Étude de l'amélioration de latérites du Sénégal par ajout de sable

Massamba NDIAYE
Université Paris-Est, IFSTTAR, Marne-la-Vallée
École Polytechnique de Thiès, Sénégal
Jean-Pierre MAGNAN
Université Paris-Est, IFSTTAR, Marne-la-Vallée
Ibrahima Khalil CISSÉ
École Polytechnique de Thiès, Sénégal
Lamine CISSÉ
Agence des Travaux et de Gestion des Routes (AGEROUTE), Sénégal

RÉSUMÉ

Le mélange des latérites avec des matériaux granulaires comme du sable ou des matériaux concassés permet d'améliorer leurs propriétés pour les rendre compatibles avec une utilisation routière. L'article rend compte des essais effectués sur deux latérites du Sénégal, traitées par ajout de sable de dune, et dont les caractéristiques sont comparées aux spécifications du CEBTP de 1972 pour les routes à faible trafic en zone tropicale. La lithostabilisation avait pour objectif de diminuer l'indice de plasticité, tout en conservant la valeur de l'indice CBR et en vérifiant que la courbe granulométrique reste dans le fuseau spécifié pour une utilisation en couche de fondation ou couche de base de route à faible trafic. L'étude montre que l'indice CBR réagit différemment d'une latérite à l'autre et commente l'évolution possible des spécifications pour tenir compte de l'expérience des dernières décennies.

Study of the improvement of laterites from Senegal by addition of sand

ABSTRACT

Mixing laterites with granular materials as sand or crushed materials is a way to improve their properties and make them suitable for use in road construction. This article reports experiments made on two laterites from Senegal, treated by adding sand. Their characteristics are compared with the 1972 CEBTP specifications for low traffic roads in tropical regions. Lithostabilisation aimed at decreasing the plasticity index, while preserving the CBR index and keeping the grading curve inside the limits specified for use in foundation or base layer of low traffic roads. The study showed that CBR index reaction to sand addition varies from a laterite to the other. Possible evolutions of CEBTP specifications to account for the experience of last decades are discussed.

1. INTRODUCTION

Les latérites ou sols latéritiques sont une grande famille de sols typiques des régions tropicales humides et qui résultent d'un processus d'altération d'une roche-mère qui s'appauvrit en silice et s'enrichit en fer et en alumine sous forme d'oxydes Fe_2O_3 et Al_2O_3. Ces sols sont très utilisés en construction routière dans les pays d'Afrique tropicale et équatoriale, au sud du Sahara, et en Amérique du sud, qu'il s'agisse de graveleux latéritiques, d'argiles latéritiques, de carapaces ou de cuirasses latéritiques (Bohi, 2008).

Dans les pays francophones d'Afrique, les règles d'utilisation des graveleux latéritiques en couches de chaussée ont été formulées par le CEBTP et les laboratoires nationaux des pays africains francophones (CEBTP, 1972, 1984) et sont encore utilisées dans ces différents pays avec parfois des modifications locales. Les règles d'emploi des sols latéritiques y sont liées à la catégorie des routes à construire et aux trafics de projet sur ces routes. Elles sont exprimées en termes de fuseau granulométrique, d'indice de plasticité, d'optimum Proctor modifié et d'indice CBR et n'ont pas été révisées au cours des trente dernières années, faute d'informations précises sur les trafics réellement supportés par les routes que l'on puisse relier au comportement observé des couches de chaussées.

Les sols latéritiques situés aux endroits les plus proches du tracé d'un projet routier sont généralement ceux que l'on utilise en couches de chaussée. Cependant, dans le cas où ces sols ne satisfont pas les spécifications d'utilisation en couches de chaussée définies dans les textes de référence (CEBTP, 1972, en général), la lithostabilisation, c'est-à-dire l'ajout d'un matériau granulaire connu, peut être une solution économique.

Cet article présente des essais et réflexions sur la lithostabilisation de graveleux latéritiques en provenance des carrières de Lam-Lam et de Sindia au Sénégal, pour des routes à faible trafic. Il analyse aussi des données d'autres origines et suggère des travaux complémentaires, qui doivent être réalisés à l'échelle du continent, peut-être sous l'impulsion des laboratoires membres de l'ALBTP (Association Africaine des Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics).

2. LITHOSTABILISATION DES LATÉRITES DE LAM-LAM ET SINDIA

2.1. Introduction

L'étude de l'ajout de sable pour améliorer les propriétés des sols latéritiques de Lam-Lam et Sindia a été effectuée à la demande des entreprises partenaires du travail de thèse du premier auteur pour évaluer les possibilités de mélanges de matériaux présents dans la zone de travaux routiers en cours au Sénégal. La référence pour ces études est constituée par les recommandations du CEBTP (1972).

2.2. Étude de la lithostabilisation de la latérite de Lam-Lam

› 2.2.1 Caractérisation de la latérite d'origine

Les latérites testées proviennent de dix prélèvements en différents endroits de la carrière de Lam-Lam (Sénégal) identifiés par les codes L_1 à L_{10}. Des essais de laboratoire ont été effectués sur ces différents prélèvements afin de déterminer leurs caractéristiques géotechniques et leurs résultats sont rassemblés dans le **tableau 1**.

Afin de procéder aux études de lithostabilisation, deux mélanges ont été constitués à partir de ces prélèvements, de la façon suivante :

- le mélange ML_1 est constitué des prélèvements dont les indices CBR sont inférieurs à 60, à savoir L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6 et L_9 ;
- le mélange ML_2 est constitué des prélèvements dont les indices CBR sont supérieurs à 60, à savoir L_7, L_8 et L_{10}.

tableau 1
Caractéristiques géotechniques des latérites de Lam-Lam.

Identification des prélèvements	Analyse granulométrique (%)			Indice de plasticité (I_p)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95 % OPM
	0,08 mm	2 mm	10 mm		w_{OPM} (%)	ρ_d (g/cm³)	
L_1	6,9	17,2	53,6	17,7	12	2,06	45
L_2	8,4	14,4	51	23,4	10,8	1,91	35
L_3	5,3	15	55,2	20,4	10	2,01	35
L_4	9,3	24,1	57,9	17,4	10,3	1,97	40
L_5	8,9	21,4	56,4	17,1	10,6	1,98	40
L_6	8,3	20,2	60,1	18,3	10,1	2,09	50
L_7	8,5	19,6	63,5	24,0	12,5	2,03	70
L_8	7,9	17,3	65,2	24,7	10,9	1,96	70
L_9	9,7	22,5	71,3	19,1	12,1	1,93	55
L_{10}	11,4	27,1	62,1	18,9	12	2,02	70

Les caractéristiques géotechniques de ces mélanges sont présentées dans le **tableau 2**.

Les courbes granulométriques de ces mélanges entrent dans les fuseaux spécifiés par le CEBTP (1972) pour une utilisation en couches de fondation et de base pour routes à faible trafic **(figures 1 et 2)**.

L'utilisation des matériaux en couche de fondation et en couche de base est également conditionnée par la valeur de l'indice de plasticité (I_p). Les valeurs correspondant à un trafic faible ($N < 5.10^5$ soit 300 véhicules par jour) sont reproduites dans le **tableau 3** avec les valeurs mesurées sur les deux mélanges ML_1 et ML_2.

tableau 2
Caractéristiques géotechniques des mélanges ML_1 et ML_2.

Identification des mélanges	Analyse granulométrique (%)			Indice de plasticité (I_p)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95 % OPM
	0,08 mm	2 mm	10 mm		w_{OPM} (%)	ρ_d (g/cm³)	
ML_1	10,7	25,7	67,1	23,2	11	2,05	51
ML_2	11	26,5	69,6	22,1	11	2,01	70

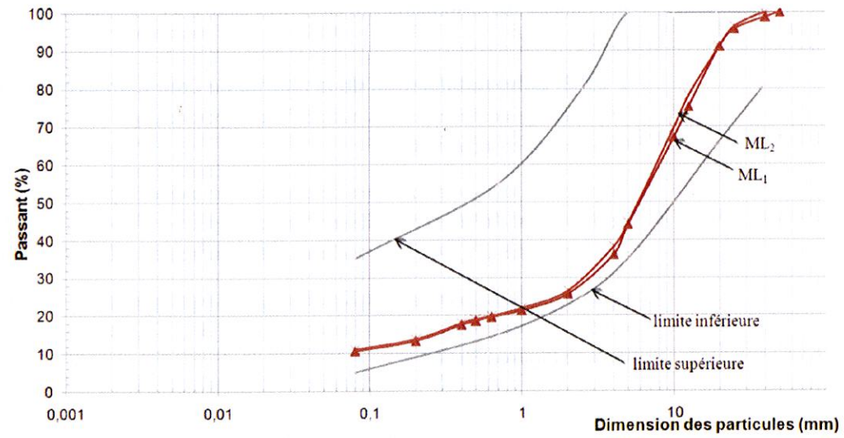


figure 1
Représentation des courbes granulométriques de ML_1 et ML_2 et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de fondation de route à faible trafic.

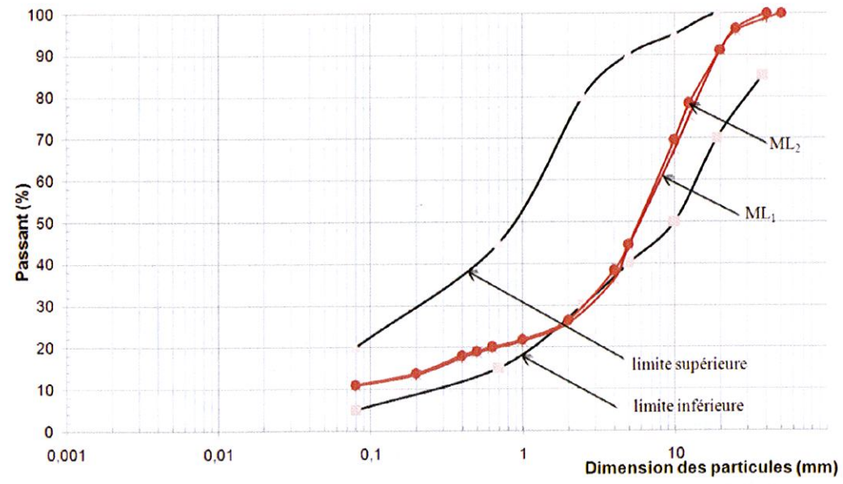


Figure 2
Représentation des courbes granulométriques de ML_1 et ML_2 et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de base de route à faible trafic.

tableau 3
Comparaison des valeurs de limites d'Atterberg et d'indice CBR avec les valeurs seuils des spécifications du CEBTP (1972).

Mélanges et spécifications CEBTP (1972)	Indice de plasticité (I_p)	I_{CBR} à 95 % OPM
ML_1 : mesure	23,2	51
ML_2 : mesure	22,1	70
Couche de fondation : spécification	< 25	> 30
Couche de base : spécification	< 15	> 60

Par conséquent, les deux mélanges peuvent être utilisés en couche de fondation mais aucun en couche de base, à cause de leur plasticité trop élevée et de la valeur trop faible de l'indice CBR du mélange ML_1.

› 2.2.2. Propriétés du sable de Keur Massar utilisé pour la lithostabilisation

Pour rendre les mélanges ML_1 et ML_2 conformes aux spécifications pour les couches de base de routes à faible trafic ($N < 5.10^5$), le mélange de la latérite avec différents pourcentages de sable de dune provenant de la carrière de Keur Massar a été étudié.

Le sable de Keur Massar est un sable quasi-homométrique **(figure 3)**, dont les particules ont des dimensions majoritairement comprises entre 0,4 et 0,6 mm, avec une faible valeur de bleu de 0,12 g/100 g.

› 2.2.3. Lithostabilisation de la latérite de Lam-Lam avec le sable de Keur Massar

Des mélanges ont été réalisés avec différents pourcentages de sable (5 % à 30 %) **(figure 4)** puis caractérisés en laboratoire.

La première analyse a consisté à déterminer leur indice de plasticité. L'étude a montré qu'un ajout de 30 % de sable permet d'abaisser l'indice de plasticité en-dessous de la valeur de 15 recommandée par le CEBTP (1972) en couche de base pour route à faible trafic **(tableau 4)**.

Après ajout de 30 % de sable de Keur Massar, les courbes granulométriques des mélanges ML_1 + sable et ML_2 + sable restent dans les fuseaux du CEBTP (1972) pour la couche de fondation et la couche de base **(figures 5 et 6)**.

Les résultats des essais Proctor modifié et CBR réalisés sur les mélanges de latérite et de sable sont présentés dans le **tableau 5**. On observe que l'ajout de sable nécessaire pour abaisser l'indice de plasticité (I_p) en dessous de 15 entraîne une diminution de l'indice CBR pour les deux mélanges

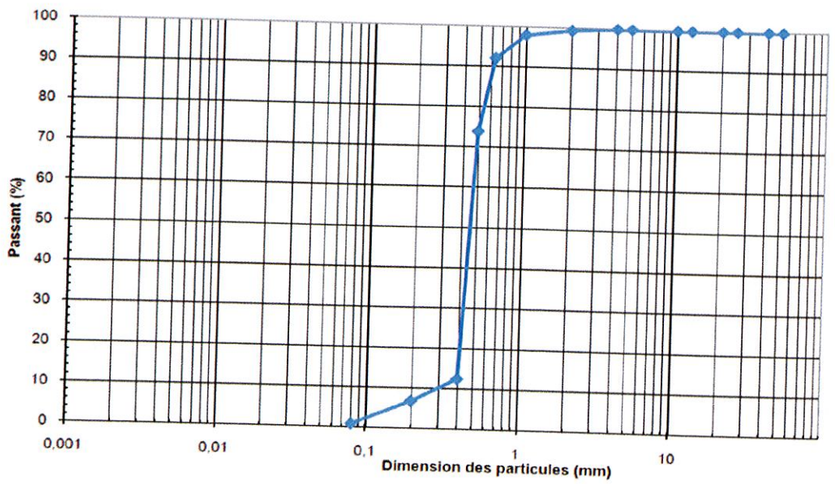


figure 3
Courbe granulométrique du sable de dune de Keur Massar.

figure 4
Études de lithostabilisation.

tableau 4
Variations de l'indice de plasticité en fonction de la quantité de sable ajoutée.

Identification des mélanges	Pourcentage d'ajout de Keur Massar					
	0 %	5 %	10 %	15 %	20 %	30 %
ML_1 + Sable dune	23,2	20,9	20,2	19,5	17,1	11,8
ML_2 + Sable dune	22,1	19,1	18,1	17,7	17,5	12,9

(ML_1 et ML_2) de la latérite de Lam-Lam. Seul le mélange ML_2 + sable vérifie la condition d'utilisation en couche de base.

On note que l'ajout de sable à la latérite de Lam-Lam a un effet bénéfique sur l'indice de plasticité mais fait diminuer l'indice CBR.

■ 2.3. Étude de la lithostabilisation de la latérite de Sindia

Pour compléter ces études, un autre prélèvement en provenance de la carrière de Sindia (S_9) a été lithostabilisé avec le même sable de dune de Keur Massar.

› 2.3.1. Caractéristiques de la latérite de Sindia

Les caractéristiques géotechniques du prélèvement S_9 sont présentées dans le **tableau 6**.

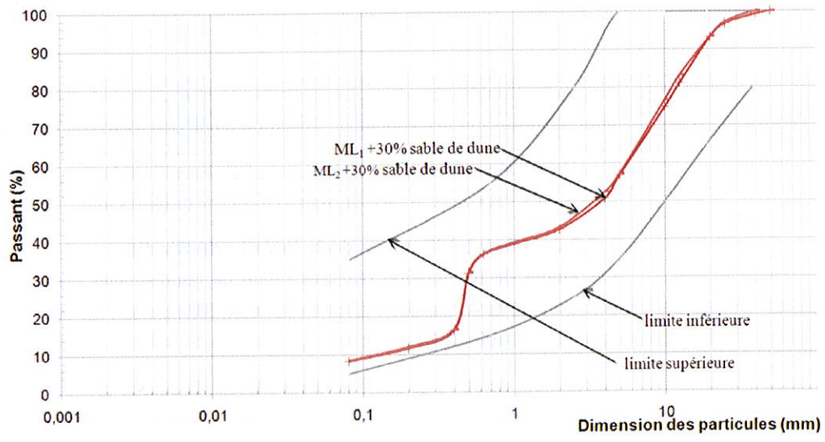


figure 5
Représentation des courbes granulométriques de ML_1 + 30 % de sable et ML_2 + 30 % de sable et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de fondation de route à faible trafic.

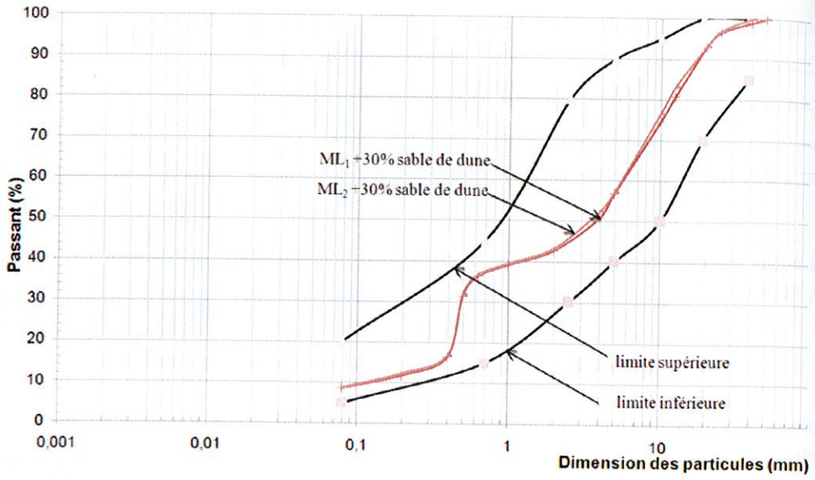


figure 6
Représentation des courbes granulométriques de ML_1 + 30 % de sable et ML_2 + 30 % de sable et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de base de route à faible trafic.

tableau 5
Synthèse des études de lithostabilisation.

Identification des mélanges	Analyse granulométrique (%)		Indice de plasticité (I_p)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95 % OPM
	0,08 mm	2 mm		w_{OPM} (%)	ρ_d (g/cm³)	
ML_1	10,7	25,7	23,2	11	2,05	51
ML_1 + 30 % sable de dune	8,4	42,7	11,8	10,3	2,12	40
ML_2	11	26,5	22,1	11	2,01	70
ML_2 + 30 % sable de dune	8,7	43,3	12,9	8,5	2,07	65

tableau 6
Caractéristiques géotechniques du prélèvement de latérite de Sindia (S_9).

Identification du prélèvement	Analyse granulométrique (%)			Indice de plasticité (I_p)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95 % OPM
	0,08 mm	2 mm	10 mm		w_{OPM}(%)	ρ_d (g/cm³)	
S_9	16,5	37,1	75,9	16,4	10,1	2,17	70

La courbe granulométrique de ce prélèvement entre dans les fuseaux spécifiés par le CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de fondation ou de base pour routes à faible trafic **(figures 7 et 8)**.

Ces résultats montrent que le prélèvement S_9 est utilisable en couche de fondation à trafic faible ($N < 5.10^5$). Par contre, il est inutilisable en couche de base à trafic faible en raison de sa forte plasticité.

› 2.3.2. Lithostabilisation de la latérite de Sindia

Les études de formulation réalisées (ajout de pourcentages croissants de sable et mesure de la consistance) montrent que l'ajout de 10 % de sable permet d'abaisser l'indice de plasticité en dessous de 15 **(tableau 7)**.

Après ajout de 10 % de sable de Keur Massar, la courbe granulométrique du mélange S_9 + sable reste dans les fuseaux du CEBTP (1972) pour la couche de fondation et la couche de base pour route à faible trafic **(figures 9 et 10)**.

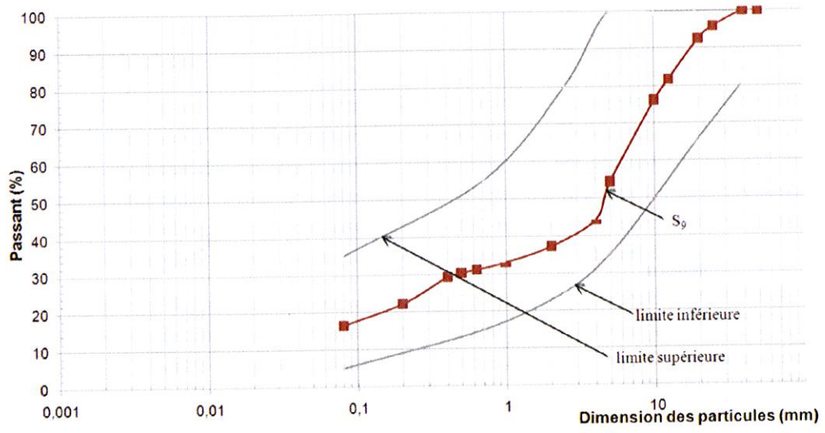


figure 7
Représentation de la courbe granulométrique de S_9 et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de fondation de route à faible trafic.

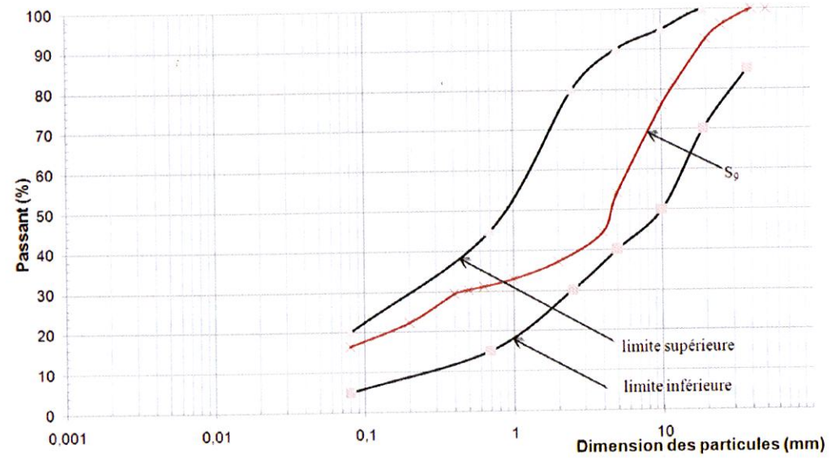


figure 8
Représentation de la courbe granulométrique de S_9 et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de base de route à faible trafic.

tableau 7
Influence de l'ajout de sable sur l'indice de plasticité.

Identification du mélange	Pourcentage d'ajout de sable de dune		
	0 %	5 %	10 %
S_9 + Sable de dune	16,4	15,5	13,1

Les résultats des essais Proctor modifié et CBR montrent que l'apport d'environ 10 % de sable pour abaisser l'indice de plasticité (I_p) en dessous de 15 entraîne une augmentation de l'indice CBR **(tableau 8)**.

On observe cette fois que l'ajout du même sable produit une augmentation de l'indice CBR. Cette évolution différente mériterait des études complémentaires.

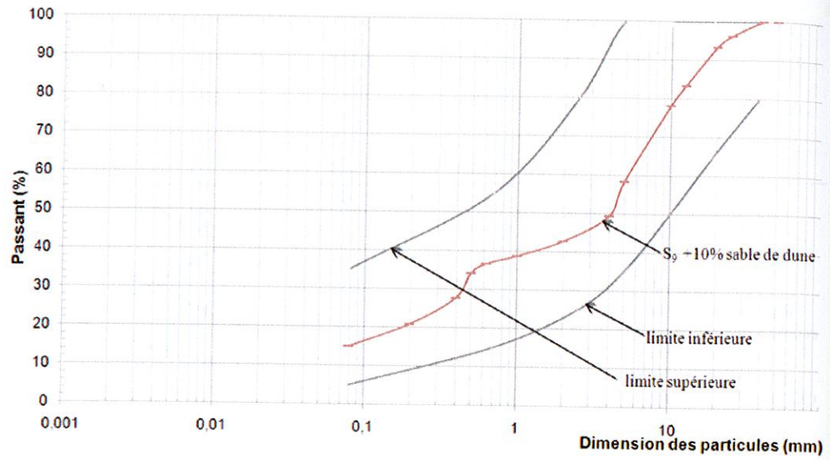


figure 9
Représentation de la courbe granulométrique de S_9 + sable de dune et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de fondation de route à faible trafic.

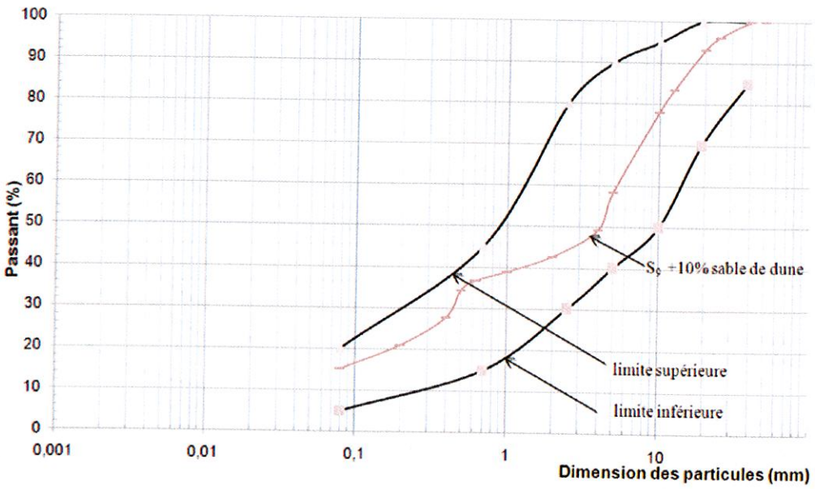


figure 10
Représentation de la courbe granulométrique de S_9 + sable de dune et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de base de route à faible trafic.

Identification des mélanges	Analyse granulométrique (%)		Indice de plasticité (I_P)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95 % OPM
	0,08 mm	2 mm		w_{OPM} (%)	ρ_d (g/cm³)	
S_9	16,5	37,1	16,4	10,1	2,17	70
S_9+10 % Sable de dune	15,1	42,8	13,1	9,8	2,12	85

tableau 8
Synthèse des études de lithostabilisation.

3. RÉFLEXIONS SUR LA LITHOSTABILISATION

3.1. Introduction

L'ajout de sable à un sol latéritique pour modifier ses propriétés d'usage se réfère nécessairement à des spécifications des propriétés d'usage. Ces spécifications s'appuient sur l'évaluation du comportement à long terme des matériaux vérifiant les critères dans des chaussées soumises à un trafic connu. Comme nous l'avons noté plus haut, les critères utilisés dans les pays francophones d'Afrique tropicale et équatoriale sont assez anciens et ils n'ont probablement pas évolué faute de connaître le trafic réel sur les chaussées qui ont été observées et entretenues depuis.

L'étude des latérites de Lam-Lam et Sindia au Sénégal fait référence aux règles du CEBTP de 1972 et se limite à des objectifs limités en termes de trafic (trafic faible). L'étude du LNBTP du Burkina Faso (Toe, 2007) montre une autre application de la lithostabilisation pour le renforcement d'une latérite pour la route nationale 4 de ce pays, par mélange du sol latéritique avec un granite concassé de classe granulaire 0/31,5. Thilloux et Requirand (1983) rapportent les travaux d'exécution des chaussées de la route Tahoua-Arlit au Niger, pour lesquels la lithostabilisation avec 33 % de calcaire concassé a été largement utilisée et citent des utilisations antérieures de cette technique au Burkina-Faso (alors Haute-Volta) sur la route Ouagadougou-Kedougou (30 % de granite concassé) et en Guyane, entre Organabo et Saint-Laurent, avec des granulats semi-concassés, provenant de granulats dragués dans le Maroni. Ces auteurs insistent sur le fait que des années d'observations sont nécessaires avant de pouvoir confirmer les résultats des études sur le long terme. Mais il faut aussi connaître (donc mesurer) le trafic réel sur ces routes.

La présentation de Toe (2007) est résumée ci-après, parce qu'elle suggère des pistes pour comprendre et mieux concevoir la lithostabilisation.

Une autre étude publiée en 2012 sur la lithostabilisation d'une latérite du Cameroun, mais semble-t-il sans application de chantier, pose le problème de la référence pour les décisions de chantier. Elle est également résumée dans ce qui suit, avant de revenir sur le choix des références pour les matériaux des couches de base et de fondation des chaussées.

3.2. Lithostabilisation d'un graveleux latéritique avec du granite concassé (Toe, 2007)

Le LNBTP du Burkina Faso (Toe, 2007) décrit la conception et la mise en œuvre d'un matériau appelé « lithostab », issu du mélange d'un graveleux latéritique et d'un granite concassé destiné à renforcer la fraction grossière du matériau. Ce matériau, d'usage ancien dans ce pays, puisqu'il est cité dans une note du LNBTP de Haute Volta de 1978 (Bibliographie des recommandations du CEBTP, 1984), a été mis en œuvre en couche de 15 à 25 cm sous une chaussée constituée à partir de la surface de 5 cm de béton bitumineux semi-grenu 0/10, de 10 à 11 cm de grave bitume 0/14 et d'un enduit monocouche 6/10 de protection.

La courbe granulométrique du graveleux latéritique est représentée sur la **figure 11**, avant et après compactage. Les auteurs notent que le compactage a augmenté de 4 % la teneur en fines. L'indice CBR du graveleux latéritique vaut en moyenne 65 à 95 % de l'OPM et 104 à 98 % de l'OPM.

Ce graveleux latéritique a été renforcé par l'ajout de granulat de granite concassé de classe granulaire 0/31,5, dont le pourcentage de fines varie entre 0 et 11 % **(figure 12)**.

Les propriétés du mélange du graveleux latéritique avec des pourcentages de 20 %, 25 %, 30 %, 35 % et 40 % de concassé granitique 0/31,5 sont rassemblées sur la **figure 13**. Cette figure montre que l'indice CBR à 98 % de l'OPM passe par un maximum pour un ajout de 30 % de concassé granitique. Ce pourcentage de 30 %, qui se retrouve dans presque tous les mélanges optimaux, mériterait une étude complémentaire.

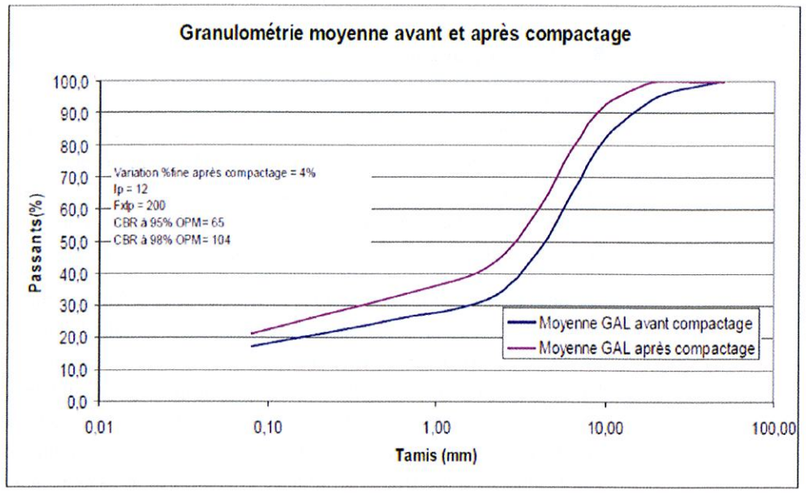


figure 11
Représentation des courbes granulométriques du graveleux latéritique du Burkina Faso (Toe, 2007) avant et après compactage.

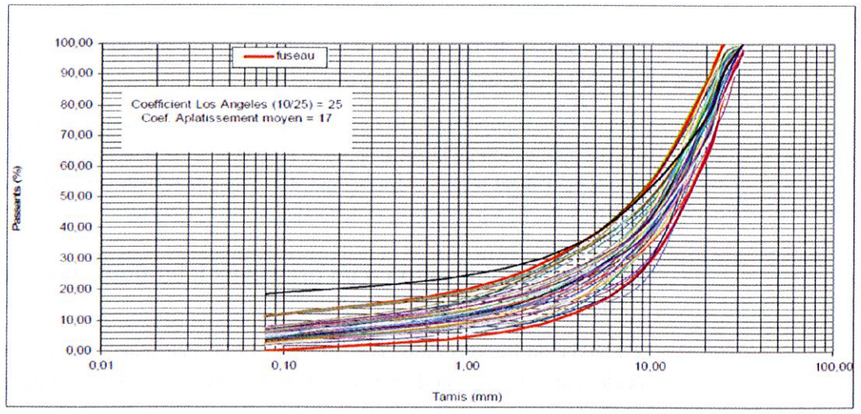


figure 12
Représentation des courbes granulométriques du concassé granitique utilisé par le LNBTP (Toe, 2007).

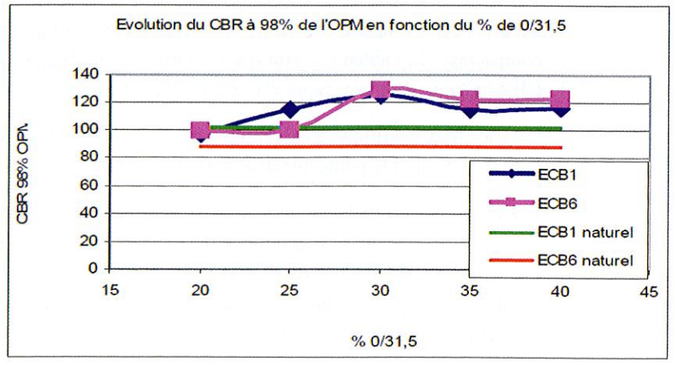


figure 13
Évolution de l'indice CBR des mélanges étudiés par le LNBTP du Burkina Faso (Toe, 2007).

3.3. Lithostabilisation d'une latérite du Cameroun (Madjadoumbaye et al., 2012)

La latérite décrite par Madjadoumbaye et al. (2012) a été prélevée à Yaoundé (Cameroun). Pour prolonger l'étude effectuée sur les latérites du Sénégal, sa courbe granulométrique notée L_C est représentée sur les **figures 14 et 15** avec les fuseaux du CEBTP (1972). Ses caractéristiques à l'état « naturel » sont indiquées dans le **tableau 9**. La valeur de l'indice CBR à 95 % de l'OPM a été déduite des courbes de l'article, en admettant qu'elle correspond à un compactage à 25 coups pour la préparation de l'éprouvette dans le moule CBR.

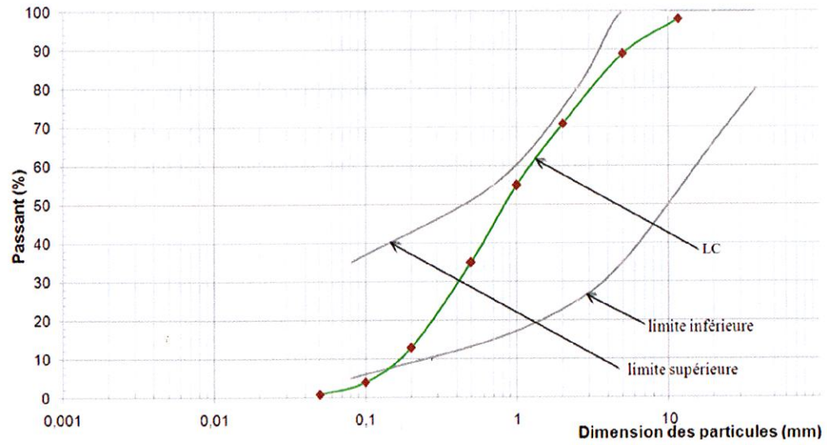


figure 14
Représentation de la courbe granulométrique de la latérite L_C et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de fondation.

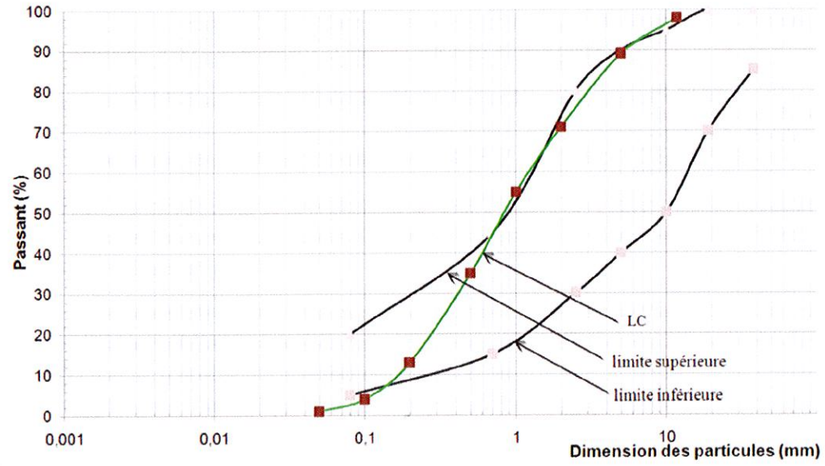


figure 15
Représentation de la courbe granulométrique de la latérite L_C et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de base.

tableau 9
Caractéristiques géotechniques du prélèvement en provenance de Yaoundé (L_C).

Identification du prélèvement	Analyse granulométrique (%)			Indice de plasticité (I_p)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95 % OPM
	0,08 mm	2 mm	10 mm		w_{OPM} (%)	ρ_d (g/cm³)	
L_C	2	71	95	11,1	17,5	1,71	14,6

Par rapport aux fuseaux du CEBTP (1972), la latérite étudiée est utilisable en couches de base et de fondation, au déficit de particules fines près.

L'étude de Madjadoumbaye et al. (2012) porte sur l'influence de l'ajout à cette latérite de différents pourcentages de sable provenant de la rivière Sanaga. Il s'agit d'un sable propre dont la courbe granulométrique est représentée sur la **figure 16**.

Après ajout de 10 à 40 % de sable, les courbes granulométriques du mélange **(figures 17 et 18)** sortent un peu des fuseaux du CEBTP (1972), mais sont peut-être acceptables.

Les résultats de l'étude de Madjadoumbaye et al. (2012) sont rassemblés dans le **tableau 10**.

Les valeurs de l'indice CBR pour 95 % de l'optimum Proctor modifié (compactage des éprouvettes à 25 coups) permettent d'utiliser les mélanges contenant 30 % et 35 % de sable en couche de fondation de chaussées à faible trafic.

Les valeurs de l'indice CBR du **tableau 10** passent par un maximum pour un ajout de sable de 30 %.

Les conclusions de Madjadoumbaye et al. (2012) sur la possibilité de mélanger leur latérite avec le sable de la rivière Sanaga font uniquement référence aux valeurs de l'indice CBR pour leurs

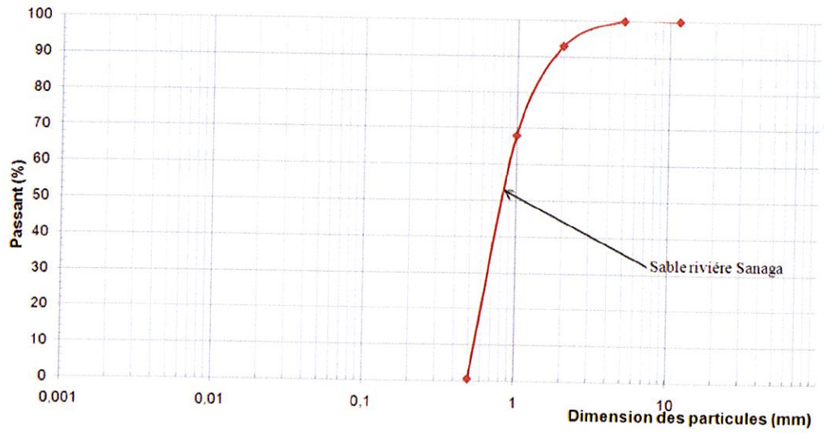


figure 16
Courbe granulométrique du sable de la rivière Sanaga.

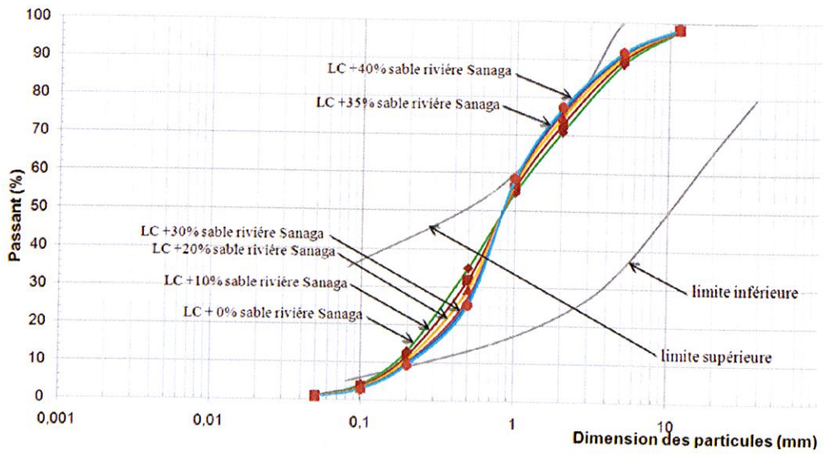


figure 17
Représentation des courbes granulométriques de la latérite L_C + sable de la rivière Sanaga et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de fondation.

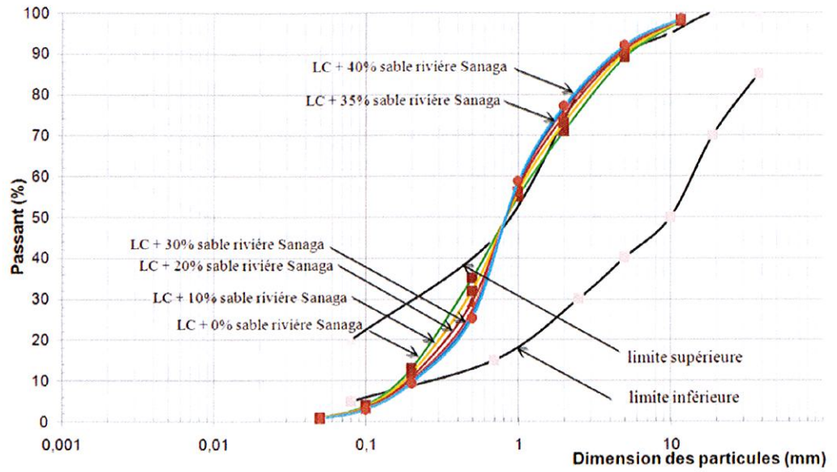


figure 18
Représentation des courbes granulométriques de la latérite L_C + sable de la rivière Sanaga et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de base.

tableau 10
Variations de l'indice CBR en fonction de la quantité de sable ajoutée.

Identification des mélanges	Pourcentage d'ajout de sable de dune					
	0 %	10 %	20 %	30 %	35 %	40 %
ρ_d (g/cm³) à 95 %OPM	1,68	1,78	1,80	1,83	1,83	1,78
Indice CBR	12,6	18,7	23,2	40,4	38,6	26,5

trois niveaux de compactage (10 coups, 25 coups, que nous avons assimilé à 95 % de l'OPM, et 55 coups). Cela représente une dérive par rapport aux conditions édictées par le CEBTP en 1972 (courbes granulométriques en laboratoire avant compactage, indice de plasticité et indice CBR à 95 % de l'OPM) et à celles du CEBTP dans leur version révisée de 1984 (courbes granulométriques après compactage, indice de plasticité et indice CBR à 95 % de l'OPM).

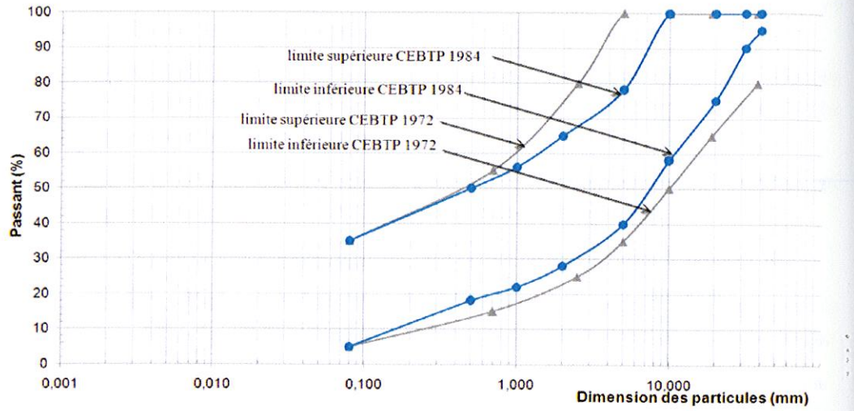
Les conditions de 1984, rarement utilisées au Sénégal, sont discutées dans ce qui suit.

3.4. Fuseaux granulométriques du CEBTP (1972) et du CEBTP (1984)

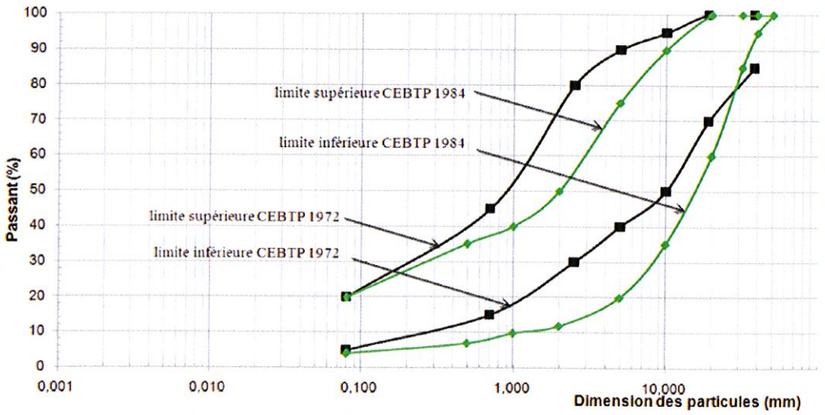
La différence essentielle entre les spécifications du CEBTP de 1972 et celles de 1984 concerne les fuseaux granulométriques recommandés. Les conditions granulométriques sont plus sévères car, comme on le voit sur la **figure 19** :

– d'une part, les courbes granulométriques concernent des matériaux compactés (les dimensions des particules sont réduites par le compactage, donc les courbes granulométriques sont plus hautes dans le diagramme que celles du matériau non compacté) et ;
– d'autre part, le fuseau spécifié pour les couches de fondation est plus étroit et celui des couches de base est décalé vers le bas et vers la droite (donc impose des particules globalement plus grossières).

L'effet du compactage sur la courbe granulométrique des latérites de Lam-Lam et Sindia a été étudié par Ndiaye (2013). La **figure 20** montre l'évolution provoquée par la fragmentation des particules de la latérite de Lam-Lam du fait du compactage (en laboratoire). Les courbes correspondent aux moyennes obtenues de dix prélèvements avant compactage et après compactage dans le moule CBR à trois niveaux d'énergie : 10 coups de dame, 25 coups et 55 coups. La courbe pour 25 coups correspond aux conditions usuelles de compactage (95 % de l'OPM) et est a priori la plus proche des conditions de compactage sur chantier, qui correspondent au fuseau de spécification du CEBTP en 1984.



a. Couche de fondation



b. Couche de base

figure 19
Comparaison des fuseaux de référence pour les couches de base et de fondation (CEBTP, 1972, 1984).

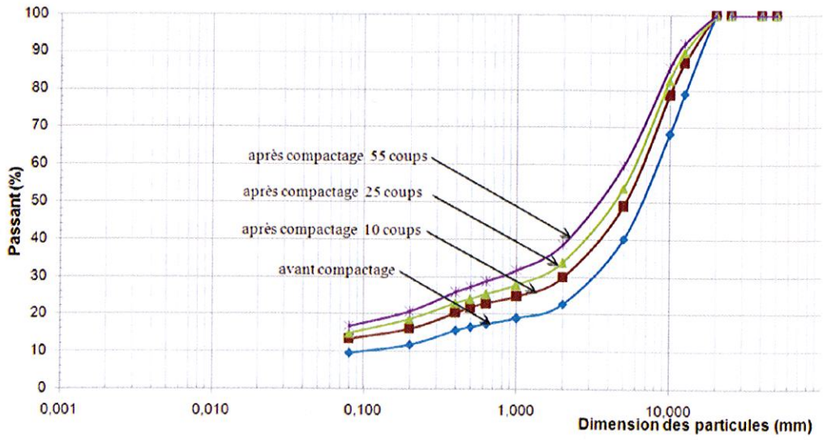


figure 20
Évolution des courbes granulométriques moyennes de la latérite de Lam-Lam avant et après compactage dans le moule CBR.

On observe que le compactage décale les courbes granulométriques de la latérite de Lam-Lam vers des granularités plus fines. Une évolution comparable est observée sur la **figure 11**, pour une latérite du Burkina Faso.

Le passage des spécifications du CEBTP de 1972 à celles de 1984 correspond donc à une plus grande exigence et impose des matériaux plus grossiers. On dispose de peu d'informations sur les conditions dans lesquelles ces spécifications sont appliquées ou partiellement appliquées ou ont été modifiées.

La révision éventuelle de ces spécifications nécessitera une collecte d'expérience à l'échelle de l'Afrique tropicale, puisque les différents pays de la zone tropicale ont suivi une évolution autonome depuis quelques décennies.

4. CONCLUSIONS

La lithostabilisation modifie les propriétés géotechniques des sols traités et les rend aptes à certaines utilisations routières. Les deux graveleux latéritiques sénégalais étudiés dans cet article réagissent à l'ajout de sable par une modification de leur courbe granulométrique, la diminution de leur indice de plasticité, la modification de leur optimum Proctor (modifié) et une évolution de sens opposé de leur indice CBR. Cette évolution conditionne leur usage en couche de fondation ou couche de base selon les critères établis par le CEBTP en 1972 et modifiés en 1984. Le réexamen de ces règles à la lumière de l'expérience des trois dernières décennies pourrait contribuer à redonner un sens aux connaissances passées et mieux comprendre le fonctionnement mécanique des latérites en construction routière.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'AGEROUTE-Sénégal et la société Eiffage-Sénégal pour leur appui lors de la réalisation de cette étude.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bohi Z.P.B. (2008). Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière : le cas de la région de l'Agneby (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat en géotechnique, École Nationale des Ponts et Chaussées, Marne-la-Vallée, 24 novembre 2008, 240 pages.

CEBTP (1972). Manuel de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. Secrétariat d'Etat aux affaires étrangères chargé de la coopération, 51 pages.

CEBTP (1984). Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. Ministère des relations extérieures - Coopération et Développement, Paris, 157 pages.

Madjadoumbaye J., Ngapgue F., Nouanga P., Abdou M.C.,Tamo T.T. (2012). Improving the bearing capacity of laterite by adding sand. Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE), vol. 2012-A, pp. 23-32.

Ndiaye M. (2013). Contribution à l'étude de sols latéritiques du Sénégal et du Brésil. Thèse de doctorat.Université Paris-Est et Université Cheikh Anta Diop de Dakar.

Thilloux et Requirand (1983). La route Tahoua-Arlit (Niger). Les matériaux de chaussée. Études, Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement et de l'Environnement pour le Développement (ISTED), LCPC et BCEOM, 48 pages.

Toe J.M. (2007). Utilisation de la technique de la litho stabilisation en assise de chaussée. Une expérience de chantier. Présentation à la Conférence des Jeunes Géotechniciens Africains, Tunis, 16-18 mars 2007. Présentation PowerPoint.