
Identification et caractérisation géotechniques des sols de plateforme et des matériaux routiers

Deuxième Partie – Identification et caractérisation géotechniques des sols de plateforme et des matériaux routiers

Introduction

Pour l'étude des sols de plateforme, deux zones ont été considérées :

- la zone urbaine, du PK 4+200 au PK 15+200, correspond à une zone de dunes séparées par des dépressions intermédiaires inondables où les sols sableux présentent des portances faibles. Le niveau altimétrique du terrain varie de +2,0m à 10,0m NGS ;
- la zone rurale (forêt de Mbao), du PK 15+850 à la fin du projet (PK+20,4), correspond à une zone de recouvrement sablo-argileux de 1 à 4m d'épaisseur. Le niveau altimétrique du terrain varie de 10,0m à 30,0m NGS.

Les investigations sur le terrain comprennent la réalisation de puits manuels, de sondages par carottage et d'essais pressiométriques. Ces travaux permettent de préciser la lithologie du terrain et d'estimer le comportement mécanique de la plateforme. Ces investigations sont effectuées sous le contrôle de Sétéc International.

Les puits manuels ont été réalisés avec des dimensions minimales de 50cmx50cm, à raison d'un puits tous les 250m en considérant la totalité de l'emprise de la plateforme (32m en zone urbaine, 37m en zone rurale). La profondeur minimale des puits est de 1m. Des échantillons ont été prélevés pour les essais d'identification géotechnique de laboratoire. Les données se rapportant aux puits manuels sont consignées en annexe G.

II.1 – Les sols de plateforme dans la zone urbaine

II.1.1 – La reconnaissance par puits manuels

Dans la zone urbaine, 33 puits manuels ont été réalisés. La profondeur d'investigation se situe entre 0,25 et 2m, avec une moyenne de 1,2m. La présence d'endroits inondés ou de marécages entre le PK 5+200 et 8+500 a empêché la réalisation de 9 puits manuels. Ces puits manuels mettent en évidence des sables fins silteux à légèrement argileux.

II.1.2 – Les sondages par carottage

Ces sondages font apparaître une nappe sub affleurante entre les PK 4+500 et PK 9+500. Le niveau piézométrique relevé est fluctuant selon les sondages : la nappe se situe entre 0,25 et 1,25m sous le terrain naturel, avec une profondeur moyenne de 1m (annexe G).

II.1.3 – Les essais pressiométriques

La réalisation de 11 essais pressiométriques (NF P 94-110) dans la zone urbaine permet de caractériser les terrains de fondations des différents ouvrages projetés. Ces essais sont répartis comme suit : 2 pour le PI 42 (PK 4+280), 3 pour le PS 53 (PK 5+397), 2 pour le PS 62 (PK 6+280), 2 pour le PS 72 (PK 7+570) et 2 pour le PI 98 (PK 9+820).

Les résultats des essais pressiométriques mettent en évidence des sables normalement consolidés avec des passées sous consolidées, aux caractéristiques mécaniques faibles à moyennes sur les premiers mètres et augmentant avec la profondeur (annexe A). Les valeurs de la pression limite P_L et du module pressiométriques E_M sont données par le tableau I.

	PI(MPa)	E(MPa)	E/pl
Min	0,15	0,6	3,42
Max	2,65	50,9	90,00
Moy	1,27	11	9,23
Nombre de mesures	155	155	155

Tableau I – Résultats des essais pressiométriques dans les sols de plateforme dans la zone urbaine

Les essais pressiométriques réalisés mettent en évidence des sables en moyenne normalement consolidés avec des passées sous consolidées, aux caractéristiques mécaniques faibles à moyennes sur les premiers mètres et augmentant avec la profondeur :

- PI*moyen = 0,69 MPa, Em moyen = 7,5 MPa sur les 4 premiers mètres,
- PI* moyen = 1,44 MPa, Em moyen = 12 MPa au-delà de 4 mètres.

NB : L'analyse des courbes pression/volume des mesures pressiométriques réalisées montre que les valeurs retenues sont globalement légèrement sous-estimées. (annexe A)

II.1.4 – Les essais d'identification géotechnique

Les résultats des essais d'identification effectués sur les échantillons de sols de plateforme prélevés dans la zone urbaine sont donnés dans le tableau II (annexe F, photo 13). Cette zone est majoritairement composée de sables silteux de classe GTR B1. Elle est également composée de sables légèrement argileux de classe GTR B2.

Identification		nbval	min	max	moy
Granulométrie	2mm<Ø (%)	33	0	0	0
	0,08mm<Ø<2mm	33	92	99	97
	Ø<0,08mm(%)	33	1	8	3
Equivalent de sable	ES	33	23	81	54
Classe GTR	B1 (79%), B2 (21%)				

Tableau II – Résultats des essais d'identification sur les échantillons de sols de plateforme dans la zone urbaine

II.2 – Les sols de plateforme dans la zone rurale

II.2.1 – La reconnaissance par puits manuels

Dans la zone rurale, 30 puits manuels ont été réalisés. La profondeur d'investigation est de 1,50m. Ces puits manuels mettent en évidence des sables silteux, des sables limoneux et des sables argileux.

II.2.2 – les sondages par carottage

Dans la zone rurale, 2 sondages par carottage ont été réalisés à 15m de profondeur. Le premier pour reconnaître les terrains sous le diffuseur de Rufisque Ouest (PS 162) au PK 16+250 et le second pour reconnaître les terrains sous le diffuseur de Rufisque Est (PS 202) au PK 20+246. Les faciès rencontrés sur les trois premiers mètres de profondeur (2,85m pour le PS 162 et 3m pour le PS 202) sont des sables argileux. Au delà de 3m, les sondages rencontrent le substratum marnocalcaire. La nappe se situe à 3m sous le terrain naturel pour le PS 162 et à 3,3m pour le PS 202.

II.2.3 – Les essais pressiométriques

Dans la zone rurale, 7 sondages pressiométriques (NF P 94-110) ont été réalisés pour permettre la caractérisation mécanique des terrains de fondations des ouvrages suivants : le PS 162 (PK 16+250) avec deux essais, l'OH1 (PK 16+490) avec un essai, l'OH 14 (PK 20+105) avec un essai et le PS 202 (PK 20+246) avec trois essais. Les résultats des essais sont présentés dans le tableau III

		PI(MPa)		E(MPa)		E/PI	
		PS 162	PS 202	PS 162	PS 202	PS 162	PS 202
Recouvrement sablo-limoneux	Min	0,25	0,38	3,7	4,7	9,5	7,2
	Max	0,39	1,38	8,2	17,4	21,0	22,2
	Moy	0,35	1,02	5,4	11,7	15,5	12,0
	Nombre de mesure	4	9	4	9	4	9
Substratum marno-calcaire	Min	0,48	1,85	6,1	16,8	10,3	7
	Max	4,11	4,25	645	358	158,5	85,4
	Moy	3,22	3,66	199,4	112,9	52,9	29,9
	Nombre de mesures	26	36	26	36	26	36

Tableau III – Résultats des essais pressiométriques dans les sols de plateforme dans la zone rurale

II.2.4 – Les essais de pénétration dynamique

Pour reconnaître les terrains d'assise des futurs ouvrages hydrauliques (OH 9 à 14) ainsi que de la passerelle P₄ située au PK 19+00, 8 essais de pénétration dynamique ont été réalisés (annexe A). Les refus sont obtenus à des profondeurs comprises entre 3,1 et 7,2m. Les résultats obtenus montrent que les terrains ont des caractéristiques mécaniques faibles à très faibles sur les premiers mètres. La résistance en pointe est inférieure à 3 MPa, à des profondeurs variant entre 2,0 et 4,2m.

II.2.5 – Les essais d'identification géotechnique

Les résultats des essais d'identification effectués sur les échantillons de sols de plateforme prélevés dans la zone rurale sont consignés dans le tableau IV et en annexe C.

Cette zone est majoritairement composée de sable silteux de classe GTR B1, de sables limoneux de classe GTR B5 et de sables argileux de classe GTR B6.

En considérant les résultats des essais CBR après 4 jours d'immersion dans l'eau, les classes de portance des sols sont les suivantes d'après la nomenclature établie par le CEBTP dans le <<guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux>> ;

S₄ pour les mélanges (CBR compris entre 15 et 30) ;

S₃ à S₅ pour les échantillons pris séparément (CBR compris entre 10 et 33), avec une moyenne de classe S₄. Ces sols de plateforme présentent des portances convenables.

Identification		nbval	min	max	moy
Granulométrie	0,080mm<Ø<0,2mm (%)	36	36,0 0	99,00	82,61
	Ø<0,080mm (%)	36	1,00	46,00	17,39
Limites d'Atterberg	W _L	19	19,0	52,9	30,6
	W _P	19	10,1	26,7	16,2
	IP	19	8,9	26,2	14,4
Equivalent de sable	ES	17	15	76	39
Classe GTR	B1 (36,1%), B5 (30,6%), B6 (27,8%), A2 (2,8%), A3 (2,8%)				

Tableau IV – Résultats des essais d'identification sur les échantillons de sols de plateforme dans la zone rurale

II.3 – Le contrôle de la qualité des matériaux routiers

Les essais d'identification et les essais de comportement permettent de contrôler la qualité des matériaux routiers conformément aux spécifications du marché pour la réalisation de l'autoroute Dakar-Diamniadio.

Les matériaux routiers (annexes B et D) sont :

- ✓ le sable de Grand Mbao, pour la réalisation de la plateforme ;
- ✓ la latérite crue de Dougar, pour la réalisation de remblais dans les zones non inondées ;
- ✓ la latérite crue de Sindia et celle améliorée à 3% de ciment, pour la réalisation respective de la partie supérieure de terrassement (PST) et de la couche de forme autoroutière traitée.

Dans le cadre de l'étude se rapportant au mémoire, les essais d'identification normalisés suivants ont été réalisés :

- essai d'équivalent de sable (NF EN 933-8)
- analyse granulométrique (NF P94-056)

- détermination des limites d'Atterberg (NF P94-051)
- Essai au bleu de méthylène VBs (NF P94-068)

De même, les essais de comportement normalisés suivants ont été réalisés :

- essais Proctor Normal et Modifié (NF P94-093)
- essai CBR après 4 jours d'immersion dans l'eau (EN 13286-47).

La description détaillée des essais est consignée dans les normes indiquées.

II.3.1 – Le sable de Grand Mbao

Ce matériau est destiné à la réalisation de la plateforme dans les zones de purge. La courbe granulométrique de l'échantillon de sable de Grand Mbao est donnée par la figure 6. L'équivalent de sable ES est égal à 41 ; la valeur de bleu VBS est égale à 0,11 (annexe A), ce qui correspond à un sol sableux.

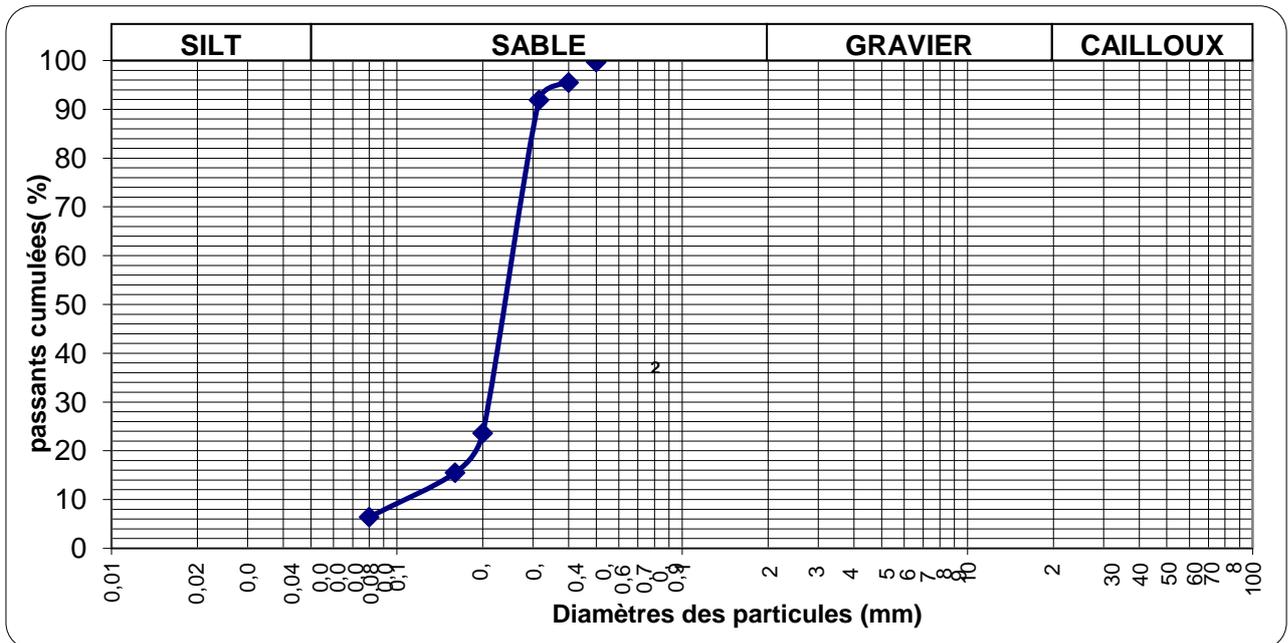


Figure 6 – Courbe granulométrique de l'échantillon de sable de Grand Mbao

La courbe de l'essai Proctor Modifié (à 95% OPM) de l'échantillon de sable de Grand Mbao est représentée sur la figure 7.

Les résultats des essais CBR à 90% OPM, 95% OPM et 100% OPM sont consignés dans le tableau VI. A 95% OPM, la teneur en eau optimum W_{opt} est égale à 13,8% et la masse volumique sèche maximum γ_{dmax} est égale à 1,63 t/m³ ; CBR est égal à 16.

Le tableau VIII contient l'ensemble des résultats des essais se rapportant à l'échantillon de sable de Grand Mbao.

Compacité	γ_h (t/m ³)	W _{opt} (%)	γ_{dmax} (t/m ³)	CBR
90% OPM	1,77	13,8	1,56	10
95% OPM	1,86	13,8	1,63	16
100% OPM	1,96	13,8	1,72	20

Tableau V – Résultats des essais Proctor Modifié et CBR à différentes compacités effectués sur l'échantillon de sable de Grand Mbaou

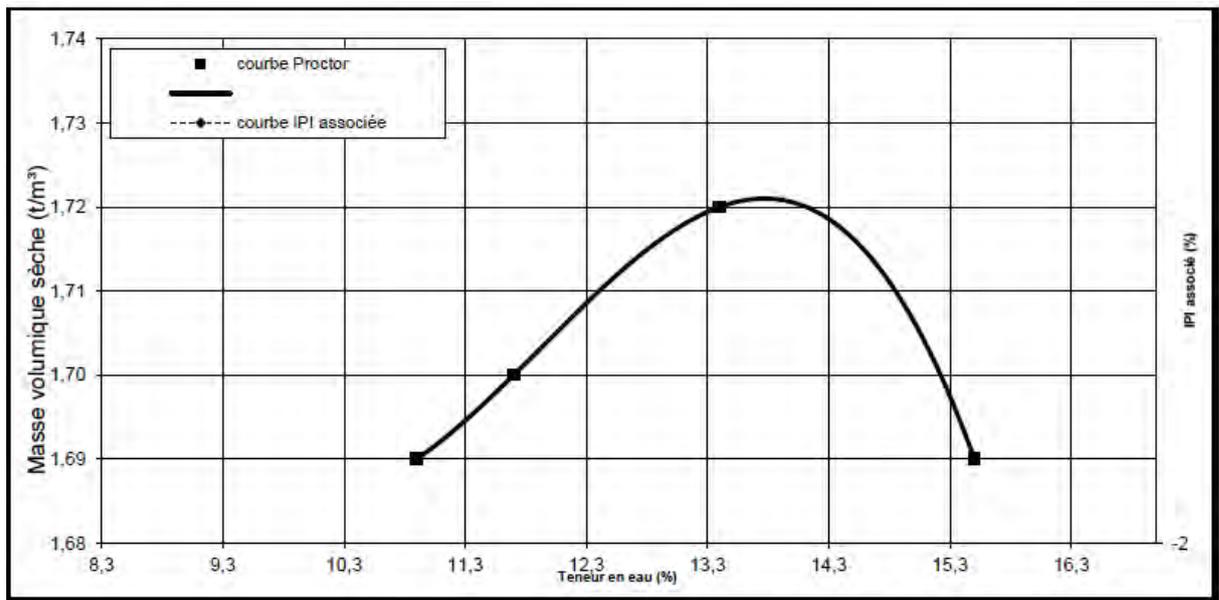


Figure 7 – Courbe de l'essai Proctor Modifié de l'échantillon de sable de Grand Mbaou.

II.3.2 – La latérite de Dougar

Ce matériau routier est destiné à la réalisation de remblais dans les zones non inondées. La courbe granulométrique de l'échantillon de latérite crue de Dougar est donnée par la figure 8. La proportion de fines (particules de dimensions inférieures à 80 μ m) est de 18,1%. Les limites d'Atterberg sont les suivantes : la limite de liquidité W_L est égale à 41,1 tandis que la limite de plasticité W_P est égale à 20,4. L'indice de plasticité I_P est égal à la différence entre W_L et W_P ; I_P est égal à 20,7 ce qui correspond à un matériau plastique. La valeur de bleu VBs est égale à 0,09 ; la latérite crue de Dougar est graveleuse et peu argileuse.

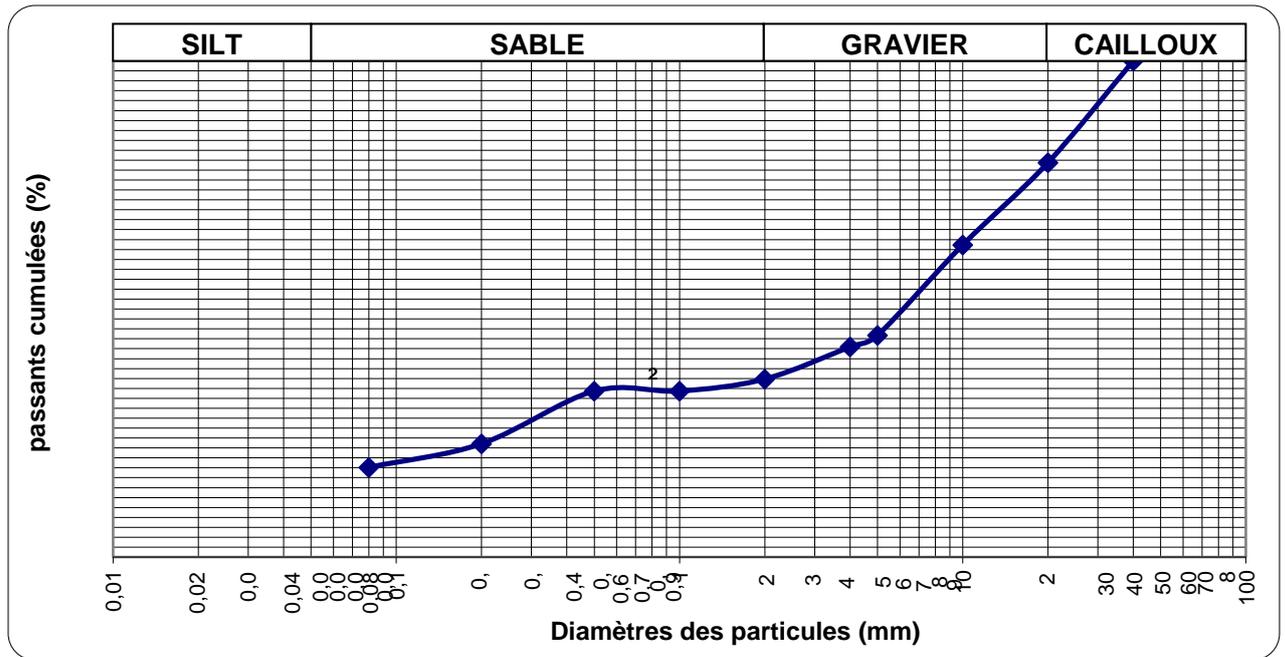


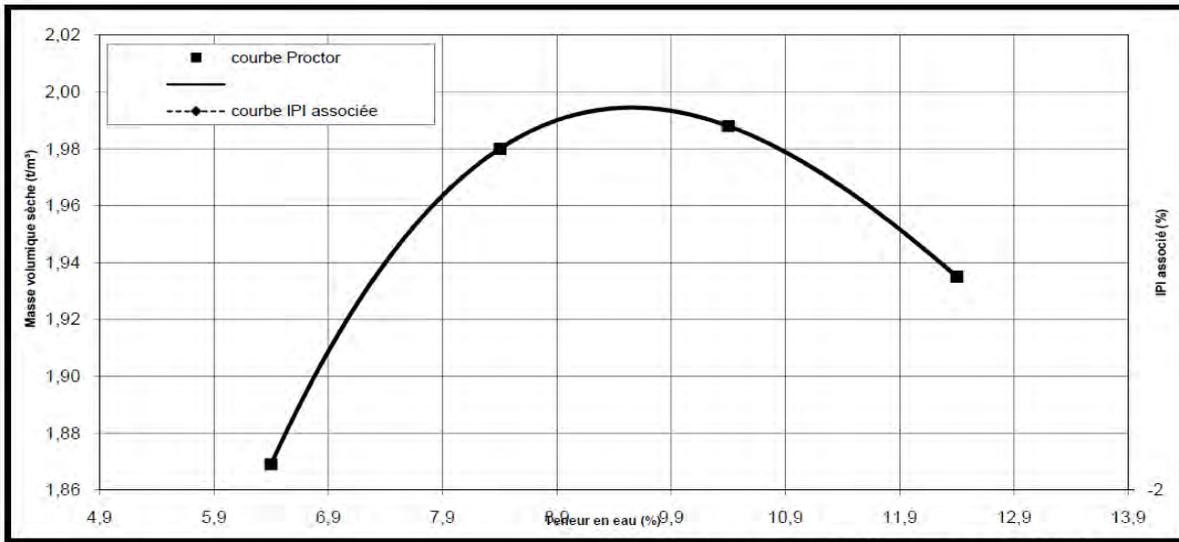
Figure 8 – Courbe granulométrique de l'échantillon de latérite de Dougar

La courbe de l'essai Proctor Modifié (à 95% OPM) de l'échantillon de latérite de Dougar est représentée sur la figure.9. Les résultats des essais CBR à 90% OPM, 95% OPM et 100% OPM sont consignés dans le tableau VI.

A 95% OPM, la teneur en eau optimum W_{opt} est égale à 9,6% et la masse volumique sèche maximum γ_{dmax} est égal à 1,89 t/m³. CBR est égal à 30. L'ensemble des résultats des essais se rapportant à la latérite de Dougar est consigné dans le tableau VIII.

Compacité	γ_h (t/m ³)	W_{opt} (%)	γ_{dmax} (t/m ³)	CBR
90% OPM	1,96	9,6	1,79	16
95% OPM	2,07	9,6	1,89	30
100% OPM	2,18	9,6	1,99	47

Tableau VI – Résultats des essais Proctor Modifié et CBR à différentes compacités effectués sur l'échantillon de latérite crue de Dougar



*: Courbe de saturation à 100% et pour $\gamma_s = 2,65 \text{ t/m}^3$

Figure 9 – Courbe de l’essai Proctor Modifié de l’échantillon de latérite crue de Dougar

II.3.3 – la latérite crue de Sindia

Ce matériau routier est destiné à la réalisation de la partie supérieure de terrassement (PST). La courbe granulométrique de l’échantillon de latérite crue de Sindia est donnée par la figure.10. La proportion de fines (particules de dimensions inférieures à $80\mu\text{m}$) est de 10,2%. Les limites d’Atterberg sont les suivantes : la limite de liquidité W_L est égale à 40,6 tandis que la limite de plasticité W_P est égal à 18,1 ; l’indice de plasticité I_P est égal à la différence entre W_L et W_P ; I_P est égal à 22,5 ce qui correspond à un matériau plastique. La valeur de bleu VBS est égale à 0,11 ; la latérite de Sindia est graveleuse et peu argileuse.

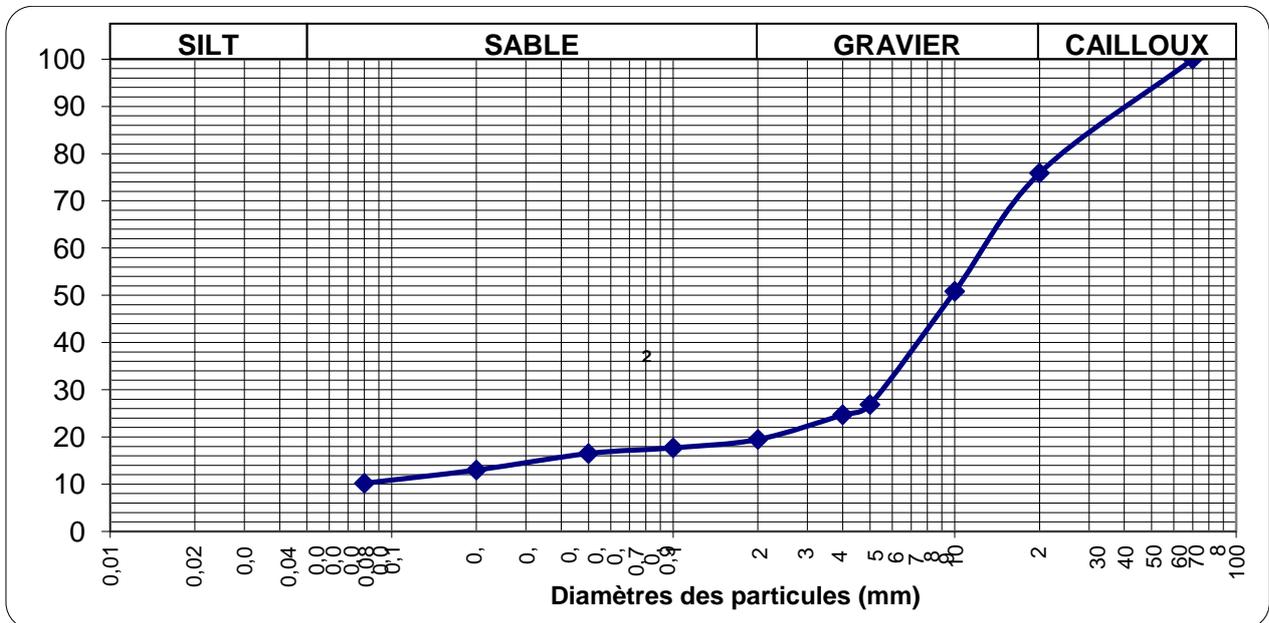


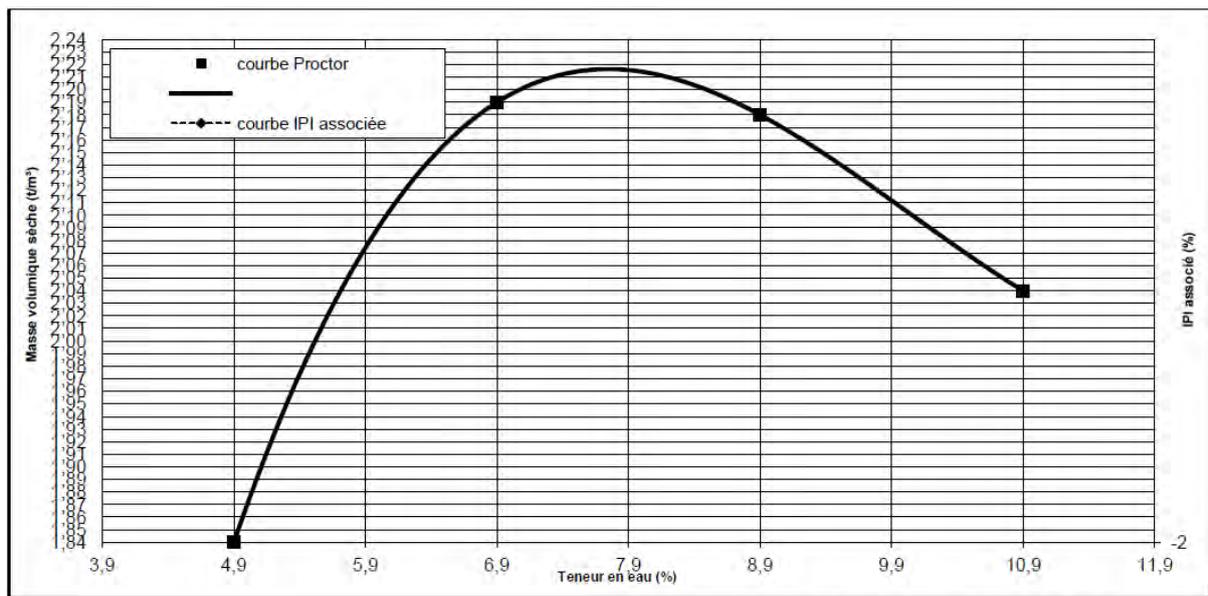
Figure 10 – Courbe granulométrique de l’échantillon de latérite de Sindia

La courbe de l'essai Proctor Modifié (à 95% OPM) de l'échantillon de latérite de Sindia est représentée sur la figure 11 ; les résultats des essais CBR à 90% OPM, 95% OPM et 100% OPM sont consignés dans le tableau VII.

A 95% OPM, la teneur en eau optimum W_{opt} est égale à 8,3% et la masse volumique sèche maximum γ_{dmax} est égale à 2,07 t/m³. CBR est égale à 70. L'ensemble des résultats des essais se rapportant à la latérite crue de Sindia est consigné dans le tableau VIII.

Compacité	γ_h (t/m ³)	W_{opt} (%)	γ_{dmax} (t/m ³)	CBR
90% OPM	2,13	8,3	1,97	37
95% OPM	2,24	8,3	2,07	70
100% OPM	2,37	8,3	2,19	101

Tableau VII - Résultats des essais Proctor Modifié et CBR à différentes compacités effectués sur l'échantillon de latérite de Sindia



*: Courbe de saturation à 100% et pour $r_s = 2,65$ t/m³

Figure 11 – Courbe de l'essai Proctor Modifié de l'échantillon de latérite de Sindia

Echantillon	Analyse granulométrique (NF P94-056)			Equivalent de sable ES (NF EN 933-8)	Limites d'Atterberg (NF P 94-051)			Valeur de bleu VBS (NF P94-068)	Essai Proctor Modifié (NF P94-093)		Essai CBR (EN 13286-47)
	Ø<50mm (%)	Ø>2mm (%)	Ø<0,080mm (%)		W _L	W _P	I _P		W _{opt} (%) à 95% OPM	γ _{dmax} (t/m ³) à 95% OPM	CBR à 95% OPM
Sable de Grand Mbao	100,0	100,0	6,4	41	–	–	–	0,11	13,8	1,63	16
Latérite de Dougar	100,0	64,1	18,1	–	41,1	20,4	20,7	0,09	9,6	1,89	30
Latérite de Sindia	94,0	80,2	10,2	–	40,6	18,1	22,5	0,11	8,3	2,07	70

Tableau VIII - Résultats des essais d'identification et de comportement des matériaux routiers étudiés

II.3.4 – La latérite-ciment de Sindia

Afin de se conformer aux spécifications du Cahier des Prescriptions Techniques (CPT), la latérite de Sindia est améliorée à 3% de ciment pour être utilisée en couche de forme autoroutière. Les paramètres géotechniques de l'échantillon de latérite-ciment de Sindia sont donnés dans le tableau IX.

Echantillon	Limites d'Atterberg (NF P94-051)			Essai Proctor Modifié (NF P94-093)		Essai CBR (EN 13286-47)
	W _L	W _P	I _P	W _{opt} (%) à 95% OPM	γ _{dmax} (t/m ³) à 95% OPM	CBR à 95% OPM
Latérite crue de Sindia	40,6	18,1	22,5	8,3	2,07	70
Latérite-ciment de Sindia (3% de ciment)	35,9	18,8	17,1	9,3	1,99	232

Tableau IX – Paramètres géotechniques de l'échantillon de latérite-ciment de Sindia (3% de ciment)

Après le traitement à 3% de ciment, la latérite de Sindia reste plastique avec un indice de plasticité I_p égal à 17,1 et présente une portance élevée qui se traduit par un indice CBR égal à 232 qui est supérieur à 160 (tableau IX). Le traitement au ciment accroît la portance routière du matériau de Sindia et diminue sa plasticité facilitant aussi son compactage sur le chantier. Des essais d'identification (analyse granulométrique et détermination des limites d'Atterberg) ont été effectués sur la latérite crue de Sindia et la latérite-ciment, avant et après l'essai CBR. Les résultats des essais sont consignés dans le tableau X. Après l'essai CBR, le pourcentage de fines (fraction inférieure à 80μm) augmente tandis que l'indice de plasticité I_p diminue.

Echantillon	Analyse granulométrique			Limites d'Atterberg		
	%< 20 mm	%> 2 mm	%< 0,080mm	W _L	W _P	I _P
Latérite crue de Sindia avant CBR	75	80	10	40,6	18,1	22,5
Latérite crue de Sindia après CBR	80	68	13	32,3	15,4	16,9
Latérite-ciment de Sindia avant CBR	–	–	–	35,9	18,8	17,1
Latérite-ciment de Sindia après CBR	84	51	22	30,8	16,7	14,1

Tableau X - Paramètres géotechniques de l'échantillon de latérite de Sindia (non traitée et traitée) avant et après CBR

Conclusion partielle

L'identification et la caractérisation géotechniques des sols de plateforme du tronçon Pikine-Diamniadio de l'autoroute à péage Dakar-Diamniadio s'effectuent aisément avec des essais normalisés de laboratoire et "in situ". Dans la zone urbaine, la reconnaissance par puits manuels révèle des sables fins silteux à légèrement argileux. Les sondages par carottage font apparaître une nappe sub affleurante à une profondeur moyenne de 1m. Dans la zone rurale, les puits manuels mettent en évidence des sables silteux, des sables limoneux et des sables argileux. Les sondages par carottage rencontrent le substratum marno-calcaire à partir de 3m de profondeur où la nappe phréatique a été également rencontrée. Dans la zone urbaine, l'identification géotechnique permet de classer les sols de plateforme en GTR B1 majoritairement puis en GTR B2. Dans la zone rurale, il y a surtout des sols de plateforme de classe GTR B1 puis de classes GTR B5 et GTR B6. Ces sols de plateforme présentent des portances convenables.

L'étude des matériaux routiers montre que le sable de Grand Mbao a une portance appréciable pour la réalisation de la plateforme (CBR égal à 16 à 95% OPM). La latérite de Dougar est de qualité moyenne (CBR à 95% OPM égal à 30) et est utilisée pour réaliser des remblais dans les zones non inondées. La latérite crue de Sindia a de bonnes qualités routières (CBR égal à 70 à 95% OPM) et convient bien pour la réalisation de la partie supérieure de terrassement (PST) et la couche de forme autoroutière traitée (CBR égal à 232 à 95% OPM, après traitement à 3% de ciment).