

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Etude de Quelques Propriétés Physico-mécaniques d'Echantillons de Latérites Eluviales

Study of Physico-mechanical Properties of Samples of Eluvial Laterites

par J. FLORENTIN, G. L'HÉRITEAU et M. FARHI, Ingénieurs-Conseils, 'Mecasol', Paris, France

Sommaire

Les auteurs rappellent le processus de la latérisation. Les roches mères des échantillons étudiés sont des schistes, des dolérites et des granites, il n'y a pas de carapace latéritique. Les échantillons ne sont pas saturés.

Les matériaux latéritisés ont des densités très faibles, les plus faibles valeurs s'obtenant avec les roches mères granitiques ou doléritiques. La plasticité varie avec la roche mère et le degré de latérisation; pour les latérites d'origine schisteuse ou granitique, elle croît de bas en haut, pour les latérites doléritiques, elle semble décroître.

Les résistances à la compression simple moyenne sont élevées malgré la faible compacité. Les résistances mesurées par des essais triaxiaux montrent que par consolidation, la résistance mécanique croît, la pression des pores pendant l'essai de cisaillement à drainage fermé restant faible. Les essais de compressibilité montrent la faible influence de la mise en eau des échantillons sous charge. La non saturation initiale conduit à des tassements rapides.

Le Processus de Latérisation

La latérisation se rattache à la kaolinisation dans les conditions de température et de précipitations atmosphériques propres aux régions tropicales.

L'alcalinité des eaux superficielles croît avec la température, et les sesquioxides produits par l'hydrolyse précipitent, à partir de leurs solutions colloïdales, dès que le pH atteint 8 à 10. Par contre, la stabilité des solutions colloïdales de silice, qui précipitent en milieu acide, se trouve accrue et la silice peut être transportée très loin sous forme de complexes métallo-siliciques.

Dans chaque site, il naît au contact de la roche mère, une 'zone de départ' à réaction alcaline. Les complexes colloïdaux de silice restent dispersés et émigrent avec les eaux de drainage, entraînant les bases. Les sesquioxides y floculent. L'hydrolyse peut se continuer — dans l'horizon par suite de la rupture de l'équilibre chimique — en profondeur par suite de l'augmentation de la porosité.

Le départ des bases crée une zone de surface à réaction acide. Les sesquioxides restent dispersés et subissent des migrations, ascendantes ou descendantes, suivant l'alternance des saisons. L'évaporation provoque une concentration des sesquioxides. Les concrétions ferrugineuses qui peuvent se former s'agglomèrent sous certaines conditions (profondeur, végétation, topographie . . .) pour donner la carapace. La texture de la roche mère s'estompe généralement lorsque l'on s'en éloigne. Elle peut même disparaître complètement.

L'analyse précédente est très sommaire. Le stade ultime de l'évolution latéritique: carapace, concrétions ou argile plus ou moins différenciée de la roche mère, dépendre de certains facteurs qui influent sur la vitesse des réactions physico-chimiques: nature de la roche mère présence et profondeur de la nappe, topographie du sol, couverture végétale, climat local (vents, humidité . . .).

On aboutit ainsi à la notion de 'latérite vivante', l'évolution se poursuivant dans le site même, par modification de certains facteurs (ouverture de tranchées, exposition au soleil, etc. . .), ou par changement de site (latérites utilisées après transport comme matériaux routiers).

Summary

The process of formation of laterite is first considered. The mother rocks of the samples studied were schists, dolerites and granites without any covering of laterite. The samples were not saturated.

The lateritic materials were of very low density, the lowest values being obtained when the mother rocks were granite or dolerite. Plasticity varied with the mother rock and the degree of laterization. With laterites from schist or granite it decreased from top to bottom, for laterites from dolerite it appeared to increase.

The resistance to simple compression was high in spite of the poor compaction. The triaxial test showed that strength is increased by consolidation: the pore pressure was small during a shear test where drainage was prevented. Compressibility tests showed the weak effect that immersion in water had on specimens under load. The initial lack of saturation would be conducive to rapid settlements.

Géologie et Latérisation des Sites Examinés

Pour illustrer les propriétés des latérites éluviales, nous avons choisi les échantillons prélevés à l'occasion de l'étude de deux barrages, dans deux sites géologiquement différents: le site A en Guinée (latitude 10° N), le site B en Côte d'Ivoire (latitude 6° N).

Site A—Il est constitué par un schiste Silurien à stratification horizontale, dans lequel se sont développées, parallèlement à la schistosité, des intrusions de grande épaisseur (20 m) de dolérite d'origine volcanique. Au contact de la dolérite, les schistes donnent des cornéennes par métamorphisme.

Schiste et dolérite constituent les roches mères des latérites formées par altération éluviale, le degré d'altération est très différent suivant la nature de la roche mère.

Dans le cas des dolérites il est très élevé; la structure de la roche mère est imperceptible dès qu'on s'en écarte légèrement. L'altération pénètre progressivement en profondeur en raison des propriétés isotropes de la dolérite, roche éruptive. La profondeur d'altération est comprise entre 10 et 20 m. En général, l'argile latéritique profonde est plastique. Elle est surmontée de produits d'altération qui après 'lessivage' des produits solubles ont subi le cycle normal d'enrichissement en sesquioxides de fer et alumine.

Les latérites d'origine doléritique sont rouges ou bariolés de jaune. Les variétés roughes correspondent à une altération plus poussée et se recontrent en général au-dessus des bariolées. Elles contiennent des concrétions; certaines sont dures, les autres sont poreuses et légères.

Dans le cas des schistes, le degré d'altération est plus faible, et l'on retrouve au-dessus de la roche mère des traces de la structure litée. La profondeur d'altération est comprise entre 16 et 18 m. Les matériaux lités de latérisation incomplète n'ont pas la couleur rouge caractéristique des latérites. Les phénomènes capillaires verticaux sont compliqués d'une circulation horizontale due à la schistosité et qui doit jouer un rôle important surtout au voisinage des affleurements. Les schistes altérés ont l'aspect de feuilletés ayant subi une altération individuelle qui dans certains cas atteint le stade d'une indura-

tion ferrugineuse. Les couleurs varient d'un feuillet à l'autre, certains présentent plusieurs colorations vives, nettement différentes du gris de la roche mère.

Au-dessus des matériaux lités, l'altération conduit à des matériaux rouges ou rouges et jaunes dont l'apparence est très voisine de celle des matériaux d'origine doléritique.

Site B— Il est constitué par une vallée creusée dans un batholite de granodiorite que surmonte un épais manteau latéritique de 15 à 20 m d'épaisseur.

Les roches mères des échantillons prélevés comprennent: des granites, des granodiorites, des diorites. Elles donnent comme produits d'altération, des argiles latéritiques quartzzeuses rouges et jaunes pour le granite, rouge-organge pour les granodiorites et diorites.

La différence de nature des roches mères par ailleurs voisines, a moins d'influence sur la latérisation que le changement de zone d'évolution:

— en surface (2 à 4 m de profondeur), on rencontre des nodules plus ou moins durs et résistants, riches en hydrates ferrugineux, mais avec peu de concrétions ferrugineuses proprement dites.

— dans une zone intermédiaire (de 4 à 8 m de profondeur) on rencontre les argiles latéritiques proprement dites, bariolées ou de couleur uniforme.

— dans la zone profonde (au-dessous de 9 m de profondeur), on retrouve des traces de la roche mère désagrégée, mais n'ayant plus de comportement rocheux.

Dans les descriptions précédentes, il manque la 'carapace latéritique' de structure spongieuse, mais dure, caractéristique des sites à latérisation complète. Pour A, comme pour B, cette carapace existe sur les plateaux. Elle manque sur les flancs de la vallée. Deux explications peuvent jouer simultanément:

— entraînement par érosion des concrétions pisolithiques dont l'agglomération donnerait la carapace.

— conditions d'humidité différentes sur les talus de la vallée, les tensions de vapeur très faibles qu'impliquent la formation de la carapace s'y trouvent plus difficilement réalisées que sur le plateau.

Propriétés Physico-mécaniques

Nous avons reporté sur les Tableaux 1 et 2 relatifs aux sites A et B, quelques unes des caractéristiques déterminées sur les

échantillons. Les échantillons sont classés, pour chaque site, par ordre de profondeur croissante, il nous a paru intéressant de chercher à nous rendre compte de l'influence de la position des échantillons dans le profil en voie de latérisation.

Pour le site A nous avons séparé les matériaux suivant leur origine doléritique ou schisteuse.

(a) *Teneur en eau naturelle* ($w\%$) — Les échantillons ne sont pas saturés. Il ne semble pas qu'il y ait eu de dessiccation au cours du prélèvement et du transport d'après les vérifications qui ont pu être faites par des mesures sur place avant l'expédition.

Toutes les teneurs en eau ont été mesurées suivant la méthode normale après passage à l'étuve à 105°, sans tenir compte de la transformation irréversible, à cette température, de certains gels minéraux existants dans les latérites.

(b) *Poids spécifique apparent* (γ_d) — Ils sont presque toujours faibles. Les valeurs les plus élevées correspondent aux échantillons superficiels, elles sont dues à la présence de concrétions. Dans les zones plus profondes où il n'y a pas de concrétions, on ne constate pas d'augmentation de la compacité avec la profondeur. La compacité varie en fonction du délavage.

Les poids spécifiques apparents des latérites d'origine schisteuse sont systématiquement plus élevés que ceux des latérites d'origine doléritique ou surtout granitique.

(c) *Teneur en eau de saturation* (w_s) et *pourcentage de saturation* ($S_r\%$) — Seuls sont saturés quelques échantillons relativement profonds du site B. La teneur en eau de saturation des échantillons du site B est généralement supérieure à la limite de plasticité. Il n'en est pas de même pour les échantillons du site A, qu'ils soient d'origine doléritique ou schisteuse, leur teneur en eau de saturation est plus faible que PL , ce qui montre l'influence de la tension de vapeur dans les pores.

Les faibles valeurs de γ_d et les fortes valeurs de w_s correspondantes, caractérisent une forte porosité. On peut avoir une idée du lessivage important produit sur place à partir de la roche mère par le processus de latérisation. Le Tableau 3 ci-dessous montre que la perte de poids moyenne doit être comprise entre 46 et 56 pour cent du poids initial.

Les schistes ont été moins délavés que les dolérites ou les granites, vraisemblablement en raison des conditions particulières de la circulation de l'eau (anisotropie).

(d) *Plasticité* — Les valeurs de LL , PL et PI portées sur les

Tableau 1
Site A — Dolérite

<i>Ech.</i>	<i>Profondeur</i>	$w\%$	LL	PL	PI	γ_d	w_s	$S_r\%$	CI	$C'I$	R_c kg/cm ²	<i>Observations</i>
4	4.5 m	33.7	68.8	45.3	23.5	1.35	40.3	83.6	1.49	1.21	3.1	
1	5.7 m	37.9	69.0	42.0	27.0	1.29	43.5	87.2	—	0.95	2.4	
2	7.5 m	40.2	—	—	—	1.28	44.7	90.0	—	—	1.9	
5	8.3 m	43.0	—	—	—	1.21	47.7	90.0	—	—	1.6	
7	10.0 m	40.8	73.8	41.4	32.4	1.24	46.1	90.5	—	0.85	1.2	
3	10.4 m	41.1	—	—	—	1.27	43.7	94.2	—	—	1.9	
6	10.5 m	36.2	56.2	35.2	21.0	1.35	38.5	94.0	0.95	0.85	0.7	
<i>Moy.</i>		38.9				1.28	43.5	89.9			1.8	
Site A — Schiste												
15	0.5 m	18.7	—	—	—	1.76	20.2	92.5	—	—	2.8	<i>Lité</i>
8	3.5 m	21.0	59.2	32.4	26.8	1.36	38.3	54.8	1.43	0.73	0.7	<i>Non lité</i>
9	5.5 m	37.5	67.3	42.3	25.0	1.32	40.7	92.0	1.19	1.06	2.9	<i>Non lité</i>
10	5.5 m	23.9	45.5	29.7	15.8	1.52	30.7	78.0	1.37	0.93	2.4	<i>Non lité</i>
11	7.5 m	26.0	—	—	—	1.55	28.3	92.0	—	—	2.1	<i>Non lité</i>
14	9.0 m	20.5	—	—	—	1.48	31.4	65.4	—	—	1.1	<i>Lité</i>
13	11.0 m	34.9	66.6	38.3	28.3	1.39	36.1	97.0	1.12	1.08	3.1	<i>Lité</i>
12		21.6	41.7	30.4	11.3	1.52	30.4	71.0	1.78	1.0	1.5	<i>Non lité</i>
<i>Moy.</i>		25.5				1.49	30.2	80.3			2.1	

Tableau 2

Site B

Ech.	Profondeur	w%	LL	PL	PI	γ_d	w_s	$S_r\%$	CI	C'I	R_c kg/cm ²	Observations
1	2.0 m	26.0	—	—	—	1.61	26.4	98.5	—	—	4.3	
5	2.1 m	28.7	70.2	33.4	36.8	1.47	32.2	89.0	1.13	1.03	3.9	
26	3.6 m	31.3	82.2	35.6	46.6	1.41	36.3	86.3	1.09	0.94	1.9	
19	4.0 m	40.3	73.9	36.1	37.8	1.29	42.5	95.0	0.89	0.83	1.7	
2	6.0 m	37.4	77.6	38.3	39.3	1.32	40.3	92.5	1.03	0.95	1.6	
3	6.0 m	35.9	58.8	41.6	17.2	1.24	44.7	80.4	1.33	0.82	1.4	
7	6.0 m	40.7	—	—	—	1.25	44.2	92.0	—	—	2.2	
11	6.0 m	45.2	76.1	44.0	32.1	1.16	50.4	89.8	0.96	0.83	1.5	
15	6.0 m	37.9	59.1	34.0	25.1	1.30	41.2	92.4	0.85	0.68	1.6	
22	6.0 m	39.2	—	—	—	1.24	44.8	87.5	—	—	1.3	
27	6.0 m	38.2	84.7	35.0	49.7	1.37	38.2	100.0	0.93	0.93	1.8	
8	7.20 m	44.3	—	—	—	1.18	48.7	91.0	—	—	2.0	
18	8.0 m	37.8	—	—	—	1.35	38.2	98.9	—	—	2.0	
28	8.75 m	44.4	—	—	—	1.24	44.6	99.5	—	—	1.1	
4	9.0 m	44.4	58.8	46.3	12.5	1.20	47.4	93.8	1.15	0.91	1.2	
12	9.0 m	47.1	57.8	44.6	13.2	1.20	47.3	99.5	0.80	0.79	1.3	
14	9.4 m	51.9	—	—	—	1.09	55.8	93.0	—	—	1.5	
16	10.0 m	64.1	62.7	47.8	14.9	1.01	64.1	100.0	< 0	< 0	1.2	
10	10.4 m	55.3	—	—	—	1.08	56.7	97.8	—	—	1.8	
23	10.5 m	49.9	—	—	—	1.12	49.9	100.0	—	—	1.2	
6	10.8 m	46.9	53.3	41.9	11.4	1.18	48.7	96.4	0.56	0.40	1.1	
29	11.6 m	43.8	71.6	38.5	33.1	1.23	45.3	96.9	0.84	0.76	1.3	
Moy.		42.2				1.26		94.0			1.76	

Tableau 3

Nature	Site	γ_d moyenne	γ_d moyenne roche- mère	Perte de poids moyenne
Dolérite	A	1.28	2.89	56%
Schiste	A	1.49	2.76	46%
Granite	B	1.26	2.80	55%

calculer un indice de consistance $C'I$ à partir de la teneur en eau de saturation

$$C'I = (LL - w_s)/PI$$

Malgré une grande porosité, CI reste voisin de 1 en raison de la grande valeur de PL . Certains échantillons profonds du site B ont des indices de consistance beaucoup plus faibles, tout en ayant un aspect et une consistance réelle analogues (site B: échantillon 16 à 10 m $CI = C'I < 0$, et échantillon 6 à 10.80 m $C'I = 0.40$).

(f) *Résistance à la compression simple (R_c)* — Ce qui paraît le plus frappant ce sont les résistances à la compression simple relativement élevées pour les faibles densités du matériau. Par contre, si l'on compare les R_c mesurées à celles données dans la bibliographie pour des valeurs de CI du même ordre (voisin de 1), on trouve que les résistances mesurées ne sont pas très élevées.

Il faut remarquer que les R_c restent du même ordre pour des CI très faibles et même négatifs (site B: échantillon 16 à 10 m, $R_c = 1.2$ kg/cm² pour CI équivalent à 0, échantillon 6 à 10.80 m, $R_c = 1.1$ kg/cm² pour $C'I = 0.40$).

Cette particularité montre l'existence d'une résistance de structure d'origine chimique.

Dans le site B les valeurs élevées de R_c pour les deux échantillons les moins profonds sont dues à une induration superficielle. Si l'on fait exception de ces échantillons on ne constate pas, quel que soit le Tableau 1 ou 2, d'augmentation de R_c avec la profondeur. Par ailleurs, l'influence de la roche mère ne se fait pas sentir sur les valeurs de R_c .

(g) *Essais triaxiaux* — Les essais triaxiaux sur échantillons naturels ont été faits sur les matériaux du site A suivant deux processus: consolidés rapides, CR , avec mesure de la pression des pores, non drainés (consolidated quick, cq , undrained), et non consolidés rapides, NCR , avec mesure de la pression des pores, non drainés (unconsolidated quick, ucq , undrained). Ils ont été faits sous des étreintes allant jusqu'à 15 kg/cm². Pour le site B on a seulement exécuté des essais NCR .

Les résultats moyens obtenus sont rassemblés dans le Tableau IV ci-après.

Tableaux 1 and 2 sont les résultats des mesures faites sur des matériaux non étuvés. Quelques mesures ont été faites après étuvage. Elles montrent que la limite de liquidité LL baisse au maximum de 6 points, et que l'indice de plasticité PI baisse au maximum de 3 points. Les latérites examinées pour les sites A et B sont peu sensibles à l'étuvage. Dans d'autres cas nous avons constaté sur des échantillons latéritiques que l'étuvage pouvait avoir une action très importante, par exemple pour un même échantillon LL est passée de 78 à 49 pour cent, et PI de 43 à 14 pour cent. Dans tous les cas, la limite de plasticité PL est anormalement élevée.

Si l'on recherche l'influence de la profondeur on constate:

— pour le site A et les matériaux d'origine doléritique, la plasticité reste élevée; le tableau correspondant ne fait pas ressortir une influence de la profondeur, au contraire, d'après de nombreux essais de chantier, il semblerait que la plasticité croît avec la profondeur.

— pour le site A et les matériaux d'origine schisteuse, le tableau ne montre pas non plus l'influence de la profondeur, alors que les mesures de chantier faisaient apparaître une influence inverse, c'est-à-dire une décroissance de la plasticité avec la profondeur.

— pour le site B la plasticité décroît avec la profondeur.

(e) *Indice de consistance (CI)* — Les indices de consistance CI portés sur les Tableaux 1 et 2 correspondent à la définition conventionnelle

$$CI = (LL - w)/PI$$

Les échantillons n'étant pas saturés, il nous a paru utile de

Tableau 4

Site	Essais	Roche mère	γ_d initial	γ_d final	Domaine apparent		Domaine inter-granulaire	
					Cohésion C_u ou C_{cu} kg/cm ²	Angle ϕ_u ou ϕ_{cu} degrés	C' kg/cm ²	ϕ' degrés
A	N.C.R.	Dolérite	1.17	—	C_u 1.8	ϕ_u 21	1.2	26
A	N.C.R.	Schiste	1.48	—	0.6	14	0	18
B	N.C.R.	Granite	1.17	—	0.77	18	0.29	30
A	C.R.	Dolérite	1.24	1.36	C_{cu} 1.4	ϕ_{cu} 18	1.5	20
A	C.R.	Schiste	1.33	1.47	0.8	22	1.0	25

En raison de la non saturation des échantillons, l'influence de la consolidation sous étreinte ne paraît pas très grande, car l'augmentation de poids spécifique apparent des éprouvettes non consolidées est possible malgré la fermeture du drainage par suite de la teneur en air.

Le Tableau 5 ci-dessous donne la variation du poids spécifique apparent γ_d sous l'effet de l'étreinte de consolidation (σ_3 initial). Il montre que sous de fortes étreintes de consolidation, il y a une augmentation de la compacité.

Tableau 5

Site	Roche mère	Etreinte de consolidation σ_3 initial	γ_d				
			2 kg/cm ²	4 kg/cm ²	8 kg/cm ²	10 kg/cm ²	15 kg/cm ²
A	Dolérite	γ_d initial	1.26	1.22	1.24	—	1.21
		γ_d après consolidation	1.32	1.32	1.37		1.42
A	Schiste	γ_d initial	1.34	1.36	1.32	1.32	1.30
		γ_d après consolidation	1.44	1.47	1.46	1.46	1.52

Sous l'effet de l'étreinte on ne constate pas de suppression de la résistance de structure ou si elle se produit, elle est compensée par une augmentation de résistance due à l'augmentation de compacité. Dans tous les cas, contrairement à la crainte que l'on pouvait avoir, l'augmentation de l'étreinte et le dépassement de la résistance de structure n'entraîne pas une diminution de la résistance au cisaillement.

La pression des pores mesurée est restée faible et n'a jamais dépassée 1/4 de l'étreinte totale appliquée au cours de l'essai.

(h) *Compressibilité* — Les essais ont comporté :

- des essais normaux en présence d'eau
- des essais dits 'à sec', où l'éprouvette n'a été mise en

présence d'eau qu'après avoir été chargée sous 10 kg/cm² et stabilisée sous cette charge.

Les résultats des essais sont indiqués sur le Tableau 6 où les courbes oedométriques mesurées sont définies en coordonnées semi-logarithmiques par :

— la pression de consolidation p_c en kg/cm²

— l'indice de compression C_c au delà de p_c

$$[C_c = de / \{\log_e(p + dp) / p\}]$$

Tableau 6

Site	Roche mère	Echantillons	Profondeur mètres	p_c kg/cm ²	C_c
A	Dolérite	1	5.70	2.5	0.430
A	Dolérite	7	10.00	4.0	0.363
A	Dolérite	6	10.50	5.0	0.311
A	Schiste	8	3.50	2.2	0.281
A	Schiste	9	5t50	3.2	0.384
A	Schiste	13	11.00	6.5	0.327
B	Granite	19	4.00	4.5	0.289
B	Granite	3	6.00	4.8	0.597
B	Granite	7	6.00	4.9	0.339
B	Granite	11	6.00	4.3	0.522
B	Granite	15	6.00	6.0	0.631
B	Granite	12	9.00	5.3	0.865
B	Granite	14	9.40	6.0	0.680
B	Granite	23	10.50	4.2	0.744
B	Granite	6	10.80	3.7	0.585
B	Granite	29	11.60	4.7	0.531

La pression de consolidation a été déterminée par la construction de Casagrande, bien qu'il s'agisse d'une résistance de structure de nature chimique. Au delà de p_c la compressibilité est toujours très élevée, mais p_c est grand. La compressibilité semble plus forte dans la zone moyenne (5 à 9 m de profondeur environ).

Les tassements observés ne sont pas accrus sous l'effet d'une mise en eau ultérieure. Les teneurs en eau initiales sont suffisantes pour que les tassements dus à une modification de structure ne soient pas accentués par la mise en eau.

Par ailleurs, la teneur en air non négligeable des échantillons conduit à des tassements rapides, il n'a pas été possible de mesurer le coefficient de consolidation C_v pour cette raison.

En conclusion, les diverses caractéristiques mesurées sur des échantillons latéritiques font ressortir un comportement de ce matériau différent de celui couramment observé sur des argiles sédimentaires. Il nous a paru intéressant de rassembler ci-dessus quelques unes de ces caractéristiques. Les essais sont poursuivis sur d'autres latérites d'origine différente avec l'espoir de parvenir à mieux connaître l'influence des conditions particulières de formation des argiles latéritiques sur leur comportement physico-mécanique.