité. Il permet aussi d'établir une classification des sols, d'établir la traficabilité des engins de tassement (IPI) et de déterminer les épaisseurs des chaussées (si l'indice CBR augmente alors l'épaisseur baisse). La méthode consiste à mesurer la force appliquée sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante de 1,27 mm/min dans une éprouvette de matériaux. Trois éprouvettes constituées de cinq couches chacune, compactées à la teneur en eau correspondant à l'optimum Proctor sont réalisées. La première est compactée à 14 coups par couche, la deuxième à 25 coups et la troisième à 56 coups. L'essai est réalisé selon la norme [9].

Il permet de déterminer trois indices: l'indice portant immédiat (IPI), l'indice CBR immédiat, et l'indice CBR après immersion. Cependant dans ces travaux seul l'indice CBR après immersion a été déterminé car il tient compte des variations de régimes hydriques, la Côte d'Ivoire ayant un climat tropical humide.

L'indice CBR est donné par l'équation 1:

$$I_{CBR} = \begin{cases} \frac{\text{effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (kN)} \times 100}{13,35} \\ \frac{\text{effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (kN)} \times 100}{20} \end{cases} \quad (1)$$

Par convention I_{CBR} est la plus grande des deux valeurs.

TENEUR EN MATIÈRE ORGANIQUE

La teneur en matière organique d'un sol est un paramètre important dans la classification des sols utilisés en construction routière. Il permet aussi la justification du choix de liant à utiliser pour sa stabilisation. La teneur en matière organique a été mesurée par calcination selon la norme [9]. Après un séchage préalable à l'étuve, une masse (m_0) de sol de fraction inférieure à 2 mm est calcinée pendant 3 heures à 450 °C dans un four à moufle. Au bout des 3 heures, la masse (m_1) de sol est déterminée. La teneur en matière organique du sol est donnée par l'équation 2:

$$T_{Mo} = 100 \frac{m_0 - m_1}{m_0} \quad (2)$$

L'essai est effectué dans le but de rendre compte de l'aptitude à améliorer un sol avec des liants.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 PROPRIÉTÉS CHIMIQUES ET MINÉRALOGIQUES DES SOLS

3.1.1 TENEUR EN MATIÈRE ORGANIQUE

Le tableau 2 présente les résultats des mesures de la teneur en matière organique effectuées selon la méthode de la calcination.

Tableau 2. Teneur en carbone organique total des sols

Echantillon	COT (% poids)
Samo	0,10
Songon	0,10

Les valeurs des teneurs en carbone organique total (COT) des échantillons de sols de Samo et Songon sont les mêmes de 0,10 %. Ces quantités de matière organique sont très faibles (< 1 %) par conséquent, ces sols peuvent être traités avec des liants hydrauliques et être utilisé en couches d'assise de chaussée [10].

3.1.2 COMPOSITION CHIMIQUE

Les analyses des proportions d'oxydes réalisées sur les sols de Songon et de Samo réduits sous forme de poudre de diamètre compris entre 75 nm et 100 nm, sont consignées dans le tableau 3.

Tableau 3. Proportions d'oxydes des différents sols

Oxydes	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	MgO (%)	S/R	Ki
Songon	56,07	18,99	8,71	1,30	0,02	3,88	5,02
Samo	56,91	16,04	12,09	1,01	0,03	4,07	6,03

Les oxydes majeurs rencontrés dans les sols de Songon et de Samo sont l'oxyde de silicium, d'aluminium, de fer et de titane (tableau 3). Le sol de Samo a les proportions les plus élevées en oxyde de silicium et de fer par rapport aux sols de Songon. Ces sols ont été prélevés dans la même zone climatique (climat Attiéen) et le même domaine géologique: le bassin sédimentaire. Cependant ils connaissent une évolution différente au plan chimique. La différence de leur composition chimique pourrait s'expliquer par les facteurs topographiques (érosion et drainage), biologiques (matière organique, bactéries, acides humiques) et la nature des roches mères qui exercent des influences sur le processus de genèse des sols

Pour vérifier la nature latéritique ou non des sols, certains auteurs ont eu recours au rapport S/R [2] :

$$Ki = \frac{\frac{SiO_2}{60}}{\frac{Al_2O_3}{102}} \quad (3)$$

$$\frac{S}{R} = \frac{\frac{SiO_2}{60}}{\frac{Al_2O_3}{102} + \frac{Fe_2O_3}{160}} \quad (4)$$

Le calcul de ce rapport pour les sols de Samo et de Songon est donné dans le tableau 3. Les valeurs obtenues sont supérieures à 2. Ces sols sont donc classés parmi les matériaux non latéritiques. Les sols de Songon et Samo ne peuvent être considérés comme des sols latéritiques. Néanmoins ils seront appelés dans la suite de l'article sol latéritique car ce paramètre de différenciation ne fait pas l'unanimité au niveau des chercheurs. Il dépend fortement de la classe granulaire [10]. De plus ils ont la couleur jaune ocre caractéristique de la plupart des sols latéritiques de Côte d'Ivoire.

3.1.3 COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

La figure 2 présente les diffractogrammes de l'analyse minéralogique des sols de Samo et de Songon sur une plage d'angles 2θ compris entre 5 et 90° .

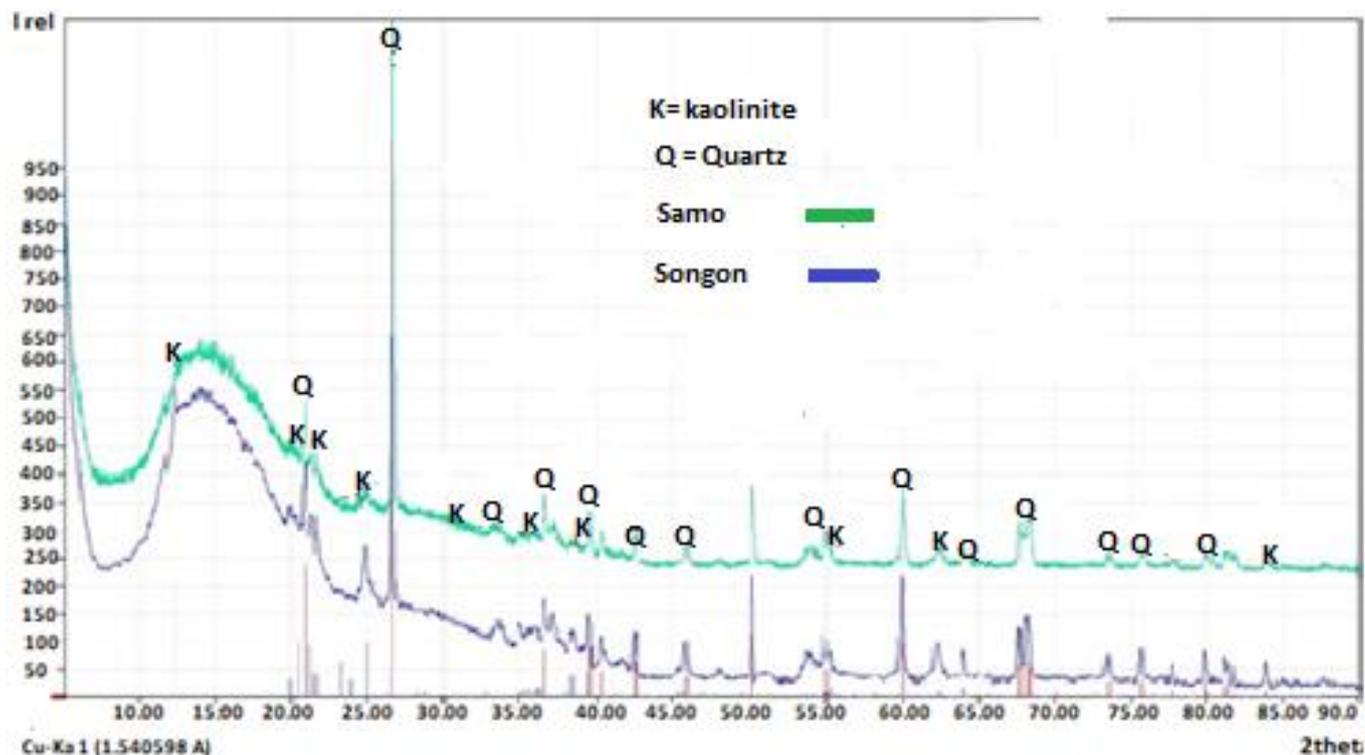


Fig. 2. Diffractogrammes des rayons X du sol de Samo et de Songon

Ces diffractogrammes effectués sur l'échantillon totale de sol montrent que les sols de Samo et de Songon sont composés de quartz (SiO_2) et de kaolinite ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). Ces minéraux se rencontrent habituellement dans les sols latéritiques [11]. Ils sont en général accompagnés par les minéraux d'hématite et de goethite dont les pics n'ont pas été formellement identifiés sur les diffractogrammes. Cela pourrait s'expliquer par la nature de l'échantillon (roche totale), classe granulométrique analysée et aussi par la superposition des pics de quartz et de kaolinite sur ceux de ces minéraux. En effet [10] ont pu identifier ces phases minérales sur la fraction de sols latéritiques $< 80 \mu\text{m}$ avec des pics à peine marqués. De même, [11] ont montré dans leurs travaux que les sols latéritiques de Bingerville et de Samo sont enrichis en quartz et ont signifié la présence de certains minéraux tel que la goethite, la limonite, l'hématite qui influencent la coloration des sols tout comme la variation du degré de l'oxydation.

La figure 3 donne les teneurs en minéraux argileux contenues dans les sols de Samo et de Songon. Le sol de Samo contient 27 % de minéraux argileux tandis que celui de Songon en contient environ 42 %. De plus le sol de Samo contient la plus importante proportion de quartz 73 % tandis que celui de Songon en contient 58 %.

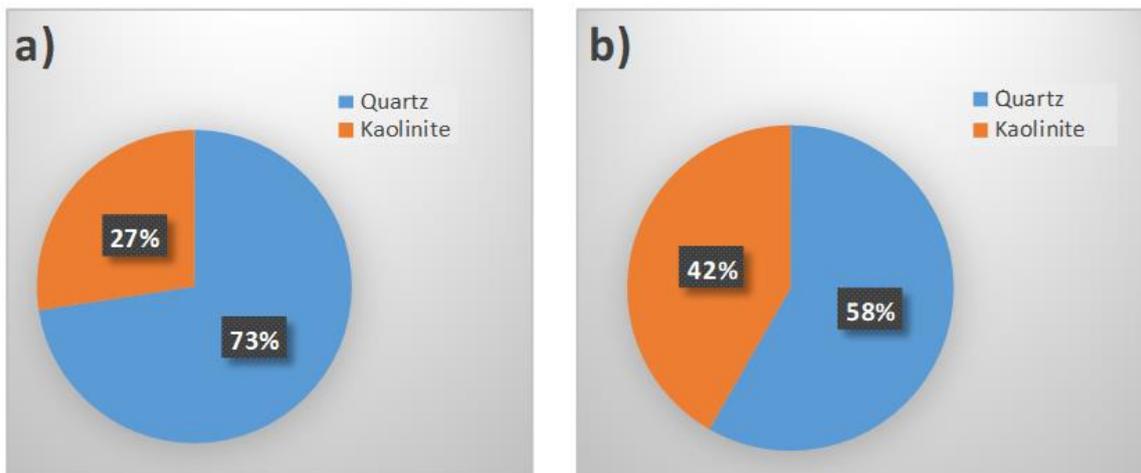


Fig. 3. Proportions des minéraux dans les différents sols: a) sol de Samo, b) sol de Songon

3.2 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES

3.2.1 COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE

Les résultats de l'analyse granulométrique sont reportés sur la figure 4.

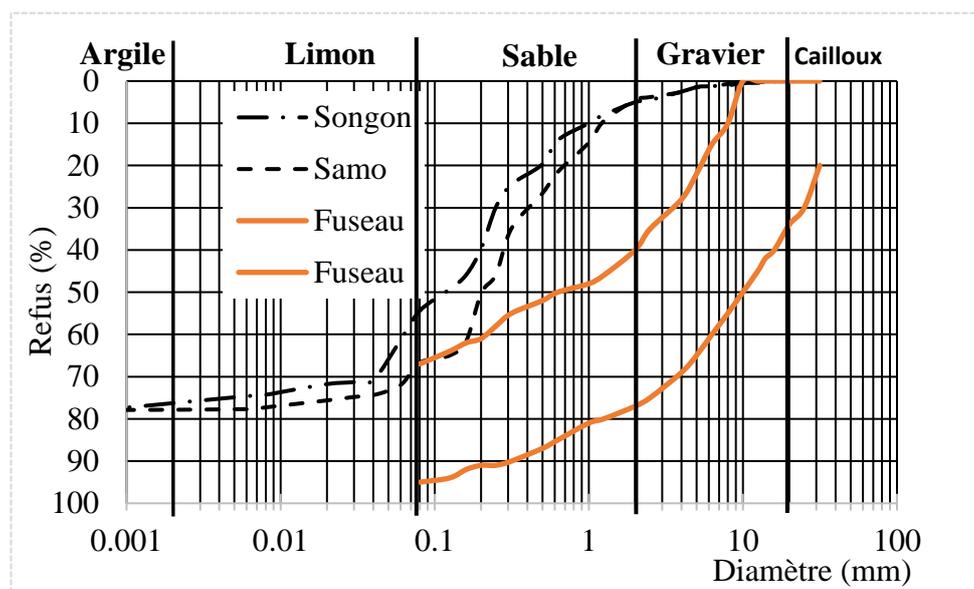


Fig. 4. Courbes de l'analyse granulométrique des sols

Les courbes granulométriques des différents sols montrent qu'ils sont composés de quatre familles de grains: graviers, sable, limon et argile. Les différentes proportions de ces grains sont données dans le tableau 4.

Les sols de Songon contiennent 5 % de graviers, 49 % de sable, de 22 % de limon et 24 % d'argile. Par contre, celui de Samo contient 5 % de gravier 62 % de sable, 11 % de limon et 22 % d'argile. Cependant ces deux sols ont le même D_{max} (10 mm). Le sol de Songon a une texture limon sablo-argileuse tandis que celui de Samo a une texture sablo-argileuse. Cette texture est confirmée par la projection des différentes proportions de particules dans le triangle textural de Casagrande (figure 5).

Tableau 4. Répartition granulométrique des sols

Fraction granulométrique	Songon	Samo
Gravier ($2\text{mm} < \Phi < 20\text{mm}$)	5 %	5 %
Sable ($80\mu\text{m} < \Phi < 2\text{mm}$)	49 %	62 %
Limon ($2\mu\text{m} < \Phi < 80\mu\text{m}$)	22 %	11 %
Argile ($\Phi < 2\mu\text{m}$)	24 %	22 %
Dmax	5 mm	5 mm
Fine ($\Phi < 80\mu\text{m}$)	46 %	33 %

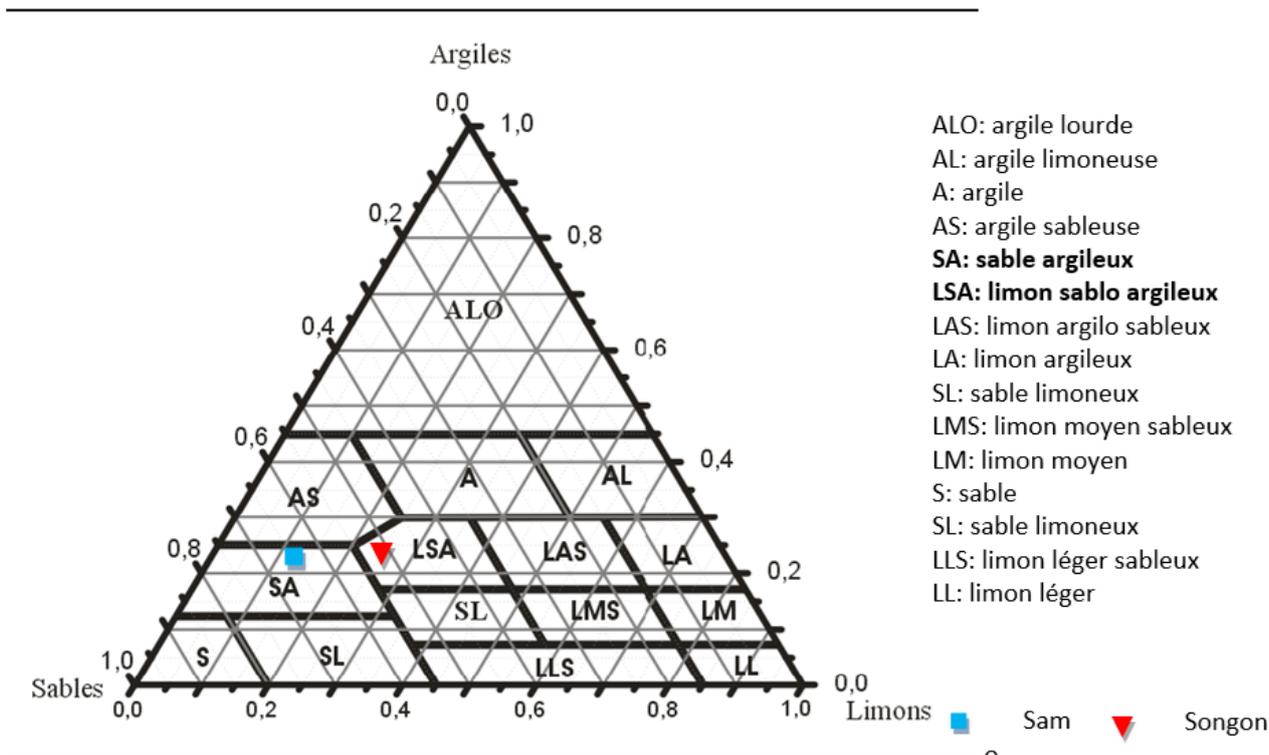


Fig. 5. Diagramme textural des sols [12]

3.2.2 LIMITES D'ATTERBERG

Les valeurs des limites de liquidité, de plasticité et des indices de plasticité des sols de Samo et de Songon sont données dans le tableau 5.

Le sol de Songon a les limites de liquidité et de plasticité plus élevées que celui de Samo. Par contre le sol de Samo a l'indice de plasticité plus grand. Cela s'explique d'une part par le fait que le sol de Songon contient beaucoup plus de fines que celui de Samo et d'autre part par la présence de minéraux argileux en quantité plus abondante dans le sol de Songon. En effet plus un sol est fin et argileux, plus il faut lui ajouter de l'eau pour le faire passer de l'état plastique à l'état liquide. Ces résultats sont conformes à ceux donnés par l'analyse minéralogique; le sol de Songon est plus riche en minéraux argileux (42 % de kaolinite).

Tableau 5. Limites d'Atterberg des sols latéritiques de Samo et de Songon

Sol latéritique	Limite de plasticité (%)	Limite de liquidité (%)	Indice de plasticité IP = WL – WP
Samo	23,2	46,2	23
Songon	29,3	48,6	19,3

La projection des valeurs de limites d'Atterberg dans le diagramme de plasticité de Casagrande est donnée sur la figure 6

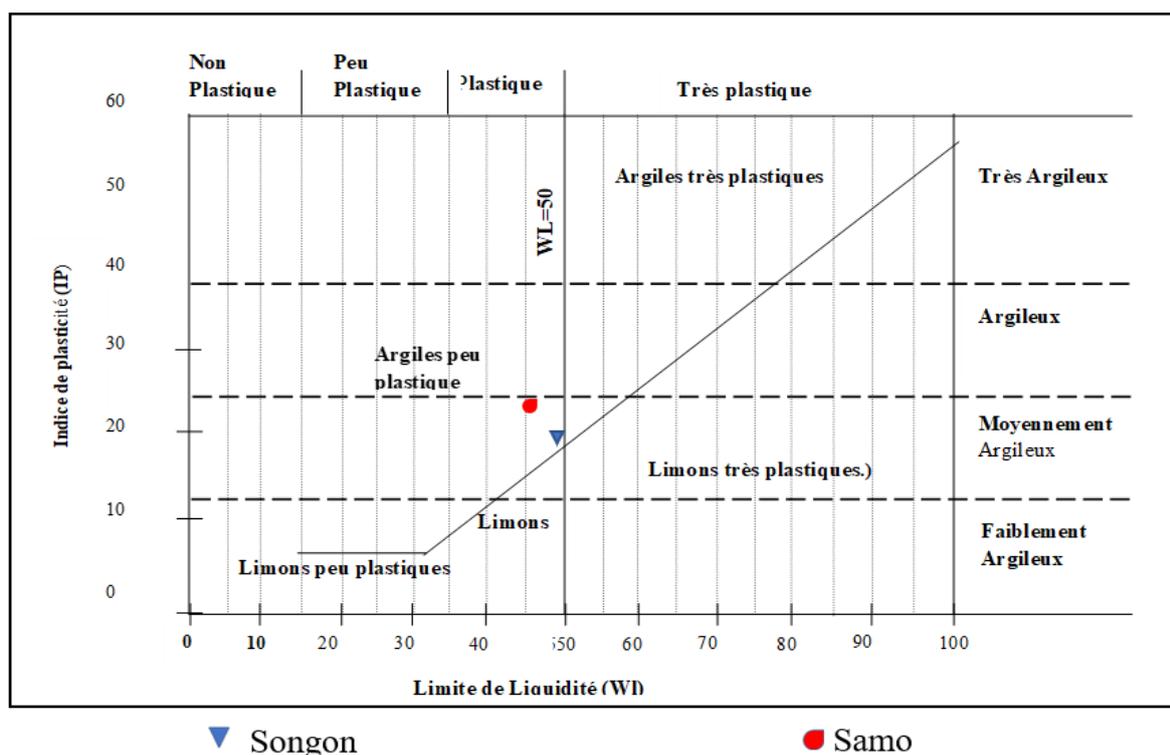


Fig. 6. Diagramme de plasticité de Casagrande

Les sols étudiés sont en générale au-dessus de la ligne A, ce qui signifie qu'ils sont tous de nature argileuse, [13]. Les sols de Samo et de Songon sont de nature moyennement argileuse. Cela confirme la présence des minéraux argileux. Cependant, Samo semble un peu plus plastique car son indice de plasticité est plus proche de 23 % limite entre les sols moyennement argileux et argileux.

3.2.3 VALEUR AU BLEU DE MÉTHYLÈNE

Les valeurs au bleu (VB) mesurées des sols de Songon et de Samo sont respectivement de 0,5 et 0,2 (tableau 6). Selon le tableau 7 qui donne la nature des sols en fonction de la VB, les sols de Songon et de Samo sont des sols sablo limoneux donc très peu plastique. Cette valeur plus élevée de la valeur au bleu du sol de Songon par rapport à celui de Samo est en accord avec l'analyse minéralogique. Selon les limites d'Atterberg les sols de Songon et de Samo sont plastiques et moyennement argileux avec une tendance plus argileuse pour Samo. La divergence entre ces deux résultats peut s'expliquer par la granulométrie des prises d'essai : passant de 400 μ m pour les limites Atterberg et la classe granulaire 0/2 pour l'essai au bleu de méthylène.

Tableau 6. Valeurs au bleu de méthylène des sols latéritiques de Samo et de Songon.

Type de latérite	Valeur au bleu
Samo	0,2
Songon	0,5

Tableau 7. Nature des sols selon la valeur de bleu [14], [15]

Valeur au bleu du sol	Nature du sol
< 0,2	Sol insensible à l'eau
0,2-1,5	Sol sablo limoneux,
1,5-2,5	Sols sablo argileux, peu Plastique
2,5-6	Sols limoneux de plasticité moyenne
6-8	Sols argileux
>8	Sol très argileux

En outre, leur VB supérieur ou égale à 0,2 indique que ces sols sont sensibles à l'eau.

3.2.4 OPTIMUM PROCTOR MODIFIÉ DES SOLS

Les variations de la densité sèche des sols de Samo et de Songon en fonction de leur teneur en eau sont données sur la figure 7.

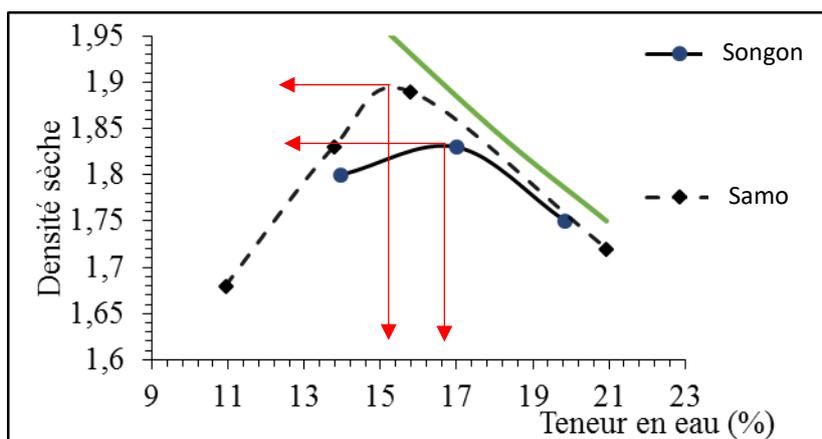


Fig. 7. Courbe Proctor des sols latéritiques de Samo et de Songon

Ces courbes montrent que les densités sèches augmentent avec la teneur en eau, elle passe par un maximum avant de baisser quand la teneur en eau augmente. Cela s'explique selon [8], [9] par le fait que l'eau permet de lubrifier les grains entre eux afin d'obtenir une structure compacte.

Les optimums Proctor et les densités sèches correspondantes pour les différents échantillons sont données dans le tableau 8

Tableau 8. Optimum Proctor des sols de Samo et de Songon

Valeurs optimum	Samo	Songon
Teneur en eau (%)	15, 2±2	16,7±2
Densité sèche (g/cm ³)	1,89 ±0,2	1,83 ±0,2

Le sol de Songon a la teneur en eau optimale la plus grande. Ceci est lié en fait à la teneur en eau et à la nature en éléments fins. En effet comme l'indique les résultats de l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg, plus un sol contient de éléments fins de nature argileuse, plus sa surface spécifique est élevée, plus il faut de l'eau pour le mouiller et le conduire à la teneur en eau optimum. Ainsi, le sol de Songon qui contient plus d'éléments fins 46 % et moyennement argile demandera un peu plus d'eau pour atteindre la teneur en eau optimum par rapport au sol de Samo qui est aussi moyennement argileux mais contient 33 % d'éléments fins.

Le sol de Samo a la densité sèche la plus élevée bien que les deux densités soient proches. Cette différence de densité sèche dépend de la proportion en éléments fins et grossiers. En effet en deçà de la valeur critique de ces deux proportions, la densité augmente avec la teneur en fine mais au-delà de cette valeur critique elle baisse avec l'augmentation de la teneur en fine. Cette teneur critique est fixée au tour de 35 % [1]. Le sol de Samo qui a une teneur en fine égale à 33 % donnera une densité sèche plus élevée que celui de Songon qui a une teneur en fine plus grande et plus distante de la valeur critique.

3.2.5 RÉSISTANCE AU POINÇONNEMENT (CBR)

Les indices CBR des sols de Samo et de Songon compactés avec des énergies de compactage croissantes, après une immersion de 4 jours dans de l'eau, sont présentés sur la figure 8.

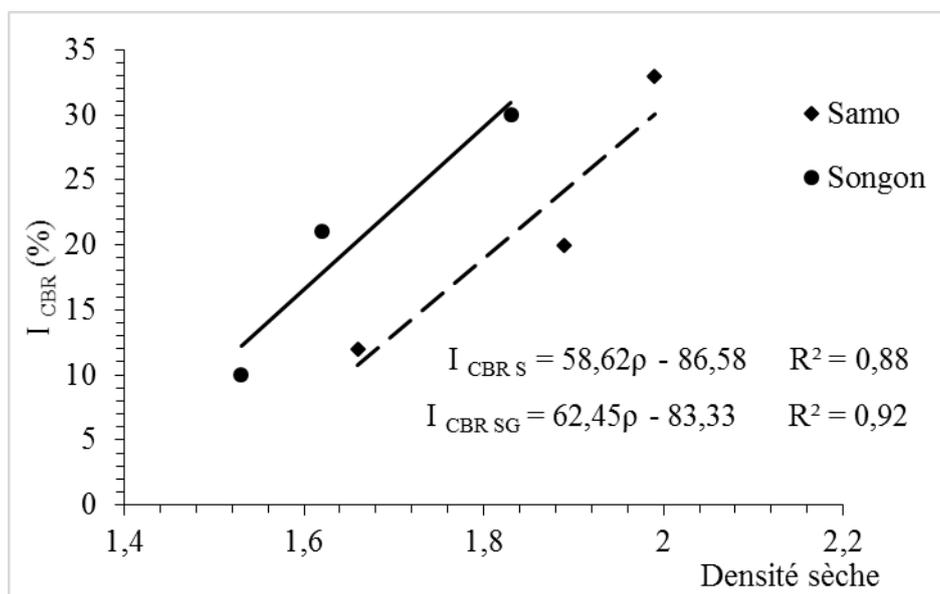


Fig. 8. Courbe CBR des sols latéritiques à l'état naturel

Les indices CBR des sols de Samo et de Songon augmentent avec la densité sèche (figure 8). Cela s'explique par l'augmentation de l'énergie de compactage [16], [17]. En effet, lorsque l'énergie effective de compaction augmente, les grains se rapprochent. Par conséquent leur densité sèche est élevée. Quand la densité augmente, les frottements entre les grains s'opposant à l'enfoncement du piston deviennent important d'où l'augmentation de la résistance au poinçonnement (portance). Cette évolution de la portance après 4 jours d'immersion dans l'eau avec la densité suit une loi linéaire. Les équations expérimentales tirées de ces résultats sont données sur la figure 8. Le coefficient de détermination entre les deux paramètres est supérieur à 88 %. Ces équations peuvent être utilisées pour prédire l' I_{CBR} immergé lorsque la densité est connue avec un risque d'erreur de 12 % et de 8 % respectivement pour les sols de Samo et de Songon. Il faut en pratique au minimum 4 jours pour avoir un résultat CBR après immersion, ce résultat permettra de gagner du temps dans le contrôle des chantiers de construction de routes.

La figure 8 montre aussi que la droite I_{CBR} en fonction de la densité sèche du sol de Songon est au-dessus de celle de Samo. Ainsi pour une densité sèche de 1,8; le sol de Samo a un I_{CBR} de 19 % et celui de Songon de 29 %, de même pour un même I_{CBR} de 20 %, le sol de Samo donne une densité sèche de 1,82 et celui de Songon 1,66. Songon a une portance plus élevée que Samo. Les deux échantillons sont saturés en eau au moment de la mesure de leur valeur CBR. Ce constat qui pourrait s'expliquer par leur sensibilité à l'eau ou plus précisément par la variation de leur comportement en fonction de sa teneur en eau et la

répartition des grains. Néanmoins des expériences complémentaires méritent d'être réalisées pour une meilleure compréhension. En outre Les portances à 95 % de l'optimum Proctor modifié (OPM) des sols de Samo et Songon sont respectivement de 20 % et 21 %.

3.2.6 ETUDE DE LA POSSIBILITÉ D'UTILISATION DES SOLS FINS LATÉRIQUES EN CONSTRUCTION ROUTIÈRE

La classification des sols a pour but d'aboutir à la définition de classes ayant des comportements proches vis à vis des problèmes de mise en œuvre tant en remblai qu'en couche de forme. Pour faciliter le choix d'un sol comme matériau utilisable pour la conception d'assise de route, les ingénieurs ont à leurs dispositions différents systèmes de classification. Le système de classification AASHO (American Association State Highways Officials) classe les sols de Samo et de Songon respectivement dans les groupes A-2-7 et A-7-6, et le système USCS (Unified Soil Classification System) classe les deux sols dans la famille CL c'est-à-dire une argile de faible plasticité. Par contre, le système de classification GTR (Guide des Terrassements Routier) classe les sols de Samo et de Songon respectivement dans les groupes B6 et A2 [18], [19], [20]. Tous ces trois systèmes de classification repartissent ces deux sols dans deux groupes différents suivant les grandeurs géotechniques qui sont la granulométrie et les limites d'Atterberg. Ainsi, ces différentes classes se justifient par le fait que les sols de Samo et de Songon ont au moins un D_{max} identique de 5 mm et une proportion de fines, une limite de liquidité et un indice de plasticité respectif de 33 %, 46,2 %, 23 % et 46 %, 48,6 %, 19,3 %. Par contre la classification du LBTP met les sols de Samo et de Songon dans le groupe G3 des sols pour plate-forme [1]. Les graveleux latéritique de la région de Bouenza au Congo-Brazzaville n'obéissent pas à la classification des sols latéritique du CEBTP 1984. Cependant ils sont classé A-2-6 et B5 respectivement dans les classifications HRB et GTR [21]

Selon les études faites par [21], les matériaux utilisés en couche de base doivent avoir des densités sèches supérieures respectivement à 2 et un CBR à 95% OPM ≥ 60 et ceux utilisé en couche de fondation doivent avoir des densités sèches supérieures 1,90 et un CBR à 95% OPM ≥ 25 selon les types de trafic. Les valeurs d'indice CBR à 95 % de l'optimum Proctor et de densité sèche optimal sont de 20 %; 1,83 et 21 %; 1,67 respectivement pour les sols de Samo et de Songon. Ces sols ne peuvent être utilisés à l'état naturel ni en couche de fondation ni en couche de base quel que soit le type de trafic. Cependant selon les recommandations du CEBTP (1980), les sols de Samo et de Songon peuvent servir pour le remblai (figure 9).

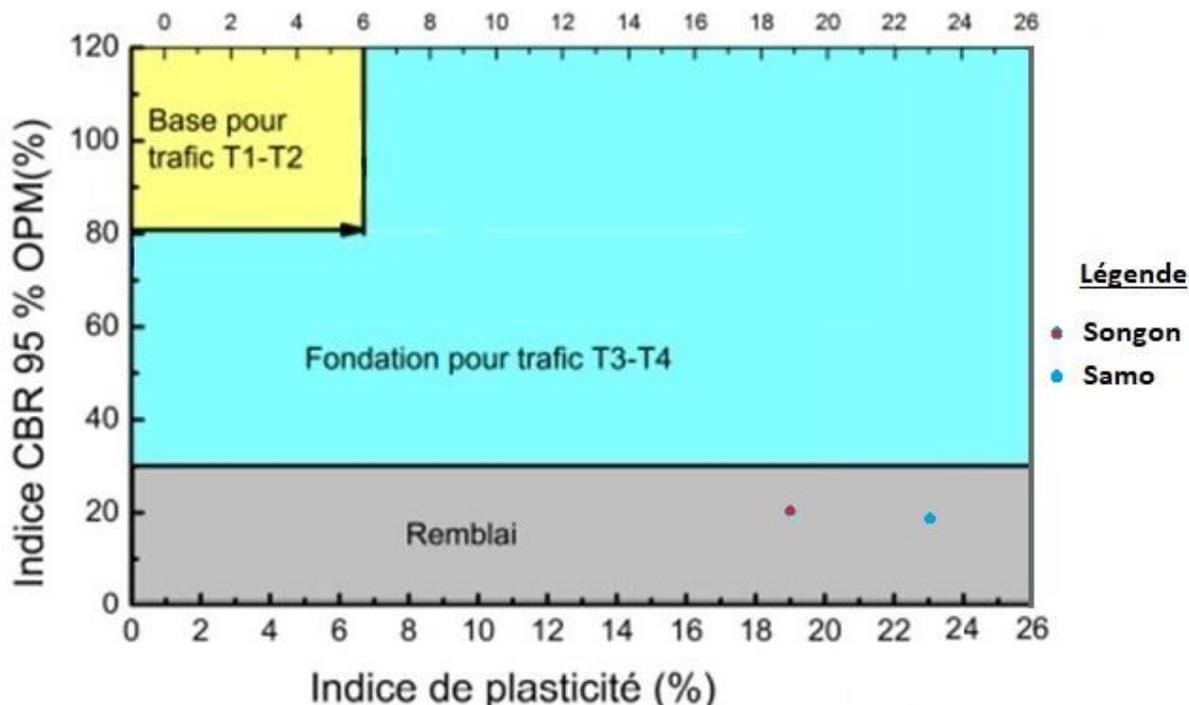


Fig. 9. Utilisation des sols en construction routière en fonction de l'indice portant CBR, et l'indice de plasticité

3.3 COMPARAISON DES SOLS DE SAMO ET SONGON AUX LATÉRITES FORMÉS SUR DES ROCHES MAGMATIQUE ET MÉTAMORPHIQUE

Les sols latéritiques utilisés en construction routière sont complexe et très hétérogène c'est pourquoi selon [22] il n'existe pas de consensus international sur leur définition. Aussi pour éviter les erreurs de conception des routes liées à l'emploi de ces sols latéritiques, à cause l'évolution de ces derniers au fil du temps, certains auteurs préconisent d'associer aux caractéristiques géotechniques et mécaniques des données géologiques [23], [24]. En effet ils démontrent que la qualité des sols latéritiques dépend de la roche dont ils sont issus c'est-à-dire de l'origine et de leur mode de formation. Le tableau 9 résume les caractéristiques géologiques et géotechniques des sols de Samo et de Songon. La comparaison des données de ce tableau à ceux du tableau 1 montre de façon générale que les propriétés géotechniques sont très variables d'une latérite à une autre même lorsqu'elles appartiennent au même groupe de la classification AASHTO. De même les sols latéritiques, produits d'altération de type varié de roches, ne sont pas différenciable à vue d'œil. En outre un même type de roche sous un même climat peut engendrer des matériaux d'altération varié. Cette diversité de matériaux s'explique selon [25] par la capacité qu'a, avec le temps, la nature d'extraire séparément ou bien de combiner les différents éléments que sont: la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃), le fer (Fe₂O₃) et les cations tels que le magnésium, le potassium, le calcium, et le sodium. Le climat et la topographie agissent ensemble et sont susceptible de concentrer ces éléments. Les climats humides concentrent sur place les éléments insolubles dans l'eau (aluminium, fer oxydé) et évacuent en bas de pente les éléments solubles (cations et silice). Il s'en suit d'importantes variations locales de pH ce qui a un effet de feedback et renforce la différenciation du fonctionnement chimique selon la position topographique. Il est donc difficile voire impossible de différencier les latérites à partir de leur origine. Par conséquent, leur caractéristique est étroitement liée à la spécificité de leurs évolutions et du niveau d'évolution. La diversité des sols latéritiques utilisés dans la réalisation d'un même tronçon de route est à la fois un avantage et un handicap à la durabilité des routes.

Tableau 9. Optimum Proctor des sols de Samo et de Songon

Caractéristiques			Samo	Songon
Géologiques	Type de roche		sédimentaire	sédimentaire
	Composition minéralogique	Quartz	73	58
kaolinite		27	42	
Géotechniques	Analyse granulométrique	<80 μm	33	46
		C _{80μm} *IP	759	887,8
	Optimum Proctor	D _{opt}	1,89	1,83
		W _{opt}	15,2	13,3
	CBR à 95 %	I _{CBR}	20	21
	Classification AASHTO		A-2-6	A-2-6
	Limites d'Atterberg	WL	46,2	48,6
		WP	23,2	29,3
IP		23	19,3	

4 CONCLUSION

L'application des analyses géotechniques aux sols de fin du bassin sédimentaire ivoirien (le continental terminal ou terre de barre) en vue de son emploi en construction routière permet de faire les remarques suivantes :

1. Du point de vue chimique et minéralogique, les sols de Samo et de Songon sont très riches en SiO₂, FeO₂, et en Al₂O₃. L'analyse par diffraction aux rayons X indique qu'ils sont composés essentiellement de minéraux de quartz 73 % et 58 % et de kaolinite 27 % et 42 % respectivement pour le sol de Samo et Songon et ont une teneur en matière organique inférieure à 1 %. Ils ne correspondent pas aux sols latéritiques au sens stricte de l'appellation car présentant un rapport S/R supérieur à 2.
2. Le sol de Samo a une texture sablo-argileuse. Il est composé de 5 % de gravier, 62 % de sable, 11 % de limon et 22 % d'argile. C'est un sol plastique, moyennement argileux avec une limite de liquidité de 46 % et un indice de plasticité de 23 %. Il est sensible à l'eau et a une valeur au bleu de méthylène de 0,2.

3. Le sol de Songon a une texture limono-sablo-argileux. Il est constitué de 5 % de graviers, 49 % de sable, de 22 % de limon et 24 % d'argile. Il est plastique, moyennement argileux et a une limite de liquidité de 48 % et un indice de plasticité de 19 %. C'est un sol sensible à l'eau avec une valeur au bleu de 0,5.
4. Selon le système de classification GTR, le sol de Songon appartient à la sous classe A₂, c'est-à-dire des sables fins argileux et celui de Samo a la sous classe B₆ de sable et grave argileux à très argileux.
5. Au point de vue mécaniques le sol de Samo donne une teneur en eau optimum de 15,2 % une densité sèche de 1,89 g/cm³ et un indice CBR après 4 jours d'immersion, à 95 % de l'optimum Proctor de 20 % alors que celui de Songon conduit à une teneur en eau optimum de 16,7 % une densité sèche de 1,83 g/cm³ et un indice CBR après 4 jours d'immersion, à 95 % de l'optimum Proctor de 21 %.
6. Selon les recommandations du CEBTP et quel que soit le type de trafic, les paramètres mécaniques déterminés sur les sols de Samo et Songon ne permettent pas de les utiliser comme couche de fondation et de base pour les assises de route.

Les sols fins du bassin sédimentaire ivoirien de Samo et de Songon ne sont pas de latérite. Cependant leur transformation peut évoluer leur donne des traits de sol latéritique. Ils ne peuvent pas à l'état naturel être employé comme matériaux pour la réalisation l'assise de route mais pour le remblai. Ces sols doivent être renforcés soit avec un liant chimique soit avec des concassés de roche dans des proportions qu'il faut déterminer avant de les utiliser pour construction routière.

REFERENCES

- [1] LBTP Côte d'Ivoire, «Critères d'utilisation des graveleux latéritiques naturels en couche de base et couche de fondation», *Rapport LBTP*, 52p, 1977.
- [2] A. Nzabakurikiza, V. L. Onana, A. N'go Ze, A. T. N. Mvindi, G. E. Ekodeck, «Geological, geotechnical, and mechanical characterization of lateritic gravels from eastern Cameroon for road construction purposes», *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76,1549-1562, 2017.
- [3] Kamtchueng, (2005) «Evaluation géotechnique, chimique et minéralogique des sols latéritiques en zone tropicale humide (MFOU, centre-Cameroun): implications pour la route».
- [4] NF P 94-056, «Analyse granulométrique par tamisage», *Association Française de Normalisation (AFNOR)*, 1996.
- [5] NF P 94-057, «Analyse granulométrique des sols. Méthode par sédimentation». *Association Française de Normalisation (AFNOR)*, 1992.
- [6] NF P94-051, «Détermination des limites d'Atterberg», *Association Française de Normalisation (AFNOR)*, 15p, 1993.
- [7] NF P94-068. «Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche», *Association Française de Normalisation (AFNOR)*.
- [8] NF P94-093, «Détermination des références de compactage d'un matériau», *Association Française de Normalisation (AFNOR)*, 17p, Octobre 1999.
- [9] NF P94-078, «Indice CBR après immersion- Indice CBR immédiat- Indice Portant Immédiat», *Association Française de Normalisation (AFNOR)*, 14p, Décembre 1992.
- [10] Millogo Y. «Étude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuses et latéritiques du Burkina Faso améliorées aux liants hydrauliques: application au génie civil (Bâtiment et route) ». Thèse de doctorat, Université de Ouagadougou, 144 pages, 2008.
- [11] Mbumbia L., Mertens de Wilmars A., Tirlocq J., «Performance characteristics of lateritic soil bricks fired at low temperatures: a case study of Cameroun», *Construction and Building Materials* 14, pp, 121-131, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00024-6](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00024-6).
- [12] Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F, «Construire en terre», Editions Alternatives et Parallèles, collection An Architecture, Paris, France, 265p, 1979.
- [13] LCPC-SETRA., VIN P., «Conception et dimensionnement des structures de chaussée. Guide technique», Paris, 1994.
- [14] GTR. «Réalisation des Remblais et des Couches de Forme. Guide technique - Fascicule I: Principes généraux - Fascicule II: Annexes techniques». Setra/LCPC, Réf. D9233, septembre 1992.
- [15] Autret, P. «Contribution à l'étude des graveleux latéritiques traités au ciment». Thèse de doctorat, Ecole National des Ponts et Chaussées, Paris, 434p, 1980.
- [16] Robert, P., and Clifford, D. «A critique of the Schellmann definition and classification of laterite». *CATENA*, pp, 117-131, 2002.
- [17] Souley Issiakou, M. «Caractérisation et valorisation des matériaux latéritiques utilisés en construction routière au Niger», Université de Bordeaux, 2016.

- [18] Tardy, Y. «Pétrologie des latérites et des sols tropicaux». *Masson, Paris*, 1993.
- [19] Gurtug Y Sridharan A., «Compaction Behaviour and Prediction of its Characteristics of Fine Grained Soils with Particular Reference to Compaction Energy»; *Soils and Foundations*, 44, 5, 2004, pp, 27-36, 2018.
- [20] Horpibulsuk S., Katkan W., Naramitkornburee A., «Modified Ohio's Curves: A Rapid Estimation of Compaction Curves for Coarse- and Fine-Grained Soils,» *Geotechnical Testing Journal* 32, no. 1, pp, 64-75, 2009.
<https://doi.org/10.1520/GTJ101659>.
- [21] Ahouet L., «Amélioration des propriétés géotechniques du graveleux latéritique par ajout de la grave alluvionnaire concassée 0/31,5».
- [22] Paige-Green P., Pinard M., Netterberg F., «A review of specification for lateric materials for low volume roads», *Transportation Geotechnics*, 5, pp, 56-98, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.10.002>
- [23] Kamtchueng T. B., Onana V. L., Fantong W. Y., Ueda A., Ntouala R. F. D., Wongolo M. H. D., Ndongo G.B., Ngo'o Ze A., Kamgang V. K. B., «Geotechnical, chemical, and mineralogical evaluation of lateritic soils in humid tropical area (Mfou, Central-Cameroon): implications for road construction», *International Journal of Geo-Engineering*, 6, 1, 2015.
<https://doi.org/10.1186/s40703-014-0001-0>.
- [24] Onana V. L., Nzabakurikiza A., Ndome E. E., Likiby B., Kamgang K. V., Ekodeck G. E., «Geotechnical, mechanical and geological characterization of lateritic gravels of Boumpial (Cameroon) used in road construction, *Journal of the Cameroon Academy Sciences*, vol 12, 1, pp; 45-54, 2015.
- [25] Legros J. P., «latérites et autres sols des régions intertropicales», *Académie des Sciences et des Lettres de Montpellier*, Bulletin n°44, pp, 369-382, 2013.