

# Etude corrélative entre les propriétés géochimiques et les caractéristiques géomécaniques de latérites

<sup>1</sup>Nkoumou Armel Jean-françois, <sup>2</sup>Mouhamadou Bassir Diop,  
<sup>2,3</sup>Fary Diome, <sup>2,3</sup>Jean Claude Parisot et <sup>4</sup>Ndane Diouf

<sup>1</sup>*Département de géologie, BP 5386, Faculté des Sciences et Techniques,  
Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal*

<sup>2</sup>*Institut des Sciences et de la Terre, BP 5396, Faculté des Sciences et Techniques,  
Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal*

<sup>3</sup>*Institut de Recherche pour le Développement, BP 1386, Dakar Sénégal.*

<sup>4</sup>*Entreprise Jean Lefebvre Sénégal, rue B x rue Point E, BP 106, Dakar Sénégal*

## Résumé :

Les latérites constituent le corps de chaussée des routes en Afrique tropicale. Elles doivent donc répondre à des normes ; mais ces dernières varient d'un pays à l'autre selon l'intensité du trafic routier, du climat et des matériaux disponibles. Compte tenu de l'épuisement des gisements de latérite de bonne qualité, il est intéressant d'étudier la relation : nature de la roche mère - qualité des latérites, pour mieux faciliter la prospection et la découverte d'autres gisements conformes aux spécifications géotechniques. Pour atteindre cet objectif, des latérites de compositions géochimiques connues, prélevées sur différents profils ont été soumises à des essais géotechniques. Leurs caractéristiques géomécaniques ont ensuite été corrélées à leurs teneurs en oxydes ferriques, en silice et en alumine. Les corrélations montrent une forte liaison entre les teneurs en oxyde de fer et de silice d'une part, et les caractéristiques géomécaniques d'autre part. L'alumine, en revanche, ne paraît pas montrer de lien avec ces caractéristiques. Ces résultats ont un impact sur la prospection des graveleux latéritiques en ce sens qu'ils permettent, dans certains cas, de l'orienter.

Mots clés : Latérites – Normes – Géochimiques – Géomécaniques – Corrélations – Prospection

## Abstract :

Lateritic soil constitute the principal construction material for road in tropical Africa. They must satisfy

### 1.- Introduction

Les latérites, qui couvrent de larges superficies dans les régions tropicales, sont utilisées en Afrique comme corps de chaussée. Les raisons en sont : le fait que ces

to specifications, but these ones vary with countries according to traffic specifications, climate and raw materials. Due to the rarefaction of good quality laterite, it's interesting to study the relation : bedrock – quality of laterites, to better localise laterites deposits. In this frame well known geochemical composition laterites have been sampled from different profiles and submitted to geochemical tests. Their geochemical characteristics have been correlated with their tenor of iron, silica and alumina. The correlations show a strong relationship between the tenor of iron, silica and the geomechanical characteristics. These results have an impact on the prospection of gravel lateritic soils, in that they enable, in several cases, to orientate them.

Key words : Laterites - Standards – Geochemical - Geomechanical – Correlations – Prospections

> Mouhamadou Bassir Diop, Institut des Sciences et de la Terre,  
Faculté des Sciences et Techniques – Université Cheikh Anta Diop de Dakar  
BP : 5396, Dakar, Sénégal  
Fax : 8246318 – Tél (221) 8250443 ; 8250202  
E-mail : mbdiop@ucad.sn

formations affleurent dans la plus grande partie des ces régions, leur caractéristique géomécanique et leur exploitabilité plus facile que certaines formations cristallines

(le basalte par exemple, était jadis employé comme couche de chaussée).

Cependant, de nos jours, on note un épuisement des gisements de latérites de bonne qualité (80 minimum à 100% de l'optimum Proctor en couche de base). Pour y remédier, une des solutions est un recours à l'amélioration des latérites au ciment. Malheureusement, pour les grands chantiers, cela est source d'un accroissement considérable du prix de construction des routes. C'est ainsi qu'a eu lieu à Dakar, du 04 au 07 Novembre 1996, le séminaire international sur l'étude des matériaux de substitution. Là encore, les séminaristes ont mis en lumière le fait qu'à court terme, la latérite ne pouvait être remplacée par ces matériaux de substitution que très partiellement. Les raisons évoquées sont une connaissance scientifique embryonnaire et une extension géographique trop faible de ces matériaux.

Un des moyens de faciliter la prospection des gisements de latérite est l'étude de la relation roche mère – caractéristique des latérites, étude qui permettrait éventuellement une meilleure localisation des latérites de bonne qualité.

Ferreira et Correia, cités par Fall [1] arrivent à la conclusion que la teneur en fer et en aluminium d'une latérite a des conséquences sur ses qualités géotechniques, notamment sa dureté.

Aussi notre travail se fixe t-il pour objectif, l'étude de la corrélation entre les propriétés géochimiques (pourcentage en silice, en hématite et en alumine) et les autres caractéristiques géomécaniques (densité sèche et CBR) des latérites. Pour ce faire, des échantillons de latérites de composition géochimique connue ont été prélevés au Sénégal Oriental et soumis à des essais géotechniques.

## 2.- Localisation des prélèvements

Les matériaux que nous avons étudiés ont été prélevés au niveau de plusieurs

localités (Tinkoto, Bafoundou et Ngari). Ces dernières se situent dans le département de Kédougou, au Sénégal oriental (figure1). Plus précisément, Tinkoto se trouve à 40 km au nord de Kédougou, alors que Bafoundou et Ngari sont respectivement à 39 et 18 km au nord – ouest de Kédougou. Selon Ritz et al [2], les latérites prélevées se sont développées aux dépens des formations du paléoprotérozoïque.

En effet, La boutonnière de Kédougou-Keniéba a été affectée par une série de déformations, le Birimien notamment dans sa phase éburnéenne entre 2045 et 1600 millions d'années. Les formations birimiennes comprennent des roches volcaniques basiques et neutres et des roches sédimentaires (schistes, cipolins, etc.). Ces roches sont affectées par des intrusions granitiques (syntectoniques et post tectoniques). On distingue trois séries dans les formations métamorphiques : la série de Mako, la série de Dialé et la série de Daléma [3].

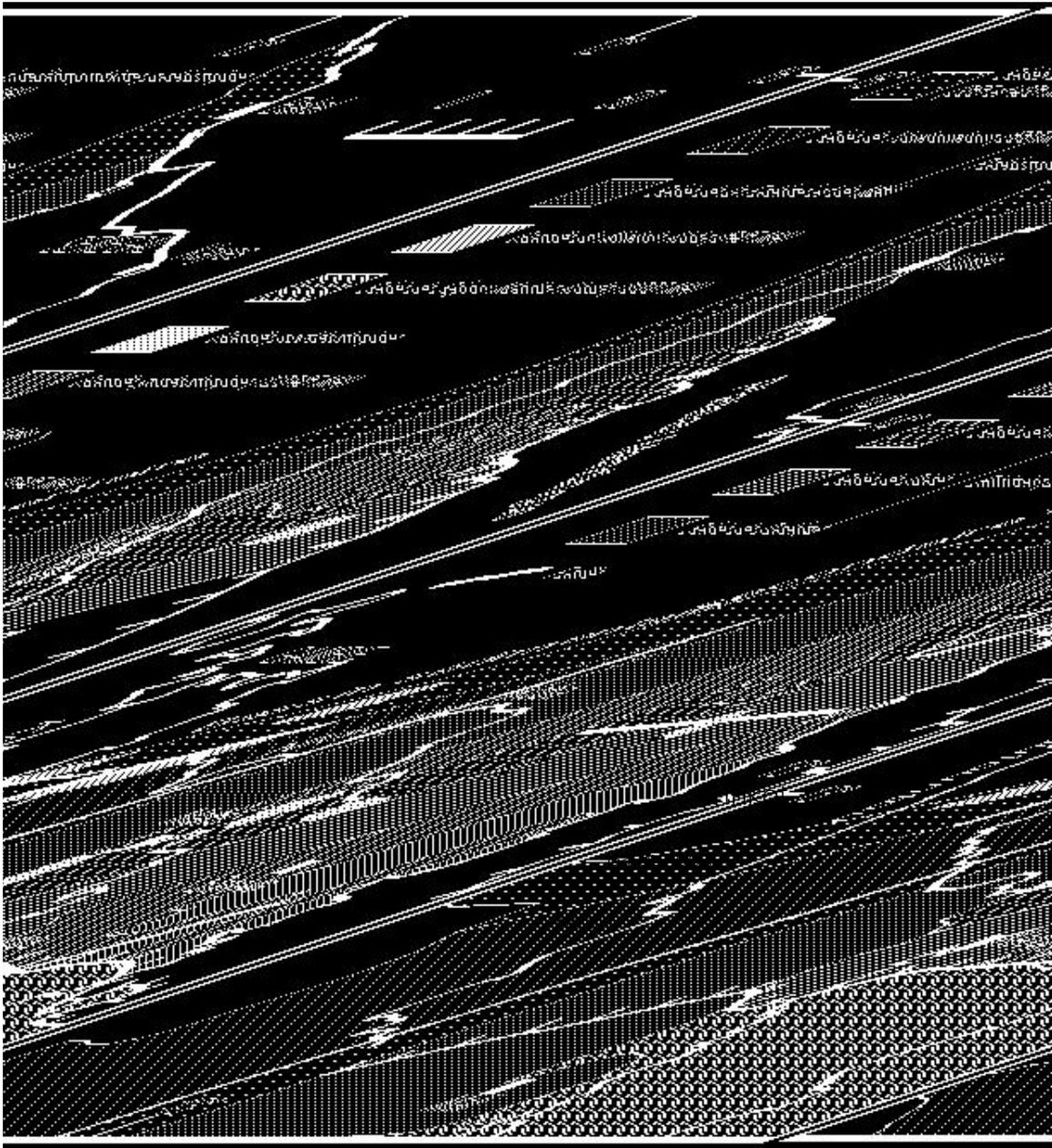


Figure 1 Carte de localisation de Bafoundou de Ngari et de Tinkoto (Bassot, [4])

Les graveleux latéritiques, utilisés en technique routière, proviennent du démantèlement des horizons indurés (cuirasse et carapace). Ceux de nos profils (figure 2) présentent un aspect induré. Nous avons procédé à leur prélèvement à l'aide de marteaux et de burins. Les analyses géochimiques et géotechniques des

prélèvements ont donné les résultats consignés dans les tableaux 1 et 2.

La roche mère sujette à la latérisation est un granite à Tinkoto, des tufs à Bafoundou et enfin une arkose à Ngary. Leur composition en éléments majeurs est donnée dans le tableau 1.

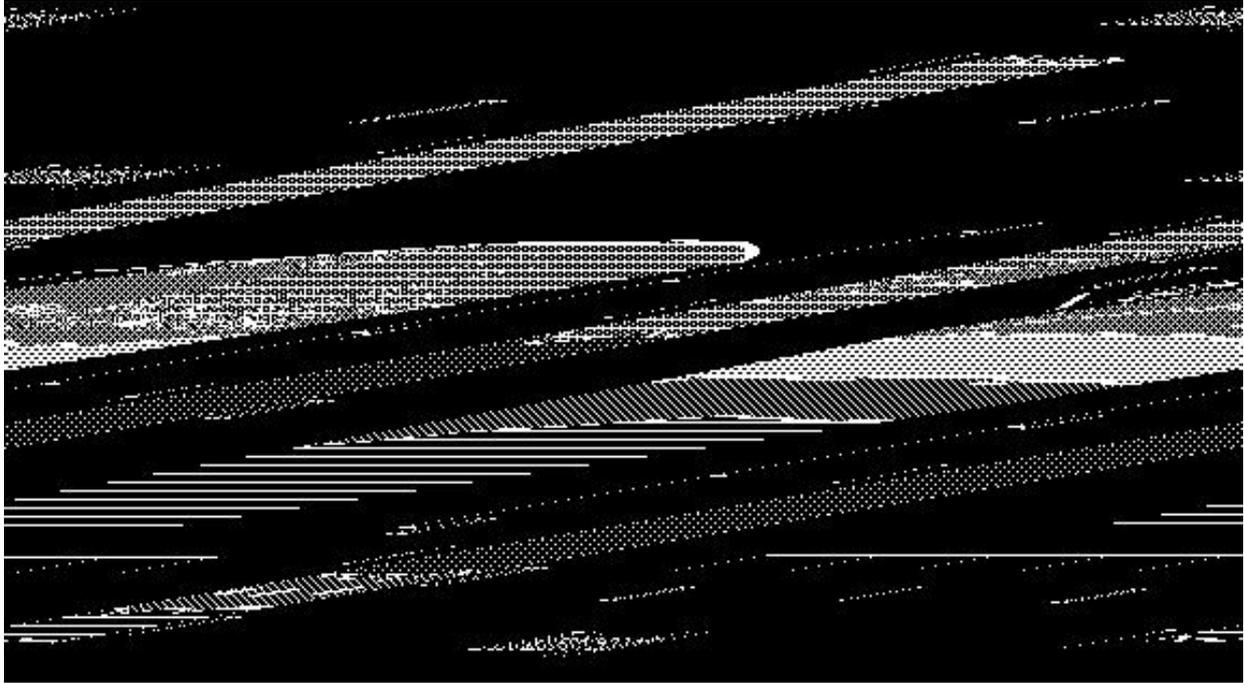


Figure 2 : Profil d'altération sur plateau à partir d'un puits dans la zone de Tinkoto (a) et coupe des terrains de couverture dans la zone de Ngari (b).

*Esquisse des terrains de couverture dans la zone de Ngari :*

- I = croûte ferrugineuse ;*
- II = croûte ferrugineuse démantelée ;*
- III = croûte ferrugineuse tendre ;*
- IV = couche d'argile bariolée ;*
- V = saprolite ;*
- VI = matériel colluvionnaire).*

Tableau I : analyses géochimiques des prélèvements et de leur roche-mère

Oxydes	Bafoundou			Ngary			Tinkoto		
	R-mère	Cuir	Car	R-mère	Cuir	Car	R-mère	Moyen glacis	penne haut glacis
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,15	52,85	35,46	3,8	29,17	20,35	3,01	43,73	24,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,07	17,41	13,51	13,5	15,24	15,72	13,88	11,65	14,32
CaO	7,42	0,03	0,03	0,2	0,01	0,06	2,21	0,03	0,98
Na <sub>2</sub> O	3	0,02	0,05	5,06	0,01	0,03	3,51	0,0	0,06
K <sub>2</sub> O	0,87	0,03	0,25	1,61	0,3	0,45	4,26	0,16	0,21
MgO	5,38	0,02	0,07	1,27	0,19	0,31	1,1	0,03	0,6
MnO	0,15	0,03	0,13	0,08	0,03	0,07	0,05	0,06	
ZnO		0,06	0,02						
Pfeu		10,19	8,07		7,96	8			
SiO <sub>2</sub>		19,41	42,43	71,9	47,11	52,2	69,52	35,65	44,1
TiO <sub>2</sub>	53,67					0,63			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>								0,47	0,07
Cr <sub>2</sub> O								0,07	
ZnO		0,06	0,02						
Pfeu		10,19	8,07		7,96	8			
SiO <sub>2</sub>		19,41	42,43	71,9	47,11	52,2	69,52	35,65	44,1
TiO <sub>2</sub>	53,67					0,63			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>								0,47	0,07
Cr <sub>2</sub> O								0,07	

R-mère = roche mère ; Cuir = cuirasse ; Car = carapace

Tableau 2 : récapitulatif des résultats obtenus

Gisements	Niveaux	R	f	Ip	CBR	Ds	Wopt
Bafoundou	Cuirasse	89	4	16.7	85	2.32	10.4
	Carapace	58	34	20.7	54	2.10	11.3
N'gary	Cuirasse	78	14	24.2	50	2.25	9.00
	Carapace	33	57.5	25.3	7	1.94	11.14
Tinkoto	Cuirasse	84	6	23	84	2.27	9.5
	Carapace	74	15	39	42	2.10	10.1

Les teneurs en silice des roches-mères à Ngary et Tinkoto sont les plus élevées (environ 70%). Par contre, pour le fer, les tufs de Bafoundou présentent une concentration nettement supérieure (10%).

Le taux de fer augmente fortement de la carapace à la cuirasse ; il passe de près de 10% dans la carapace à environ 45% dans la cuirasse. Probablement, cet accroissement doit correspondre à un apport important de matériaux provenant de la cuirasse en démantèlement dans la partie dominante des collines. Ceci explique la prédominance des oxydes et hydroxydes de fer dans la cuirasse.

Les essais géotechniques permettent d'apprécier l'influence des caractéristiques géochimiques de ces latérites sur leurs propriétés géomécaniques.

### 3.- Résultats des essais géotechniques

Les essais ont consisté à la détermination des paramètres d'identification à savoir les limites d'Atterberg (indice de plasticité  $I_p$ ) et les caractéristiques granulométriques (le squelette  $R$  ou refus à 2 mm et le pourcentage de fines  $f$  ou passants à 1.1 mm) d'une part, et les caractéristiques géomécaniques des latérites (caractéristiques de compactage et CBR) d'autre part.

#### 3.1. Corrélation entre les propriétés géotechniques et les caractéristiques géomécaniques

La silice ( $SiO_2$ ), l'hématite ( $Fe_2O_3$ ) et l'alumine ( $Al_2O_3$ ) étant les constituants majeurs des latérites, nous procédons à une corrélation entre les caractéristiques géomécaniques et la teneur de ces éléments dans nos matériaux (figure 3). Ensuite, nous appliquons le test de Student pour juger de la signification de nos corrélations.

Il semble exister une forte corrélation entre la densité sèche ( $D_s$ ) et les teneurs en hématite ( $R_1 = 0.81$ ) et en silice ( $R_2 = -0.82$ ). Elle se traduit par une hausse de la densité sèche avec la teneur en hématite d'une part, et par la baisse de la densité sèche lorsque la teneur en silice croît. Par contre, il ne semble pas exister de corrélation entre la teneur en alumine et la densité sèche ( $R_3 = 0.54$ ).

En ce qui concerne le CBR, il semble pouvoir être très fortement corrélé avec les

teneurs en hématite ( $R_4 = 0.94$ ) et en silice ( $R_5 = -0.94$ ). Cette corrélation est marquée par une hausse du CBR avec l'hématite d'une part, et par une baisse du CBR lorsque la teneur en silice diminue. En revanche, il ne semble pas exister de corrélation entre le CBR et la teneur en alumine ( $R_6 = 0.54$ ).

Pour ce qui est du coefficient Los Angeles, il est observé le même phénomène que pour la densité sèche à savoir une forte corrélation entre le coefficient Los Angeles et les teneurs en hématite ( $R = 0,85$ ) et en silice ( $R = -0,81$ ). Cette corrélation est caractérisée par une diminution du coefficient Los Angeles quand la teneur en hématite croît, et par une hausse de ce même coefficient lorsque la teneur en alumine augmente. Il ne semble pas exister de corrélation entre l'alumine et le coefficient Los Angeles ( $R = 0,076$ ).

Lorsque l'on procède à des corrélations sur des échantillons en petit nombre (nombre d'échantillons inférieur à 30), il est toujours difficile de donner une signification à notre résultat. C'est ainsi, que l'on a recouru à la méthode du test de Student. Cette méthode est basée sur la comparaison entre  $t_{lu}$ , au seuil de signification voulu, et  $t'$  calculé selon la formule suivante :

$$t' = R * (N-2)^{1/2} / (1-R^2)^{1/2}$$

$N$  : nombre d'échantillons analysés

$R$  : coefficient de corrélation

Ainsi, lorsque  $t$  est inférieur à  $t'$ , on dit que la corrélation est significative [5]. Le degré de liberté est de cinq.

La méthode du test de Student (loi de Student), appliquée à nos échantillons (tableau 3), permet d'arriver à la conclusion que nos corrélations sont significatives. En d'autres termes, pour un nombre infini d'échantillons, la probabilité que nos corrélations soient bonnes est de 0.95. Il est bon aussi de remarquer, qu'en ce qui concerne l'essai CBR, les corrélations obtenues présentent au seuil 0.01, un  $t$  (4.032) inférieur à  $t'$  (5.510). La probabilité que ces corrélations soient bonnes pour un nombre infini d'échantillons est de 0.99.

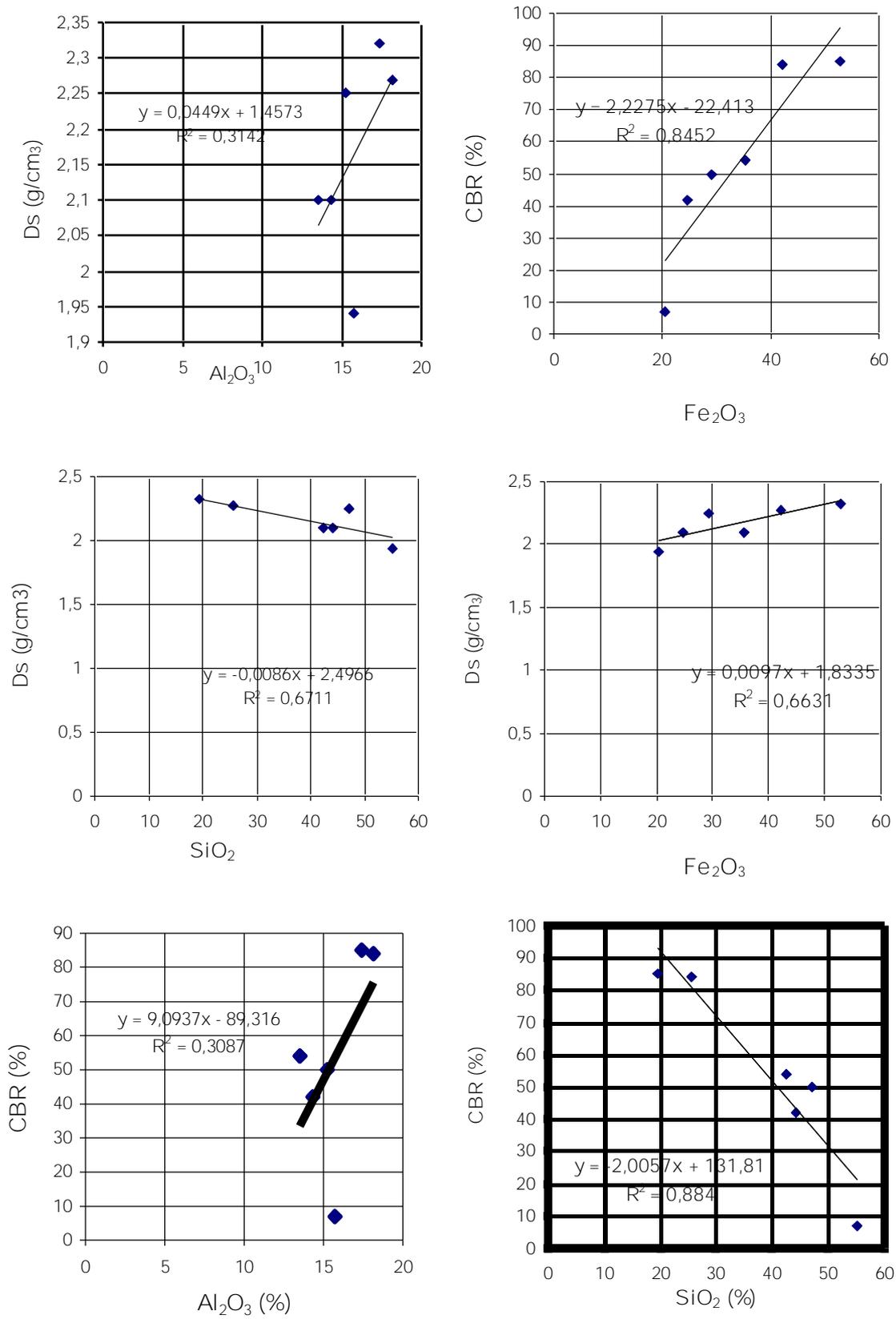


Figure 3 : Corrélation entre les propriétés géochimiques et les caractéristiques géomécaniques

Tableau 3 : Test de Student appliqué aux matériaux

Coefficient de corrélation	t (seuil de signification 0.05)	t'
$R_1 = 0.81$	2.571	2.762
$R_2 = 0.82$	2.571	2.865
$R_3 = 0.94$	2.571	5.510
$R_4 = - 0.94$	2.571	5.510

#### 4.- Discussion

Notre étude montre que les teneurs en oxydes de fer et en silice semblent avoir une influence sur les caractéristiques géomécaniques (densité sèche et CBR). Ainsi la masse spécifique (ou poids spécifique ou encore densité sèche) des latérites est fonction de leur teneur en fer et en silice, ces résultats sont confirmés par Bagarre [6] selon qui les roches mères riches en quartz donnent des graveleux latéritiques à poids spécifiques faibles. Par contre, les corrélations obtenues, d'une part, entre le C.B.R. et les teneurs en oxydes ferriques, et entre le C.B.R et les teneurs en silice d'autre part, constituent des résultats nouveaux. Elles peuvent trouver leur explication dans le fait que le C.B.R d'un matériau varie avec sa densité sèche. En effet, plus la densité sèche d'un matériaux est grande, plus son C.B.R. est élevé et inversement.

De tous les éléments majeurs constitutifs des latérites, le fer est sans conteste l'élément le plus dense et le mieux à même de résister aux contraintes, d'où son effet bénéfique sur les propriétés géomécaniques des latérites. Des études menées par Autret cité par Bagarre [6], arrivent à la conclusion que l'essentiel du fer des graveleux latéritiques est concentré dans le squelette, or c'est à ce dernier que les chaussées doivent leur portance. Le rôle du fer est donc primordial dans la qualité géotechnique des latérites.

D'après Maignien [7] « les processus de latérisation (altération et cuirassement) sont plus intenses et plus généralisés sur

les roches basiques que sur les roches acides ». Il ajoute aussi que les teneurs en silice, tant combinées (sous forme de kaolinite) que résiduelles (sous forme de quartz) sont moins importantes dans des latérites développées sur roches basiques ( $\% \text{SiO}_2 < 52$ ) que sur roches acides ( $\% \text{SiO}_2 > 66$ ). Leprun [8] quant à lui, affirme que ce sont sur les roches riches en ferromagnésiens et plus particulièrement sur les roches basiques que se rencontrent les latérites les plus épaisses, les plus dures (donc les plus riches en fer). C'est le cas au niveau du profil de Kondokho où la cuirasse est plus épaisse sur roche basique (dolérite) que sur roche acide [9].

En ce qui concerne la prospection des latérites, les roches mères présentant le caractère basique le plus accentué devront être privilégiées. Ainsi Wackerman [10], dont le travail portait sur l'altération des massifs basiques du Sénégal Oriental, arrive aux conclusions suivantes : les cuirasses sur roches ferromagnésiennes sont riches en fer, épaisses, denses et se présentent en relief dans le paysage, les cuirasses développées sur roches moins riches en minéraux ferromagnésiens et riches en quartz, sont de densité moindre, moins dures, peu épaisses, et moins riches en fer. Wackerman met donc là en évidence, une lithodépendance, c'est à dire une relation entre la roche mère et les caractéristiques de latérites au Sénégal Oriental, qui fut sa zone d'étude.

Il convient toutefois d'observer la plus grande des prudences quant à une généralisation de nos corrélations. Tout d'abord, notre travail concerne des latérites provenant des formations birrimiennes, et qu'il n'est pas sûr que nous serions arrivés à de telles conclusions sur des latérites provenant des roches datant du primaire ou du secondaire.

Ensuite parce que la lithodépendance mise en évidence par Wackerman au Sénégal Oriental, n'est pas observée partout. En effet, il se peut que sur des roches mères très pauvres en minéraux ferromagnésiens se développent des

latérites d'épaisseur non négligeables, c'est le cas des grés du massif de N'diass [11]. En d'autres termes, une latérite n'a parfois aucune relation avec la roche mère sous jacente (phénomène d'allochtonie). Ce phénomène d'allochtonie a été observé dans la région de Blafo – Guéto, en Côte d'Ivoire, près du village de Tokréyaokro, où le haut glacis riche en matériaux allochtones (gravillons ferrugineux et débris de cuirasse pour l'essentiel), atteint par endroits 7 mètres d'épaisseur. D'après Grandin [12], dans cette même région, le moyen glacis, en contrebas du haut glacis, doit son cuirassement au fer qu'il reçoit de ce dernier.

#### 5.- Conclusion

Au terme de cette étude portant sur la corrélation entre les propriétés géochimiques et les caractéristiques géomécaniques des latérites, nous sommes arrivés à un certain nombre de constatations : l'hématite et la silice sont respectivement corrélés positivement et négativement à la densité sèche et au C.B.R. L'hématite renforce donc les caractéristiques géomécaniques des latérites alors que la silice semble les diminuer. L'alumine, par contre, n'a aucune corrélation satisfaisante.

En matière de prospection, les latérites autochtones, d'aspect meuble, développées sur des roches basiques devront être privilégiées. Dans les zones où prévalent des phénomènes d'allochtonie, aucune conclusion hâtive ne doit être tirée. En effet dans ce contexte, des latérites de bonne qualité peuvent se développer sur roches acides.

#### 6.- Références

[1] Fall M. – Les latérites et les sols latéritiques. Rapport d'étude, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1991 : 32p.  
 [2] Ritz M., Parisot J. C., S Diouf., A Beauvais., F. Diome., M. Niang– Electrical imaging of lateritic weathering mantles over granitic and metamorphic basement of

eastern Senegal, West Africa. *Journal of Applied Geophysics* 41 (1999) 335-344.

[3] Bessoles B. (1977). Géologie de l'Afrique. Le Craton ouest africain. *Mémoire du B.R.G.M, n°88* : 402p.

[4] Bassot J.P. (1966) – Etude géologique du Sénégal Oriental et de ses confins guinéo-maliens. *Mémoire du B.R.G.M. n°88* : 402p.

[5] Venuat M. – Précis de statistique, exemple d'utilisation pour le ciment. Publication technique n° 102. Laboratoire du centre d'études et de recherches de l'industrie des liants hydrauliques, 1959, Paris VII : 62p.

[6] Bagarre E.– Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière. Centre expérimental de recherches et d'études du bâtiment et des travaux publics (CEBTP), 1992 : 120p.

[7] Maignien R– Compte rendu sur les latérites. Recherche sur les ressources naturelles, 1966, n°4, UNESCO Paris : 155p.

[8] Leprun J.C– Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche Genèse – Transformation – Dégradation. *Mémoire n° 58 sciences géologiques. Université Louis Pasteur de Strasbourg, Institut de Géologie, 1979, 224p.*

[9] Blot, A. (1980) : L'altération climatique des massifs de granite du Sénégal, Travaux et documents de l'ORSTOM, 1980, 431 pages.

[10] Wackerman J. M. L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale semi-aride : Etudes minéralogiques et géochimiques des arènes du Sénégal Oriental, conséquences pour la cartographie et la prospection ; thèse d'état, soutenu le 30 Mai 1975 à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, Institut de Géologie, 1975, 224p, O.R.S.T.O.M., Paris.

[11] Nahon D. (1976). Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. *Systèmes évolutifs : géochimie, structure,*

relais et coexistence. *Sci. géol. Mém.*,  
*vol.44* : 232p.

[12] Grandin G.– Aplanissement cuirassés  
et enrichissement des gisements de  
Manganèse dans quelques régions de  
l'Afrique de l'Ouest, 1976 – Mémoire  
ORSTOM n° 28 : 268p.