

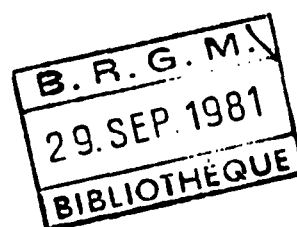
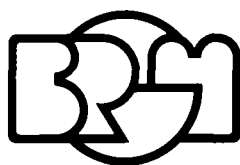
MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU CADRE DE VIE
DIRECTION DES AFFAIRES ÉCONOMIQUES INTERNATIONALES
34, rue de la Fédération - 75775 Paris Cedex 15

CORRÉLATION ENTRE LES CLASSIFICATIONS PÉDOLOGIQUES ET LES CLASSIFICATIONS GÉOTECHNIQUES DES SOLS TROPICAUX

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

par

Y. ATLAN (BRGM) - C. FELLER (ORSTOM) - M. VIARGUES (BRGM)



BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département génie géologique

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

Rapport du B.R.G.M.

81 SGN 322 GEG

Mai 1981

SOMMAIRE

<u>CHAPITRE I : CONCEPTS GENERAUX</u>	1
1 - POSSIBILITE ET INTERET DES CORRELATIONS PEDOLOGIE GEOTECHNIQUE ..	1
2 - CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE DES SOLS.....	4
3 - CLASSIFICATION PEDOLOGIQUE DES UNITES SUPERIEURES	5
3.1 But de la classification pédologique	11
3.2 Choix des critères de base	11
3.3 Hiérarchie des caractères	13
4 - COMPARAISON ENTRE LES DEUX CLASSIFICATIONS	14
5 - CLASSIFICATIONS GEOTECHNIQUES DES SOLS TROPICAUX.....	15
<u>CHAPITRE II : EXAMEN DE CORRELATIONS ENTRE PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES ET PROPRIETES GEOTECHNIQUES DES SOLS.....</u>	21
1 - TEXTURE	21
2 - POTENTIEL CAPILLAIRE.....	21
3 - PROPRIETES CHIMIQUES DE LA FRACTION MINERALE DU SOL.....	23
3.1 Phénomène d'échange de cations dans le sol.....	23
3.2 Acidité du sol.....	27
4 - MINERALOGIE.....	28
4.1 Argiles.....	29
4.2 Sesquioxides.....	32
<u>CHAPITRE III : MONOGRAPHIES DES ETUDES LIANT CARACTERISTIQUES PEDOLOGIQUES ET PROPRIETES GEOTECHNIQUES.....</u>	35
1 - ETUDE "LYON ASS".....	36
1.1 Etude des sols latéritiques.....	37
1.2 Etude des argiles noires tropicales.....	43
2 - RESULTATS DES ETUDES EXECUTEES AU GHANA.....	45
3 - LE NIGERIA.....	50
3.1 Les sols latéritiques du Nigéria.....	50
3.2 Les vertisols.....	53

4 - LA COTE D'IVOIRE.....	53
5 - LE SENEGAL.....	56
<u>CHAPITRE IV</u> : CONCLUSION.....	59
BIBLIOGRAPHIE.....	61

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Teneur en eau à pF 4,2 en fonction de la texture (HALLAIRE 1956).
- Figure 2 : Relation entre la capacité d'échange et la fraction argileuse (GIDIGASU 1971)
- Figure 3 a : Relation entre la capacité d'échange, la fraction argileuse et IP (DE LA ROSA 1979).
- Figure 3 b : Relation entre la capacité d'échange, la fraction argileuse et Wopt (DE LA ROSA 1979)
- Figure 4 : Variation du pH en fonction du rapport S/T.
- Figure 5 : Relation entre le poids spécifique et la teneur en sesquioxides (MADU 1977).
- Figure 6 : Répartition des sols latéritiques en Afrique (LYON ass 1976).
- Figure 7a,b,c : Fuseaux granulométriques des sols latéritiques.
a : sols ferrugineux,
b : sols ferrallitiques,
c : ferrisols
(LYON ass 1976).
- Figure 8 : Relation entre CBR et le produit $m \times IP$ pour les sols latéritiques (LYON ass).
- Figure 9 : Fuseau granulométrique des argiles noires (LYON ass 1976).
- Figure 10 : Profil latéritique (GIDIGASU 1980).
- Figure 11 : Courbes granulométriques fonction de la méthode de séchage (GIDIGASU 1980).
- Figure 12 : Courbes granulométriques obtenues en fonction de la roche mère (KAHL 1976).
- Figure 13 : Relations entre LL, IP, Wopt, LR et la teneur en sesquioxides (MADU 1977).

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1, 2, 3	: Classification des sols selon WAGNER 1957.
Tableau 4, 5	: Classification des sols selon la SETRA et le LPC
Tableau 6	: Classification des sols tropicaux d'après LITTLE 1969
Tableau 7	: Classification des sols tropicaux d'après CLARE 1969
Tableau 8	: Caractérisation des trois classes de sols turrigineux, ferrallitiques, ferrisols.
Tableau 9	: Echantillons d'argiles noires analysés (LYON ASS.)
Tableau 10	: Résultats des essais physico-chimique exécutés sur des sols de GHANA (Gidigasú 1971)
Tableau 11	: Caractéristiques des sols étudiés au GHANA (Gidigasú 1971)
Tableau 12	: Caractéristiques géotechniques des sols du Nigéria selon KAHL 1979.
Tableau 13	: Classification des sols latéritiques d'après ATLAN (1974).
Tableau 14	: CBR des argiles latéritiques de Côte d'Ivoire.
Tableau 15	: Classes géotechniques des sols des graveleux latéritiques de Côte d'Ivoire (MENIN).

AVANT PROPOS

Ce rapport est la première partie d'une étude qui a pour objet l'examen des applications de la pédologie à la géotechnique routière dans les pays tropicaux et plus spécialement en Afrique.

Nous présentons ici une étude à base bibliographique où sont analysés :

1 - Les difficultés conceptuelles

2 - Les résultats expérimentaux acquis liant caractérisation pédologique des sols et propriétés géotechniques des matériaux.

La seconde partie de l'étude consistera à tenter de montrer, sur un exemple concret, comment les données et les méthodes pédologiques et en particulier les cartes peuvent être utilisées. Pour cela dans la région choisie (Le Sénégal) :

a) il sera procédé à des essais sur les principaux types pédologiques de sol.

b) Les unités de la carte pédologique au 1/1000 000 seront alors regroupées -ou divisées- de manière à former des groupes homogènes géotechniquement. L'accent devra être mis sur les principes généraux de manière à ce que les méthodes mises au point puissent être utilisées dans d'autres régions tropicales d'Afrique.

CHAPITRE I

CONCEPTS GENERAUX

1 POSSIBILITE ET INTERET DES CORRELATIONS PEDOLOGIE - GEOTECHNIQUE

L'idée d'utiliser les résultats obtenus par les pédologues et en particulier les cartes pédologiques pour faciliter les reconnaissances géotechniques relatives aux ouvrages de génie civil (surtout projet de route, de voies ferrées, d'aéroport et de grands ensembles d'habitation) n'est pas récente. LEONARDS 1962 cite des recherches, datant de 1940, 1943, 1954, effectuées par le Michigan State Highway Department et ayant précisément pour objet de montrer la possibilité d'application des résultats de la pédologie aux grands travaux de génie civil.

Il faut néanmoins constater que ces tentatives n'ont pas été poursuivies à la seule exception du cas des sols tropicaux. Une raison évidente, de cet état de fait est que en réalité le domaine physique étudié par la pédologie ne coïncide pas totalement avec celui étudié par la géotechnique.

- Pour la géotechnique la notion de sol est avant tout mécanique. Un sol est une roche meuble (ARNOULD, 1968) composée d'eau, d'air, de grains solides minéraux qui peuvent être séparés par des moyens mécaniques peu puissants comme l'agitation dans l'eau (TERZAGHI, 1965). D'autres définitions du matériau sol au sens géotechnique ont été données, qui reviennent toutes à la notion de "roche meuble".

Citons parmi les plus expérimentales et les plus empiriques celle de WINTERKORN. "Le sol, au sens géotechnique comprend tous les matériaux de la croûte terrestre qui peuvent être extraits à la pelle" et parmi les plus soucieuses de rigueur celle de LAMB pour qui un sol est composé de particules non fortement liées entre elles et dont le comportement relève de la "mécanique particulaire", mécanique à placer entre la mécanique des solides et la mécanique des fluides.

- Pour la pédologie la notion de sol est à la fois plus complexe et plus limitée dans l'espace. MATTSON a pu dire que le sol se formait au point d'intersection de l'atmosphère, de l'hydrosphère et de la biosphère: le

sol pour la pédologie est donc le résultat sous l'action combinée des facteurs du milieu écologique de la transformation de la roche mère. Selon Duchaufour, le substratum géologique, la "roche mère", fournit, par sa décomposition, les éléments minéraux du profil, alors que la végétation donne naissance à la matière organique : les facteurs climatiques et biologiques provoquent une transformation et un mélange, plus ou moins complet de ces éléments ; en outre, les substances solubles ou colloïdales peuvent se déplacer d'un horizon à un autre : certains sont appauvris, d'autres enrichis : l'ensemble de ces processus conduit à la différenciation des horizons, au développement du profil.

Le sol au sens pédologique est constitué par le profil :
sa désignation correcte devra comprendre quatre termes fondamentaux.

- 1° Un terme d'évolution pédologique
- 2° Un terme de texture (complétée par la structure)
- 3° Un terme de profondeur : superficiel, peu profond, profond... ;
- 4° Un terme précisant la nature de la roche mère

On note donc :

a) qu'une même formation peut être considérée comme un sol par le géotechnicien et comme une roche (meuble) n'entrant pas dans son domaine d'étude par le pédologue.

b) que le pédologue ne s'intéresse qu'à la frange superficielle de la croûte terrestre constituée par l'altération de la roche mère, et cela surtout du point de vue de son évolution.

Or, dans les pays tempérés l'épaisseur du sol au sens pédologique est souvent faible (inférieur à 1 à 2 m) ; l'apport des données pédologiques est donc assez peu utile à l'ingénieur en génie civil qui le plus souvent doit prendre en compte dans ses projets les caractéristiques de couches de terrain de plus de 10 m de puissance.

Par contre dans les pays tropicaux, la profondeur d'un profil pédolo-

gique est le plus souvent importante, suffisamment pour que les matériaux constitutifs du profil pédologique soient le support des fondations des bâtiments ou de route, ou bien les matériaux de viabilité des chaussées. ATLAN et FELLER notent que cette opposition entre l'utilisation de la pédologie en pays tempéré et en pays tropical est encore renforcé par l'état différent de développement économique qui existe entre les zones tempérées et les zones tropicales. En ce qui concerne les travaux routiers, ils constatent en effet que dans les pays développés tempérés, où la technique routière a pour objet la construction de routes à fort trafic, l'application des études pédologiques est réduite puisque :

- les terrassements (déblais, remblais) sont suffisamment importants pour que le plus souvent le niveau de la plate-forme de la route ne soit pas, géométriquement, dans la frange des matériaux superficiels qui sont le domaine de la pédologie ;
- le corps de chaussée est fait à partir de concassés souvent stabilisés au ciment, au bitume ou au laitier ;
- l'épaisseur du corps de chaussée, couche anti-géline éventuellement comprise, est assez grande pour absorber la majeure partie des contraintes (normales et de cisaillement) engendrées par le trafic et réduire ainsi l'influence sur la pérennité de la route de la nature du sol de fondation.

Dans les pays tropicaux en voie de développement, la situation est totalement différente. Le plus souvent pour des raisons économiques et d'adaptation des structures de chaussée à un trafic relativement faible, on a :

- une route qui colle au terrain ;
- un corps de chaussée fait à partir de matériaux naturels : sable, graveleux argileux etc. ;
- une épaisseur de chaussée inférieure à 40 cm.

En outre, même si des terrassements sont nécessaires, le niveau de la plate-forme reste en général dans le domaine étudié par la pédologie, car le

développement des profils peut atteindre plusieurs mètres du fait du processus d'altération de la roche-mère en région tropicale et équatoriale.

En conclusion de cette introduction, il se dégage semble t-il, l'idée qu'en région tropicale il est intéressant de tenter d'utiliser les données pédologiques pour aider à une meilleure classification géotechnique des sols et cela bien que les méthodes et les concepts de la pédologie et de la géotechnique soient très différents.

Nous avons jusqu'à présent examiné les possibilités d'utilisation des résultats pédologiques en géotechnique. On peut aussi se poser la question inverse : y a-t-il des techniques géotechniques susceptibles d'intéresser les pédologues ? Ce n'est pas le propos de ce papier de traiter cette question. Signalons cependant les études sur le compactage des sols sous l'effet du trafic (agricole) mené par les pédologues (GUERIF, FAVRE, STENGEL 1979) à l'aide de l'essai de compactibilité PROCTOR. Ces auteurs aboutissent, entre autres, à définir des limites de liquidité et de plasticité variant avec l'énergie du compactage imposé au sol.

2 - CLASSIFICATIONS GEOTECHNIQUES DES SOLS

Les classifications géotechniques ont un but essentiellement pratique : permettre de placer un sol donné dans une catégorie présentant des propriétés mécaniques ou hydrauliques analogues et cela au moyen d'observations simples et d'essais peu coûteux.

En fait, plusieurs classifications différentes ont été proposées chacune étant particulièrement utile pour aider à la résolution de tel ou tel type de problème. Aux USA le Corps of Engineers a mis au point une classification des sols à partir de leur granulométrie qui permet uniquement de juger de leur susceptibilité au gel ; le Bureau of Public Roads a établi une autre classification utilisable pour les problèmes routiers ; le Corps of Engineers a établi une troisième classification relative à la construction des pistes d'aéroports.

En 1952, le Bureau of Reclamation et le Corps of Engineers mirent au point un "système unifié" le Unified Classification System (UCS) avec pour objet de prendre en compte tous les problèmes de comportement des sols dans leur utilisation par l'ingénieur.

Les tableaux donnés dans les pages suivantes (WAGNER, 1957) résument

cette classification. Le premier tableau donne la clé permettant de nommer les sols, les paramètres ou "index" utilisés sont la granulométrie et les limites d'Atterberg. Les tableaux suivants (2 et 3) donnent pour chaque catégorie de sol des indications sur son type de comportement géotechnique.

En France, la classification UCS a été adoptée après de légères modifications par le laboratoire des Ponts et Chaussées.

Plus récemment (1976-1977) le SETRA et le LPC ont publié une classification spécialement adaptée à l'utilisation des sols en remblais et en couche de forme dans "Recommandation pour les terrassements routiers" -voir tableaux n° 4 et n° 5 . On constate ici aussi que granulométrie et limite d'Atterberg sont les paramètres essentiels. Mais 2 des 6 classes, les classes E et F sont définies d'abord par des considérations sur la nature géologique du sol. Par ailleurs le tableau n° 5 montre que la définition des sous-classes fait cette fois largement appel à la nature (géologique, chimique) du sol, ainsi d'ailleurs qu'à sa teneur en eau.

Les exemples donnés ci-dessous révèlent que le problème de la cartographie géotechnique n'a pas été pris en compte dans la conception de ces classifications. Les cartes géotechniques sont presque toujours des cartes de contraintes (cartes "thématiques") qui sont dessinées à partir d'un recueil de données géologiques (lithologie, hydrogéologie, relief,...) et de la prise en considération d'un problème particulier : par exemple ressource en matériaux ou bien risques naturels ou bien système de fondation à mettre en oeuvre. Il s'agit là comme on le verra au paragraphe suivant d'une différence fondamentale avec la conception des systèmes de classification pédologiques pour lesquels on a posé dès l'origine le principe qu'elles devaient permettre une expression cartographique.

3 - CLASSIFICATIONS PEDOLOGIQUES DES UNITES SUPERIEURES

Les principes selon lesquels sont construites les classifications pédologiques modernes font l'objet d'une présentation synthétique dans l'ouvrage de DUCHAUFOUR "Précis de Pédologie". La plupart des développements qui suivent en sont directement inspirés.

Identification Procedures (particles larger than 3 in. and basing fractions on estimated weights)				Group Symbols	Typical Names	Information Required for Describing Soils	Laboratory Classification Criteria	
Coarse-grained soils More than half of material is larger than No. 200 sieve size (The No. 200 sieve size is about the smallest particle visible to naked eye)	Gravels More than half of coarse fraction is larger than No. 4 sieve size (For visual classification, the 1 in. size may be used as equivalent to the No. 4 sieve size)	Clean gravels (little or no fines)	Wide range in grain size and substantial amounts of all intermediate particle sizes	GW	Well graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines	Give typical name, indicate approximate percentages of sand and gravel; maximum size; angularity, surface condition, and hardness of the coarse grains; local or geologic name and other pertinent descriptive information; and symbols in parentheses For undisturbed soils add information on stratification, degree of compactness, cementation, moisture conditions and drainage characteristics Example: <i>Silty sand, gravelly; about 20% hard, angular gravel particles 1/2-in. maximum size; rounded and subangular sand grains coarse to fine, about 15% non-plastic fines with low dry strength; well compacted and moist in place; alluvial sand; (SM)</i>	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Greater than 4 $C_u = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{40}}$ Between 1 and 3 Not meeting all gradation requirements for GW Atterberg limits below "A" line, or <i>PI</i> less than 4 Atterberg limits above "A" line, with <i>PI</i> greater than 7 $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Greater than 6 $C_u = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{40}}$ Between 1 and 3 Not meeting all gradation requirements for SW Atterberg limits below "A" line or <i>PI</i> less than 5 Atterberg limits below "A" line with <i>PI</i> greater than 7 Above "A" line with <i>PI</i> between 4 and 7 are borderline cases requiring use of dual symbols	
			Predominantly one size or a range of sizes with some intermediate sizes missing	GP	Poorly graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines			
			Nonplastic fines (for identification procedures see <i>ML</i> below)	GM	Silty gravels, poorly graded gravel-sand-silt mixtures			
		Gravels with fines (appreciable amount of fines)	Plastic fines (for identification procedures, see <i>CL</i> below)	GC	Clayey gravels, poorly graded gravel-sand-clay mixtures			
			Wide range in grain sizes and substantial amounts of all intermediate particle sizes	SW	Well graded sands, gravelly sands, little or no fines			
			Predominantly one size or a range of sizes with some intermediate sizes missing	SP	Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines			
	Sands More than half of coarse fraction is smaller than No. 4 sieve size (For visual classification, the 1 in. size may be used as equivalent to the No. 4 sieve size)	Clean sands (little or no fines)	Wide range in grain sizes and substantial amounts of all intermediate particle sizes	SW	Well graded sands, gravelly sands, little or no fines	Example: <i>Silty sand, gravelly; about 20% hard, angular gravel particles 1/2-in. maximum size; rounded and subangular sand grains coarse to fine, about 15% non-plastic fines with low dry strength; well compacted and moist in place; alluvial sand; (SM)</i>	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Greater than 4 $C_u = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{40}}$ Between 1 and 3 Not meeting all gradation requirements for GW Atterberg limits below "A" line, or <i>PI</i> less than 4 Atterberg limits above "A" line, with <i>PI</i> greater than 7 $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Greater than 6 $C_u = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{40}}$ Between 1 and 3 Not meeting all gradation requirements for SW Atterberg limits below "A" line or <i>PI</i> less than 5 Atterberg limits below "A" line with <i>PI</i> greater than 7 Above "A" line with <i>PI</i> between 4 and 7 are borderline cases requiring use of dual symbols	
			Predominantly one size or a range of sizes with some intermediate sizes missing	SP	Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines			
			Nonplastic fines (for identification procedures, see <i>ML</i> below)	SM	Silty sands, poorly graded sand-silt mixtures			
		Sands with fines (appreciable amount of fines)	Plastic fines (for identification procedures, see <i>CL</i> below)	SC	Clayey sands, poorly graded sand-clay mixtures			
			Wide range in grain sizes and substantial amounts of all intermediate particle sizes	SW	Well graded sands, gravelly sands, little or no fines			
			Predominantly one size or a range of sizes with some intermediate sizes missing	SP	Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines			
Identification Procedures on Fraction Smaller than No. 40 Sieve Size								
Fine-grained soils More than half of material is smaller than No. 200 sieve size (The No. 200 sieve size is about the smallest particle visible to naked eye)	Silt and clays liquid limit less than 50	Dry Strength (crushing characteristics)	None to slight	Quick to slow	None	ML	Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands with slight plasticity	Give typical name; indicate degree and character of plasticity, amount and maximum size of coarse grains; colour in wet condition, odour if any, local or geologic name, and other pertinent descriptive information, and symbol in parentheses For undisturbed soils add information on structure, stratification, consistency in undisturbed and remoulded states, moisture and drainage conditions Example: <i>Clayey silt, brown; slightly plastic; small percentage of fine sand; numerous vertical root holes; firm and dry in place; loess; (ML)</i>
			Medium to high	None to very slow	Medium	CL	Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays	
			Slight to medium	Slow	Slight	OL	Organic silts and organic silts of low plasticity	
		Dilatancy (reaction to shaking)	Slight to medium	Slow to none	Slight to medium	MH	Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts	
			High to very high	None	High	CH	Inorganic clays of high plasticity, fat clays	
			Medium to high	None to very slow	Slight to medium	OH	Organic clays of medium to high plasticity	
	Silt and clays liquid limit greater than 50	Dry Strength (crushing characteristics)	None to slight	Quick to slow	None	ML	Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands with slight plasticity	Give typical name; indicate degree and character of plasticity, amount and maximum size of coarse grains; colour in wet condition, odour if any, local or geologic name, and other pertinent descriptive information, and symbol in parentheses For undisturbed soils add information on structure, stratification, consistency in undisturbed and remoulded states, moisture and drainage conditions Example: <i>Clayey silt, brown; slightly plastic; small percentage of fine sand; numerous vertical root holes; firm and dry in place; loess; (ML)</i>
			Medium to high	None to very slow	Medium	CL	Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays	
			Slight to medium	Slow	Slight	OL	Organic silts and organic silts of low plasticity	
		Dilatancy (reaction to shaking)	Slight to medium	Slow to none	Slight to medium	MH	Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts	
			High to very high	None	High	CH	Inorganic clays of high plasticity, fat clays	
			Medium to high	None to very slow	Slight to medium	OH	Organic clays of medium to high plasticity	
Highly Organic Soils				Readily identified by colour, odour, spongy feel and frequently by fibrous texture		PI	Peat and other highly organic soils	

Determine percentages of gravel and sand from grain size curve
Depending on percentage of fines (fraction smaller than No. 200 sieve size) coarse-grained soils are classified as follows:
Less than 5% fines: GW, GP, SW, SP
More than 5% to 12% fines: GM, GC, SM, SC
Borderline cases requiring use of dual symbols

Use grain size curve in identifying the fractions as given under field identification

Comparing soils at equal liquid limit

Plasticity index

Liquid limit

Plasticity chart
for laboratory classification of fine grained soils

From Wagner, 1957.

^a Boundary classifications. Soils possessing characteristics of two groups are designated by combinations of group symbols. For example GW-GC, well graded gravel-sand mixture with clay binder.

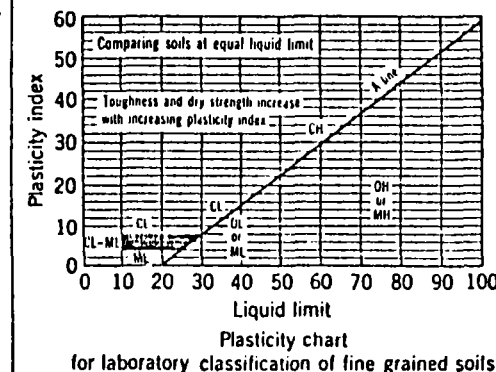
^b All sieve sizes on this chart are U.S. standard.

These procedures are to be performed on the minus No. 40 sieve size particles, approximately 1/48 in. For field classification purposes, screening is not intended, simply remove by hand the coarse particles that interfere with the tests.

Dilatancy (Reaction to shaking):
After removing particles larger than No. 40 sieve size, prepare a pat of moist soil with a volume of about one-half cubic inch. Add enough water if necessary to make the soil soft but not sticky. Place the pat in the open palm of one hand and shake horizontally, striking vigorously against the other hand several times. A positive reaction consists of the appearance of water on the surface of the pat which changes to a livery consistency and becomes glossy. When the sample is squeezed between the fingers, the water and gloss disappear from the surface, the pat stiffens and finally it cracks or crumbles. The rapidity of appearance of water during shaking and of its disappearance during squeezing assist in identifying the character of the fines in a soil. Very fine clean sands give the quickest and most distinct reaction whereas a plastic clay has no reaction. Inorganic silts, such as a typical rock flour, show a moderately quick reaction.

Dry Strength (Crushing characteristics):
After removing particles larger than No. 40 sieve size, mould a pat of soil to the consistency of putty, adding water if necessary. Allow the pat to dry completely by oven, sun or air drying, and then test its strength by breaking and crumbling between the fingers. This strength is a measure of the character and quantity of the colloidal fraction contained in the soil. The dry strength increases with increasing plasticity. High dry strength is characteristic for clays of the CH group. A typical inorganic silt possesses only very slight dry strength. Silty fine sands and silts have about the same slight dry strength, but can be distinguished by the feel when powdering the dried specimen. Fine sand feels gritty whereas a typical silt has the smooth feel of flour.

Toughness (Consistency near plastic limit):
After removing particles larger than the No. 40 sieve size, a specimen of soil about one-half inch cube in size, is moulded to the consistency of putty. If too dry, water must be added and if sticky, the specimen should be spread out in a thin layer and allowed to lose some moisture by evaporation. Then the specimen is rolled out by hand on a smooth surface or between the palms into a thread about one-eighth inch in diameter. The thread is then folded and re-rolled repeatedly. During this manipulation the moisture content is gradually reduced and the specimen stiffens, finally loses its plasticity, and crumbles when the plastic limit is reached. After the thread crumbles, the pieces should be lumped together and a slight kneading action continued until the lump crumbles. The tougher the thread near the plastic limit and the stiffer the lump when it finally crumbles, the more potent is the colloidal clay fraction in the soil. Weakness of the thread at the plastic limit and quick loss of coherence of the lump below the plastic limit indicate either inorganic clay of low plasticity, or materials such as kaolin-type clays and organic clays which occur below the A-line. Highly organic clays have a very weak and spongy feel at the plastic limit.



tab 1 : classification des sols

Wagner 1957

Soil	Soil Component	Symbol	Grain Size Range and Description	Significant Properties
Coarse-grained components	Boulder	None	Rounded to angular, bulky, hard, rock particle, average diameter more than 12 in.	Boulders and cobbles are very stable components, used for fill ballast, and to stabilize slopes (riprap). Because of size and weight, their occurrence in natural deposits tends to improve the stability of foundations. Angularity of particles increases stability.
	Cobble	None	Rounded to angular, bulky, hard, rock particle, average diameter smaller than 12 in. but larger than 6 in.	
	Gravel	G	Rounded to angular bulky, hard, rock particle, passing 3-in. sieve (76.2 mm) retained on No. 4 sieve (4.76 mm)	Gravel and sand have essentially same engineering properties differing mainly in degree. The No. 4 sieve is arbitrary division, and does not correspond to significant change in properties. They are easy to compact, little affected by moisture, not subject to frost action. Gravels are generally more perviously stable, resistant to erosion and piping than are sands. The well-graded sands and gravels are generally less pervious and more stable than those which are poorly graded (uniform gradation). Irregularity of particles increases the stability slightly. Finer, uniform sand approaches the characteristics of silt; i.e., decrease in permeability and reduction in stability with increase in moisture.
	Coarse		3- to $\frac{1}{2}$ -in.	
	Fine		$\frac{1}{2}$ -in. to No. 4	
	Sand	S	Rounded to angular, bulky, hard, rock particle, passing No. 4 sieve (4.76 mm) retained on No. 200 sieve (0.074 mm)	
	Coarse		No. 4 to 10 sieves	
	Medium		No. 10 to 40 sieves	
	Fine		No. 40 to 200 sieves	
Fine-grained components	Silt	M	Particles smaller than No. 200 sieve (0.074 mm) identified by behavior; that is, slightly or non-plastic regardless of moisture and exhibits little or no strength when air dried	Silt is inherently unstable, particularly when moisture is increased, with a tendency to become quick when saturated. It is relatively impervious, difficult to compact, highly susceptible to frost heave, easily erodible and subject to piping and boiling. Bulky grains reduce compressibility; flaky grains, i.e., mica, diatoms, increase compressibility, produce an "elastic" silt.
	Clay	C	Particles smaller than No. 200 sieve (0.074 mm) identified by behavior; that is, it can be made to exhibit plastic properties within a certain range of moisture and exhibits considerable strength when air dried	The distinguishing characteristic of clay is cohesion or cohesive strength, which increases with decrease in moisture. The permeability of clay is very low, it is difficult to compact when wet and impossible to drain by ordinary means, when compacted is resistant to erosion and piping, is not susceptible to frost heave, is subject to expansion and shrinkage with changes in moisture. The properties are influenced not only by the size and shape (flat plate-like particles) but also by their mineral composition; i.e., the type of clay-mineral, and chemical environment or base exchange capacity. In general, the montmorillonite clay mineral has greatest, illite and kaolinite the least, adverse effect on the properties.
	Organic matter	O	Organic matter in various sizes and stages of decomposition	Organic matter present even in moderate amounts increases the compressibility and reduces the stability of the fine-grained components. It may decay causing voids or by chemical alteration change the properties of a soil, hence organic soils are not desirable for engineering uses.

From Wagner, 1957.

Note. The symbols and fractions were developed for the Unified Classification System. For field identification, $\frac{1}{2}$ in. is assumed equivalent to the No. 4, and the No. 200 is defined as "about the smallest particle visible to the unaided eye." The sand fractions are not equal divisions on a logarithmic plot; the No. 10 was selected because of the significance attached to that size by some investigators. The No. 40 was chosen because the "Atterberg limits" tests are performed on the fraction of soil finer than the No. 40.

tab2 : classification des sols

Wagner 1957

Typical Names of Soil Groups	Group Symbols	Important Properties				Relative Desirability for Various Uses									
		Permeability when Compacted	Shearing Strength when Compacted and Saturated	Compressibility when Compacted and Saturated	Workability as a Construction Material	Rolled Earth Dams			Canal Sections		Foundations		Roadways		
						Homogeneous Embankment	Core	Shell	Erosion Resistance	Compacted Earth Lining	Seepage Important	Seepage not Important	Fills		Surfacing
													Frost Heave not Possible	Frost Heave Possible	
Well-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines	GW	pervious	excellent	negligible	excellent	—	—	1	1	—	—	1	1	1	3
Poorly graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines	GP	very pervious	good	negligible	good	—	—	2	2	—	—	3	3	3	—
Silty gravels, poorly graded gravel-sand-silt mixtures	GM	semipervious to impervious	good	negligible	good	2	4	—	4	4	1	4	4	9	5
Clayey gravels, poorly graded gravel-sand-clay mixtures	GC	impervious	good to fair	very low	good	1	1	—	3	1	2	6	5	5	1
Well-graded sands, gravelly sands, little or no fines	SW	pervious	excellent	negligible	excellent	—	—	3 if gravelly	6	—	—	2	2	2	4
Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines	SP	pervious	good	very low	fair	—	—	4 if gravelly	7 if gravelly	—	—	5	6	4	—
Silty sands, poorly graded sand-silt mixtures	SM	semipervious to impervious	good	low	fair	4	5	—	8 if gravelly	5 erosion critical	3	7	8	10	6
Clayey sands, poorly graded sand-clay mixtures	SC	impervious	good to fair	low	good	3	2	—	5	2 erosion critical	4	8	7	6	2
Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands with slight plasticity	ML	semipervious to impervious	fair	medium	fair	6	6	—	—	6 erosion critical	6	9	10	11	—
Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays	CL	impervious	fair	medium	good to fair	5	3	—	9	3 erosion critical	5	10	9	7	7
Organic silts and organic silt-clays of low plasticity	OL	semipervious to impervious	poor	medium	fair	8	8	—	—	7 erosion critical	7	11	11	12	—
Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts	MH	semipervious to impervious	fair to poor	high	poor	9	9	—	—	8 volume change critical	8	12	12	13	—
Inorganic clays of high plasticity, fat clays	CH	impervious	poor	high	poor	7	7	—	10	—	9	13	13	8	—
Organic clays of medium to high plasticity	OH	impervious	poor	high	poor	10	10	—	—	—	10	14	14	14	—
Peat and other highly organic soils	PI	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

From Wagner, 1957.

tab 3 : classification des sols

Wagner 1957

CLASSL	DENOMINATION	CRITERES CARACTERISTIQUES	EXEMPLES	COMMENTAIRES
A	Sols fins.	Diamètre des plus gros éléments < 50 mm. Tamisat à 80 µm > 35 %.	Silts, limons, argiles, etc.	Tous les sols des classes A, B et C, même non plastiques (silts, sables très fins) sont sensibles à l'eau, cette sensibilité étant considérée dans l'optique de l'exécution des terrassements (traficabilité, compactage) et du comportement des plates-formes.
B	Sols sableux ou graveleux avec fines.	Diamètre des plus gros éléments < 50 mm. Tamisat à 80 µm entre 5 et 35 %.	Sables et graves argileux, etc.	La différence entre les classes A et B est dans le pourcentage de fines, d'où des différences de sensibilité à l'eau (plus ou moins long temps de réponse aux variations des conditions météorologiques) et de comportement mécanique (frottement, cohésion).
C	Sols comportant des fines et des gros éléments.	Diamètre des plus gros éléments > 50 mm. Tamisat à 80 µm > 5 %.	Argiles à silex, alluvions grossières, etc.	La différence principale entre les classes B et C concerne les gros éléments : présence de cailloux et de blocs dans les sols de la classe C, d'où : — emploi possible ou non selon la classe de certains outils de terrassement, — difficulté, pour les sols C, de réglage des plates-formes, d'exécution des tranchées...
D	Sols et roches insensibles à l'eau.	Tamisat à 80 µm < 5 %.	Sables et graves propres, matériaux rocheux sains, etc.	L'insensibilité à l'eau est considérée dans l'optique de l'exécution des terrassements : effet négligeable des conditions météorologiques sur la qualité des ouvrages réalisés.
E	Roches évolutives.	Fragilité et altérabilité définies par des essais dépendant de la nature des matériaux.	Craies, schistes, etc.	Matériaux évoluant pendant les travaux ou par la suite vers un sol sensible à l'eau ou vers une structure différente pouvant entraîner des tassements.
F	Matériaux putrescibles, combustibles, solubles ou polluants.	Critères caractéristiques dépendant de la nature des matériaux.	Tourbe, schistes houillers, gypse, résidus industriels polluants, etc.	Lorsqu'ils sont utilisables, ces matériaux doivent l'être dans les conditions applicables à la classe A, B, C, D ou E à laquelle ils se rattachent d'après leurs caractéristiques granulométriques ou éventuellement leur caractère de roche évolutive.

tab 4 : classification des sols

SETRA LPC

Sols fins — $D < 50 \text{ mm}$; tamisat à $80 \mu\text{m} > 35 \%$

Classification

A

Sous-classe	Sols les plus fréquemment rencontrés	Caractères principaux	Classement d'après l'état du sol		
			Moyens d'évaluation de l'état	Cas possibles	Commentaires
A_1 $I_p < 10$	Limons peu plastiques Loess. Silt alluvionnaires. Sables fins peu pollués. Arènes peu plastiques. Sols à microfossiles poreux. Cendres volantes.	Ces sols changent totalement de consistance pour de faibles variations de w ou pour de faibles variations de compacité si w est proche de w_p . Le temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique et climatique est relativement court, mais la perméabilité pouvant varier dans de larges limites selon la granulométrie et la plasticité, ce temps de réaction peut aussi varier largement. Les moins plastiques de ces sols ont un comportement mécanique particulier (possibilité de rupture fragile : fissuration).	L'état du sol est déterminé par sa teneur en eau w . On peut : — mesurer w et la comparer à w_{op} ; — ou déterminer le CBR immédiat ; — ou évaluer visuellement la consistance du matériau. L'indice de plasticité est trop faible pour utiliser l'indice de consistance.	A_{1h} Teneur en eau élevée (h = humide). A_{1m} Teneur en eau moyenne (m = moyenne). A_{1s} Teneur en eau faible (s = sec).	En raison de la rapidité des variations de consistance de ces sols, une certaine marge de sécurité doit être prise. On peut considérer en moyenne que w est élevée si : $w > w_{op} + 1$ ou $\text{CBR} < 8$ La marge de w moyenne pour ces sols est relativement faible ; en moyenne : $w_{op} - 2 < w < w_{op} + 1$ ou $8 < \text{CBR} < 25$. On peut considérer en moyenne que w est faible si : $w < w_{op} - 2$ ou $\text{CBR} > 25$.
	A_2 I_p de 10 à 20	Le caractère moyen des sols de cette sous-classe fait qu'ils se prêtent à l'emploi de la plus large gamme d'outils de terrassement (si la teneur en eau n'est pas trop élevée) et d'essais de laboratoire et de chantier.	L'état du sol est déterminé par sa teneur en eau w . On peut évaluer l'état du sol par les mêmes moyens que pour les sols A_1 , à savoir : — w comparée à w_{op} , — ou CBR immédiat, — ou évaluation visuelle de la consistance, auxquels s'ajoute l'indice de consistance I_c pour les sols les plus plastiques de la sous-classe.	A_{2h} Teneur en eau élevée.	On peut considérer en moyenne que w est élevée si : $w > w_{op} + 2$ ou $\text{CBR} < 5$ ou $I_c < 1$
				A_{2m} Teneur en eau moyenne. A_{2s} Teneur en eau faible.	En moyenne si : $w_{op} - 2 < w < w_{op} + 2$ ou $5 < \text{CBR} < 15$ ou $1 < I_c < 1,2$ En moyenne si : $w < w_{op} - 2$ ou $\text{CBR} > 15$ ou $I_c > 1,2$
A_3 I_p de 20 à 50	Argiles. Marnes. Limons très plastiques.	Ces sols sont très cohérents à teneur en eau moyenne et faible et collants ou glissants à l'état humide, d'où difficultés de mise en œuvre sur chantier (et de manipulation en laboratoire). Leur perméabilité très réduite rend très lentes leurs variations de teneur en eau en place. Une augmentation de teneur en eau assez importante est nécessaire pour changer notablement leur consistance.	L'état du sol est déterminé par sa teneur en eau w . L'évaluation de l'état se fait par les mêmes moyens que pour les sols A_2 , mais pour les sols les plus cohérents de la sous-classe A_3 (soit par plasticité élevée, soit par w faible) les essais donnent des résultats fortement dispersés en fonction du fractionnement du matériau et du degré d'homogénéité de la teneur en eau.	A_{3h} Teneur en eau élevée.	On peut considérer en moyenne que w est élevée si : $w > w_{op} + 4$ ou $\text{CBR} < 3$ ou $I_c < 0,9$
				A_{3m} Teneur en eau moyenne. A_{3s} Teneur en eau faible.	La lenteur des variations de consistance permet de considérer comme moyenne une gamme de teneur en eau relativement large (peu d'évolution de consistance en cours de mise en œuvre) ; en moyenne : $w_{op} - 4 < w < w_{op} + 4$ ou $3 < \text{CBR} < 15$ ou $0,9 < I_c < 1,3$ En moyenne si : $w < w_{op} - 4$ ou $\text{CBR} > 15$ ou $I_c > 1,3$
A_4 $I_p > 50$	Argiles et marnes très plastiques.	Ces sols sont très fortement cohérents et presque imperméables ; s'ils changent de teneur en eau, c'est extrêmement lentement et avec d'importants retraits ou gonflements.	Ces sols n'étant pas normalement utilisés, les moyens d'évaluation de leur état ne sont pas décrits ici.		

tab 5 : classification des sols

SETRA LPC

3.1 - But de la classification pédologique

La systématique des sols doit résoudre un double problème :

1° Classer les unités supérieures, grouper les grands types de sols mondiaux, en fonction de leur genèse, de leurs propriétés fondamentales ; donc fournir un cadre, en quelque sorte, qui serve de base à la science pédologique.

2° Donner aux cartographes un outil commode, pour dresser des cartes à grande échelle, utilisables à des fins pratiques (par exemple en agronomie). Il faut alors classer les sols, souvent d'après des caractères de détail, n'ayant qu'une importance occasionnelle ou locale ; il faut aussi les définir et les désigner ; cette classification des unités inférieures pose un problème entièrement différent de celui des unités supérieures et qui ne sera pas ici envisagé.

En ce qui concerne la classification des unités supérieures classes tous les auteurs sont d'accord pour estimer que cette dernière devait faire abstraction des propriétés de détail des sols, pour se baser exclusivement sur les processus d'évolution fondamentaux des profils, la pédogénèse, d'où le terme communément employé de classification génétique. Les premières classifications génétiques étaient basées, d'une manière exclusive, soit sur un facteur déterminant du milieu (par exemple le climat), soit sur un processus physico-chimique conditionnant l'évolution. Les classifications les plus récentes se basent sur l'ensemble des caractères du profil : morphologiques, biologiques, physico-chimiques, minéralogiques, dans la mesure où cet ensemble de caractères intègre le processus évolutif ; il s'agit des classifications génétiques à caractère synthétique.

3.2 - Choix des critères de base

Les classifications les plus récentes s'appuient sur une base génétique, mais donnent la priorité aux "caractères" des sols traduisant le processus évolutif, plutôt qu'aux circonstances, aux causes extérieures de l'évolution : celles ci n'interviennent qu'au niveau des sous-classes.

Les critères fondamentaux sont alors les suivants :

a) le développement du profil en liaison avec le degré d'évolution :
On distingue ainsi quatre types de profils :*

- profil (A)C : sols minéraux bruts ;
- Profil AC : sols peu différenciés, contenant de la matière organique dans l'horizon A.
- Profil A (B)C : sols évolués par altération : horizon (B) d'altération ;
- Profil ABC : sols évolués par altération et offrant en outre un processus d'entraînement, générateur d'un horizon B d'accumulation.

b) le mode d'altération climatique

Une "progression" très nette s'observe depuis les types les moins évolués s'observant en climat de steppe, jusqu'aux types les plus évolués, caractéristiques des climats équatoriaux humides.

c) le type de matière organique et son influence sur l'évolution des sols

Ce critère est considéré comme capital par la plupart des classifications européennes. Il passe au second plan dans la classification américaine (sauf pour un des ordres fondamentaux, les Mollisols).

d) Hydromorphie

Dans la plupart des classifications, l'hydromorphie est considérée comme un critère fondamental, lorsqu'elle est suffisamment accentuée pour modifier et masquer toute autre action du milieu sur l'évolution des sols : l'hydromorphie permet alors de définir une ou deux classes hydromorphes : si, au contraire, l'hydromorphie n'exerce qu'une action modérée et localisée

* Voir Duchaufour (1965) pour la définition des horizons A,B,C....

sur l'évolution du profil, elle n'intervient que dans les subdivisions secondaires de la classification.

3.3 - Hiérarchie des caractères

A partir des 4 types de caractéristiques définis plus haut (et qui ne sont pas indépendants entre eux) la plupart des classifications distinguent un nombre de classes allant de 10 à 15.

Signalons cependant que plusieurs d'entre elles conservent certaines particularités par lesquelles elles s'écartent des principes précédents ; ces particularités sont les suivantes :

1°-Importance donnée aux conditions de roche mère (de préférence au processus évolutif, donc à la génétique) lorsque la roche mère, en raison de propriétés physico-chimiques très particulières, influence de manière immédiate et accentuée les propriétés du sol : c'est le cas des sols calcimorphes de la plupart des classifications, des Vertisols de la classification américaine, des Pélosols de la classification allemande : les classificateurs français se sont ralliés à ce point de vue en ce qui concerne les Vertisols.

2°-Importance particulière donnée par certaines classifications aux conditions de "microclimat" ou climat interne du sol, c'est le cas de la classification américaine qui définit l'ordre des Aridisols, sols à microclimat très sec ; cette même classification utilise les caractères de microclimat pour définir de nombreux sous-ordres ; ce critère est parfois pris en considération mais de façon moins systématique par la classification française.

3°-Place différente donnée à l'"hydromorphie" dans la hiérarchie des caractères ; certaines classifications considèrent l'hydromorphie comme fondamentale et la placent hiérarchiquement avant tous les autres caractères.

Inversement d'autres classifications, telles que la classification américaine de 1960, considèrent l'hydromorphie comme un phénomène secondaire qui se superpose au processus évolutif de base, sans le modifier : en conséquence, elles n'utilisent ce critère qu'au niveau des sous-classes.

4° Importance secondaire accordée au "type d'humus". Ce caractère de la classification américaine de 1960 l'oppose nettement à la plupart des classifications européennes : les classificateurs américains remplacent la notion de "type d'humus" par celle moins précise d'épipédon comprenant non seulement les horizons proprement humiques (A_0 ou A_1), mais l'ensemble des horizons A : les épipédons, moins variés que les types d'humus, sont aussi plus stables et reconnaissables même si le sol est mis en culture ; l'identification des types de sols est basée sur celle des horizons dit permanents : horizons minéraux, horizons B et le cas échéant "épipedon".

4 - COMPARAISON ENTRE LES DEUX CLASSIFICATIONS

4.1 Nous avons au § 1 développé une différence fondamentale entre pédologie et géotechnique à savoir que le domaine géométrique étudié par chacune de ces disciplines ne recouvre que partiellement celui de l'autre discipline.

L'examen des classifications géotechniques et pédologiques (§II et §III) montre qu'il existe une autre différence fondamentale : même quand il y a identité du domaine physique étudié (par exemple couche superficielle meuble d'une dizaine de m qui serait un sol au sens pédologique) les questions que se posent les pédologues (en gros genèse de sols et caractéristiques physico-chimiques et cela sans avoir en vue une application précise) les amènent à étudier de manière approfondie (et à utiliser dans leurs classifications) des caractéristiques sans intérêt immédiat pour la connaissance des caractéristiques mécaniques (comportement sous l'effet de contraintes) du matériau sol. Un exemple particulièrement évident est celui de la place accordée aux caractéristiques de l'horizon A humifère dans la classification pédologique d'un profil. Cette place est primordiale. Par contre l'horizon A n'a aucun intérêt pour le géotechnicien car généralement très peu épais et parce qu'il est le plus souvent excavé avant toute construction de route ou de bâtiment.

4.2 A ces différences fondamentales, on peut opposer l'idée suivante :

Les mêmes causes produisant les mêmes effets on doit pouvoir théoriquement à partir :

- de la roche mère - géologie.
- de la genèse du sol - définie par des considérations pédologiques.
- d'une analyse structurelle - granulométrie.

définir des classes de matériau présentant des propriétés géotechniques semblables.

Il faut noter que cette formulation est celle implicitement suivie dans les études géotechniques régionales, où l'expression cartographique est avant tout basée sur la géologie et le relief.

La pédologie n'est pas utilisée le plus souvent parce que ces études ont été réalisées en pays tempérés où les profils sont peu profonds. En pays tropicaux par contre les études consacrées aux propriétés des latérites tentent pour les plus récentes de lier caractérisation géotechnique et genèse du sol

Comme on le verra dans les paragraphes suivants, il ne semble pas cependant que les difficultés signalées ici en 4.1 aient été correctement analysées par la plupart des auteurs. Ceci conduit à des confusions dans le vocabulaire (exemple la définition du mot latérite est variable selon les auteurs) et surtout a finalement fait aboutir à des avis très variables quant à l'existence d'un lien entre caractérisation pédologique et caractérisation géotechnique.

5 - CLASSIFICATIONS GEOTECHNIQUES DES SOLS TROPICAUX

La plupart des auteurs s'accordent à déclarer que les sols tropicaux méritent, de par leurs propriétés particulières, une classification spécifique.

La nécessité d'une classification des sols tropicaux différente de la classification UCS est justifiée par trois types de remarques (voir exemples chapitres 2 et 3) :

1° Certains sols tropicaux présentent des caractéristiques mécaniques qui ne sont pas comprises dans la fourchette de valeurs que permettrait de

prévoir la seule considération des paramètres de classification UCS (Granulométrie et limites d'Atterberg).

2°- Il est parfois possible à partir de considérations pédologiques simples et peu coûteuses de prévoir la classe UCS.

3°- Il est parfois possible à partir de considérations pédologiques simples et peu coûteuses de séparer en deux ou trois sous classes une classe UCS.

Cependant, malgré cette nécessité ressentie, très peu de systèmes complets de classifications géotechniques des sols tropicaux ont été proposés.

La proposition probablement la plus récente et la plus appuyée par des résultats expérimentaux est celle de LYON ass. , mais elle ne concerne que les sols dit latéritiques, pour lesquels LYON ass. propose une classification en sols ferrugineux, sols ferrallitiques et ferrisols -voir analyse paragraphe 1 chapitre 3.

LITTLE, 1969 a mis au point une classification fondée sur le degré d'altération (voir tableau 6).

Le caractère extrêmement qualitatif, l'absence de critère mesurable, le fait que des paramètres importants soient ignorés (roche mère, type d'altération) sont les principales critiques que l'on peut porter à cette classification.

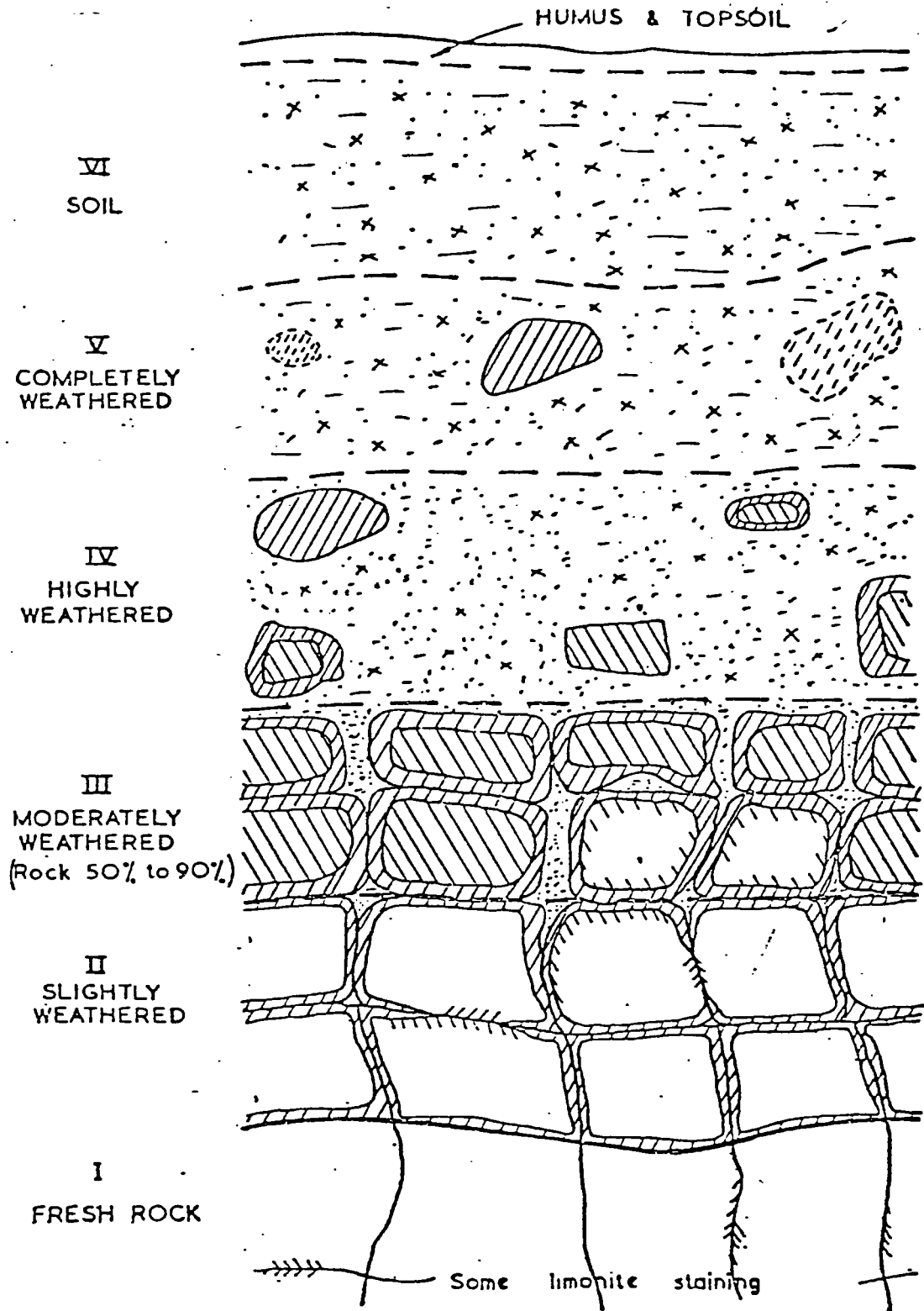
CLARE, 1957 a proposé un des rares systèmes englobant tous les sols tropicaux (voir tableau 7). Ce système est en fait basé sur la roche mère et le degré d'altération. Très intéressant au plan scientifique, ce système l'est moins pratiquement parce que ne sont pas données pour chaque classe l'ordre de grandeur des propriétés géotechniques (ou bien les relations entre propriétés géotechniques à l'intérieur d'une classe) ni les méthodes permet-

CLASSIFICATION OF TROPICAL RESIDUAL SOILS BY DEGREES OF WEATHERING (see LITTLE, 1969)

<i>Grade</i>	<i>Degree of decomposition</i>	<i>Field recognition</i>	<i>Engineering properties</i>
VI	Soil	no recognisable rock texture; surface layer contains humus and plant roots	unsuitable for important foundations; unstable on slopes when cover is destroyed
V	Completely weathered	rock completely decomposed by weathering in place but texture still recognisable; in types of granitic origin, original feldspars completely decomposed to clay minerals; cannot be recovered as cores by ordinary rotary drilling methods	can be excavated by hand or ripping without use of explosives; unsuitable for foundations of concrete dams or large structures; may be suitable for foundations of earth dams and for fill; unstable in high cuttings at steep angles; requires erosion protection
IV	Highly weathered	rock so weakened by weathering that fairly large pieces can be broken and crumble in the hands; sometimes recovered as core by careful rotary drilling: stained by limonite; less than 50% rock	similar to grade V; unlikely to be suitable for foundations of concrete dams; erratic presence of boulders makes it an unreliable foundation stratum for large structures
III	Moderately weathered	considerably weathered throughout; possessing some strength—large pieces (e.g. NX drill core) cannot be broken by hand; often limonite-stained; 50% to 90% rock	excavated with difficulty without use of explosives; mostly crushes under bulldozer tracks; suitable for foundations of small concrete structures and rockfill dams; may be suitable for semipervious fill; stability in cuttings depends on structural features, especially joint attitudes
II	Slightly weathered	distinctly weathered through much of the rock fabric with slight limonite staining; some decomposed feldspar in granites; strength approaching that of fresh rock; more than 90% rock	requires explosives for excavation; suitable for concrete dam foundations; highly permeable through open joints; often more permeable than the zones above or below; questionable as concrete aggregate
I	Fresh rock	fresh rock may have some limonite-stained joints immediately beneath weathered rock	staining indicates water percolation along joints; individual pieces may be loosened by blasting or stress relief and support may be required in tunnels and shafts

tab6a : classification des sols tropicaux

Little 1969



6b : classification des sols tropicaux

Little 1969

ENGINEERING CLASSIFICATION OF TROPICAL SOILS (AFTER CLARE, 1957)

		<i>Soils formed from siliceous parent materials</i>			<i>Soils formed from calcareous parent materials</i>		
		<i>soils formed by insolation</i>	<i>soils formed by volcanic action</i>	<i>transported soils</i>	<i>soils formed from metamorphic limestone</i>	<i>soils formed from coral</i>	<i>soils formed from shell</i>
Soils that have been subjected to little chemical weathering:		detrital sands and gravels	volcanic clinker volcanic ash volcanic clay	aeolian silts aeolian quartz sands alluvial quartz sands and gravels	limestone sands and gravels	coral sands and gravels	shell and shell sand
Soils that have been subjected to chemical weathering:	soils from which the weathering products have largely been removed		quartz gravels micaceous soils		black, brown, and red calcareous marls, silts, clays		
	soils in which weathering products have accumulated:	(1) ferruginous and aluminous soils	red and mottled clays nodular lateritic gravels partially cemented lateritic soils sheet-ironstone gravels				
		(2) soils rich in calcium compounds	nodular calcareous gravels gypsiferous soils				
		(3) soils rich in clay minerals	heavy red clays heavy black clays	chemically weathered volcanic clays			

tab 7 : classification des sols tropicaux

Clare 1957

tent de classer simplement un sol. Il semble cependant que les principes posés soient parmi les plus fructueux et c'est la voie suivie en particulier par ATLAN et FELLER, 1980.

Note sur un problème de vocabulaire.

Le mot "sol" est utilisé par la géotechnique et par la pédologie pour désigner deux concepts différents - voir § 1 -. Dans la suite de cet article chaque fois qu'une confusion sera possible, le mot sol s'il est entendu au sens géotechnique sera précisé. Les expressions suivantes seront utilisées :

- sol au sens géotechnique*
- matériau sol.*

CHAPITRE II

EXAMEN DES CORRELATIONS ENTRE PROPRIETES PHYSICO CHIMIQUES

ET PROPRIETES GEOTECHNIQUES DES SOLS (MATERIAU)

Les propriétés physico-chimiques caractérisant un sol sont d'un point de vue pédologique très nombreuses. Nous ne nous intéresserons ici qu'aux propriétés relatives à un matériau remanié (par opposition à un matériau non remanié pour lequel on définit la structure, on mesure la porosité etc...) de façon à avoir des relations possibles avec les propriétés géotechniques (limites d'ATTERBERG, Essai PROCTOR, CBR, granulométrie) mesurées elles aussi sur des échantillons remaniés. L'énumération donnée ci-dessous se limite aux mesures les plus classiques et aux paramètres minéralogiques et chimiques présentant, dans le cas des sols tropicaux, des particularités.

1 TEXTURE

La texture des pédologues est identique à la granulométrie des géotechniciens. On notera cependant que les limites granulométriques entre sables, limons, argiles ne sont pas toujours les mêmes. Pourtant la coupure la plus importante, celle qui définit les argiles comme étant des éléments de diamètre inférieur à $2\ \mu$ est la même.

2 POTENTIEL CAPILLAIRE (pF)

Le potentiel capillaire représente l'énergie de rétention de l'eau par le sol (HALLAIRE, 1953). On conçoit donc que la teneur en eau pour un pF donné dépende de la granulométrie du sol et en particulier de sa teneur en argile. Le graphique (figure 1) suivant donne les variations de la teneur en eau au point de flétrissement permanent (pF 4,2) en fonction de la texture (HALLAIRE, 1956).

L'indice de plasticité (ou la limite de plasticité) est aussi une teneur en eau, et qui est liée à la quantité et la nature des argiles (SKEMPTON 1953). Il est donc possible qu'il existe une corrélation entre par exemple, teneur en eau à pF 4,2 et IP, c'est ce qui a été examiné par COMBEAU (1964) puis plus récemment par ATLAN et FELLER (1980) dans le cas de sols fins du Sénégal. L'intérêt de la corrélation est ici que la mesure de la teneur en eau à pF 4,2 est rapide et automatique, tandis que celle de la limite de plasticité est relativement longue et demande "un tour de main".

La généralisation de la mesure de la teneur en eau à pF 4,2 permettrait sans doute d'abandonner progressivement les mesures de limites d'ATTERBERG dont il est clair que le mode opératoire n'est pas adapté à l'exécution d'essais en grande série (ATLAN et FELLER 1980).

Figure 1

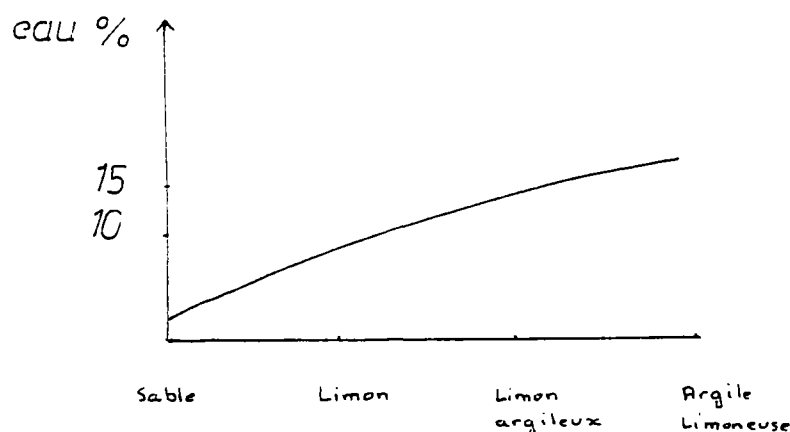


fig 1 : teneur en eau à pF 4,2 en fonction de la texture

Hallaire 1956

3 PROPRIETES CHIMIQUES DE LA FRACTION MINERALE DU SOL

3.1 Phénomènes d'échange de cations dans le sol

Les colloïdes (diamètre inférieur à 2μ) électronégatifs du sol retiennent autour de leurs molécules un "essaim" de cations. Ces cations sont soit H^+ soit Ca^{++} , Mg^{++} , Na^{++} ... Tout ces ions sont dits échangeables parce qu'ils peuvent participer à des échanges réversibles avec les ions positifs existant dans les solutions du sol.

On définit un certain nombre de constantes qui permettent de caractériser l'état du complexe absorbant du sol.

- la capacité totale d'échange (T).
- le taux de saturation (V).

La littérature ne donne pas de relation simple entre V et des paramètres géotechniques. Par contre T est une constante pour un type d'argile donné.

Capacité totale d'échange (GRIM, 1968 et BIRKELAND, 1974 cités par LYON ASS.)

<u>Kaolinite</u>	3 - 15	me/100 g
metahalloysite ($2 H_2O$)	5 - 15	
Halloysite hydratée ($4 H_2O$)	40 - 50	
<u>Illite</u>	10 - 40	
<u>Montmorillonite</u>	80 - 150	
chlorite	10 - 40	
vermiculite	100 - 150	
allophane	25 - 70	
oxyde de Fe ou d'Al	4	
matière organique	150 - 500	

T dépend donc pour un sol donné sans matière organique surtout de la quantité et des types d'argiles présents. L'indice de plasticité aussi

(voir notion d'activité d'une argile, SKEMPTON, 1953) et il est logique de tenter des corrélations entre T et IP ou entre T et quantité d'argiles.

On notera cependant que contrairement à la relation entre la teneur en eau à pF 4,2 et IP, la corrélation T, IP présente surtout un intérêt théorique.

En effet pratiquement, T est plus difficile à mesurer que IP et ne peut donc pas être considéré comme un substitut possible à la mesure de IP. Par contre ces corrélations peuvent être utiles pour l'interprétation à des fins géotechniques des documents pédologiques.

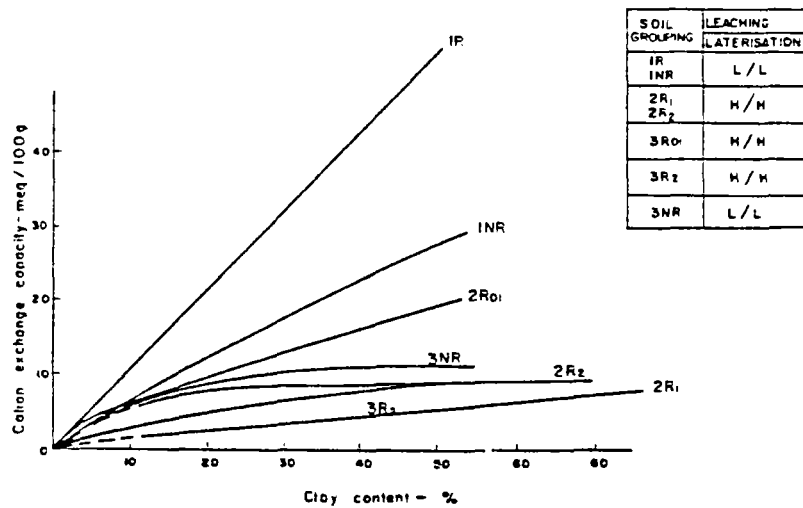
La littérature donne des exemples de relations T, IP. On trouve, par exemple chez GIDIGASU 1971 des tentatives de corrélation T, quantité d'argile. La tendance générale est celle donnée dans la figure 2.

En fait, les corrélations présentent des dispersions telles qu'elles n'ont pas grand intérêt. Il est probable que cela vient de ce que les groupes considérés par GIDIGASU sont trop hétérogènes pédologiquement. On a ici sans doute une confirmation, au contraire, de la nécessité de grouper les sols selon des classes pédologiques rationnelles avant de tenter des corrélations entre échantillons d'un même groupe.

DE LA ROSA (1979) a étudié sur un groupe de sols de FLORIDE les corrélations entre teneur en argile, capacité d'échange de cation, teneur en matière organique et deux caractéristiques géotechniques, l'indice de plasticité et la teneur en eau à l'optimum Proctor. Les sols étudiés appartenaient aux ordres suivants : alfisols, entisols, spodosols et ultisols. L'horizon de prélèvement n'est pas précisé.

Les résultats sont donnés figure 3. On constate que la tendance générale est celle prévisible logiquement. IP et Wopt croissent avec T et avec la teneur en argile. Il est intéressant de noter que les analyses statistiques montrent que les corrélations entre teneur en argile et IP ou Wopt sont hautement significatives tandis que celle entre teneur en matière organique et Ip ou Wopt est non significative.

Compte tenu des valeurs de T données dans le tableau on en déduit immédiatement que la corrélation entre T et IP doit être peu significative, ce que confirme les études de LA ROSA.



Cs	Coastal savannah zone
F	Forest zone
Ws	Woodland savannah zone
Gn	Gneiss
Gt	Granite
Ph	Phyllite
St	Sandstone
Sh	Shale
R	Residual
NR	Non-residual
H	High
3R ₁	Woodland savannah zone residual granite soils
3NR ₁	Woodland savannah zone non-residual granite soils
3R ₂	Woodland savannah zone residual sandstone soils
3NR ₂	Woodland savannah zone non-residual sandstone soils
3R ₃	Woodland savannah zone residual shale soils
3NR ₃	Woodland savannah zone non-residual shale soils
3R ₄	Woodland savannah zone residual phyllite soils
3NR ₄	Woodland savannah zone non-residual phyllite soils
pH	Hydrogen exponent
f < 2mm	in a soil fraction smaller than 2 mm in particle sizes
P.R.	Parent rock
Top	Topography
Sym	Symbol
S	Summit
Us	Upper slope
Ms	Middle slope
Ls	Lower slope
B	Valley bottom
L	Low
1R	Coastal savannah zone residual gneiss soils
1NR	Coastal savannah zone non-residual gneiss soils
2R ₁	Forest zone residual granite soils
2R ₀₁	Forest zone residual granite surface soils (depth less than 10 inches)
2NR ₁	Forest zone non-residual granite soils
2R ₂	Forest zone residual phyllite soils
2R ₀₂	Forest zone residual phyllite surface soils (depth less than 10 inches)

fig 2 : relation entre la capacite d'échange et la fraction argileuse

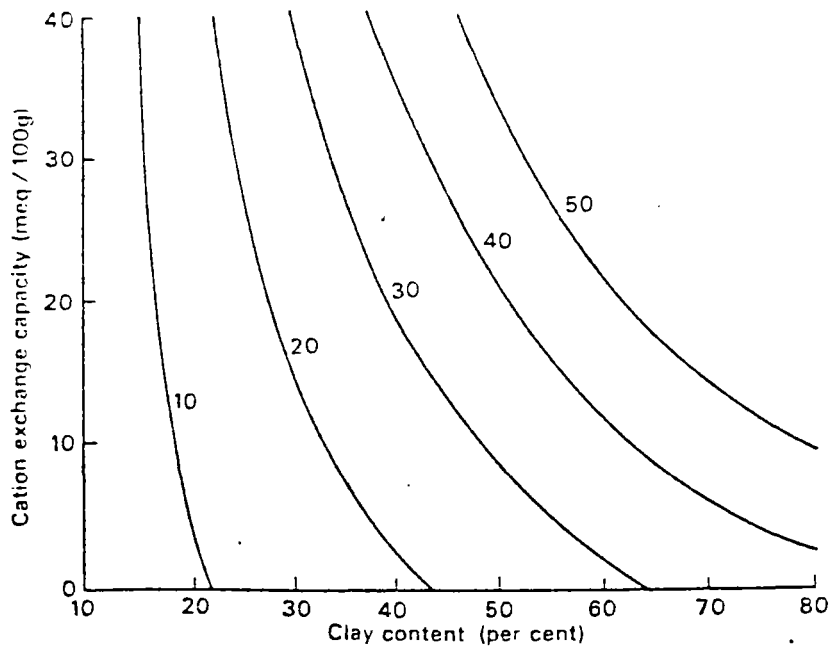


fig3a: relation entre la capacite d'échange, la fraction argileuse et l'indice de plasticite

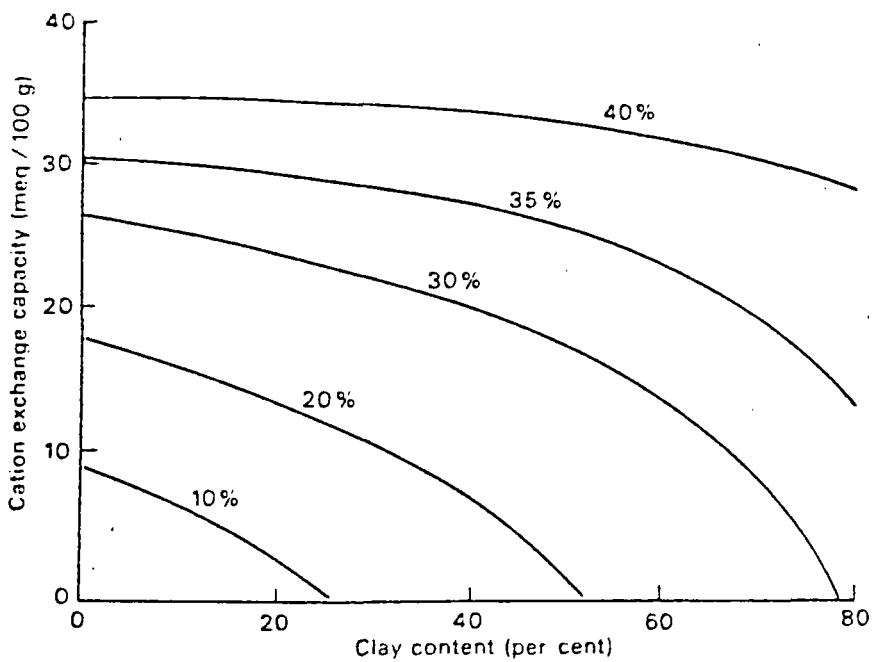


fig3b : relation entre la capacite d'échange, la fraction argileuse et l'optimum Proctor

3.2 Acidité du sol

L'acidité actuelle est mesurée par le pH ou cologarithme de la concentration des ions H^+ . On distingue l'acidité "actuelle" de l'acidité totale, qui ne peut être mesurée que par titration et qui correspond à la quantité de cations métalliques nécessaires pour saturer le complexe absorbant, donc pour remplacer la totalité des ions H^+ échangeables.

La valeur de l'acidité totale, plus sans doute que le pH est un paramètre qui peut intéresser le géotechnicien.

- Certains sols acides et sulfatés (mangroves) ont des acidités potentielles telles qu'il est prudent de les prendre en considération pour la définition des fondations d'ouvrages (ciments spéciaux, protections des aciers...).

- La stabilisation à la chaux et/ou au ciment des sols peut s'étudier par mesure du pH du mélange sol-ciment. Des spécifications ont été établies par l'Université de l'Illinois et celle de Floride : le pourcentage minimum de stabilisateur nécessaire est celui qui permet d'atteindre au bout d'une heure un pH de 12,4 pour les stabilisations à la chaux, et de 12,4 pour les stabilisations au ciment. Il s'agit donc bien d'une neutralisation de l'acidité totale du matériau sol.

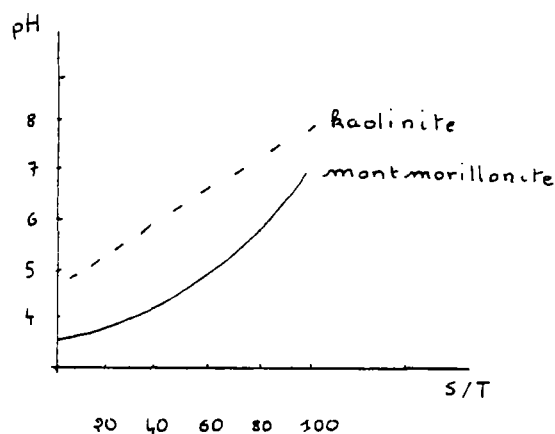


fig 4: variation du pH en fonction du rapport S/T

Duchaufour

il est donc probable qu'un affinement des spécifications soit possible et souhaitable en fonction du type d'argile présent dans le sol à stabiliser.

De même plutôt que le pH, il semble logiquement qu'il convienne de mesurer l'acidité totale du sol puis en fonction de cette acidité totale, de déterminer la quantité d'ions Ca^{++} nécessaire pour saturer complètement le complexe absorbant.

La considération de l'acidité du milieu au cours de son évolution donne également des informations précieuses sur le type d'argile de néoformation probablement présente dans le sol. La libération complète des éléments constitutifs des feldspaths et des micas (en climat tropical) permet une réorganisation en argiles de différents types suivant les conditions du milieu (MILLOT, 1961).

- milieu alcalin Ca, Mg \longrightarrow Montmorillonite
- milieu peu acide K \longrightarrow Illite
- milieu acide H \longrightarrow Kaolinite

A leur tour la nature de ces argiles, détermine pour une part importante le comportement géotechnique du matériau, ce qui implique donc une corrélation entre le pH ayant contrôlé l'évolution du sol et le comportement géotechnique du matériau sol. La littérature ne donne cependant pas d'exemple de corrélation entre acidité et caractéristiques géotechniques. Il est possible, ici aussi, que cela soit dû à ce que l'acidité mesurée est en générale l'acidité actuelle et non l'acidité totale.

4 MINÉRALOGIE

La composition minéralogique des éléments inférieurs à $2\ \mu$ (argiles, colloïdes) est un paramètre essentiel parmi ceux qui déterminent le comportement mécanique d'un sol. En géotechnique les index utilisés pour apprécier la quantité d'argile et son "activité" sont le passant à $80\ \mu$ (les "fins") et l'indice de plasticité. Le raisonnement est le suivant : le pourcentage de passant à $80\ \mu$ donne la proportion de matériaux fins, et l'indice de plasticité permet de juger si ces matériaux fins sont inertes (quartz,...) ou actifs (argiles,...) c'est ainsi que l'on a été amené à considérer que le produit $m \times IP$, m étant le passant à $80\ \mu$ (ou à $0,42\ \text{mm}$) et IP l'indice

de plasticité, doit pouvoir caractériser pour les sols fins la portance CBR du sol. PELTIER (1965) donne des relations de la forme :

$$F = \frac{K}{m \times IP}$$

F : facteur de portance ($F \approx \text{CBR}$)

K : constante.

IP et m sont des paramètres globaux dont l'intérêt réside surtout dans la simplicité et le fait qu'ils sont quantifiables facilement, ce qui permet en particulier de fixer des normes d'acceptation ou de refus des matériaux sur les chantiers de travaux.

Une autre manière de prévoir le comportement mécanique d'un sol est de l'expliquer à partir de la composition minéralogique de ces argiles et de sa fraction colloïdale. Il n'est pas question d'effectuer des analyses minéralogiques quantitatives précises en routine. C'est trop coûteux et trop long. Mais il se trouve (1) que les considérations pédologiques permettent de prévoir la nature minéralogique des fines (2) qu'une connaissance qualitative de cette minéralogie est parfois suffisante pour apprécier globalement le comportement d'un sol et qu'elle est en tout cas toujours utile pour l'expliquer.

Exemple : la présence d'argile gonflante type montmorillonite est prévisible à partir de la connaissance de la roche mère et du processus pédologique de genèse du sol. Or ce type d'information qualitative est déjà suffisant pour prévoir que le sol aura une mauvaise portance. C'est ainsi que tous les sols à tendance vertique, quelle que soit par ailleurs leur classe sont des sols peu portants, parfois gonflants (ATLAN et FELLER 1980).

Les sols tropicaux présentent parfois de ce point de vue une composition minéralogique particulière qui leur confère précisément des propriétés particulières. Ci dessous sont analysés les principaux résultats acquis.

4.1 Argiles

- Kaolinite ($2\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{H}_2\text{O}$)

c'est l'argile la plus pauvre en silice et qui est dominante dans le cas des sols tropicaux ferrallitiques ou ferrugineux développés sur roche acide.

La kaolinite est une argile peu active, peu sensible et ceci explique que ces sols présentent en général de bonnes propriétés géotechniques.

- Montmorillonite ($4 \text{ SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

La formule chimique montre que la montmorillonite est plus riche en silice. Ceci entraîne que si la montmorillonite est l'argile dominante le rapport SiO_2 /sesquioxyde a tendance à être élevé, ce qui fait sortir le sol de la classe des sols latéritiques si on adopte la classification de D'HOORE. En fait, la montmorillonite dans le cas des sols tropicaux est présente principalement dans la classe des vertisols (dont font partie les "black cotton soils" ou argiles noires tropicales). Elle se forme à partir d'une roche mère basique et un environnement alcalin (HOSKING 1940, HARDON et FAVEJEE 1939).

La montmorillonite étant une argile active (voir T et activité au sens de SKEMPTON) elle donne au sol, si elle est présente en quantité significative, de mauvaises qualités géotechniques.

- Halloysite

L'halloysite existe sous deux formes, la première est l'halloysite hydratée $\text{Al}_2\text{O}_3, 2 \text{ SiO}_2, 4 \text{ H}_2\text{O}$, la seconde la métahalloysite $\text{Al}_2\text{O}_3, 2 \text{ SiO}_2, 2 \text{ H}_2\text{O}$. La présence d'halloysite hydratée pose un problème spécifique. La mesure des limites d'Atterberg, les mesures Proctor et CBR exigent un séchage du sol. Celui-ci peut, dans certaines conditions de température, entraîner une déshydratation, c'est-à-dire une transformation de l'halloysite hydratée en métahalloysite. Il s'ensuit alors que les propriétés géotechniques mesurées en laboratoire ne sont pas celle du matériau in situ. Ici aussi géologie et pédologie permettent de savoir qualitativement quand se pose ce problème (LYON ass, 1976). En effet la présence d'halloysite hydratée n'a été jusqu'à présent signalée que sur des roches basiques, et quand les chutes de pluie dépassent 1500 mm par an.

-Allophane

Allophane est un terme utilisé pour décrire un matériau amorphe dont la composition varie de $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$ à $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{H}_2\text{O}$. La présence d'allophane hydratée dans un sol pose les mêmes problèmes que la présence d'halloysite hydratée. Certains résultats tendent même à faire penser qu'en réalité les sols présentant des variations de propriétés au séchage contiennent toujours des allophanes, mais qui n'ont pas été décelés du fait de leur caractère amorphe et de la présence d'halloysite (LYON ass 1976).

Du point de vue géotechnique, on peut considérer que c'est uniquement dans la classe des andosols (sols peu évolués sur cendres volcaniques) en régions de forte pluie qu'ont été reportés par la littérature technique les sols contenant des allophanes hydratées.

- Gibbsite $\text{Al}_2 (\text{OH})_3$

La gibbsite est présente dans les sols fortement ferrallitiques FROST (1967) a attribué à la présence de la gibbsite des variations de propriétés au séchage observées sur des sols de New Zealand. Les variations ont également été notées par Lyon ass sur des sols ferrallitiques provenant de régions où les précipitations sont supérieures à 1500 mm/an. Cependant Lyon ass signale que les différences entre les limites d'Atterberg selon les méthodes de séchage sont le plus souvent non significatives, ceci dans la mesure par exemple où ces différences sont inférieures à celles qui amèneraient un changement de classe géotechniques du matériau étudié (classification géotechnique UCS).

A ce propos il est important de noter que la présence ou non d'allophane d'halloysite et de gibbsite (suivant les cas) est la seule cause mise en évidence expérimentalement de la susceptibilité de certains sols tropicaux au séchage. Malheureusement il se trouve que beaucoup d'auteurs ont englobé sous le terme "latérite" une grande variété de sol, certains développés sur cendres volcaniques et contenant des allophanes, d'autres n'en contenant pas. Il s'est ensuivi une grande confusion dans les conclusions. Pour les uns les "sols latéritiques" ont des propriétés inférieures

à ce que permettrait de prévoir leur paramètres d'identification. Pour les autres les sols ont des comportements identiques à ceux des sols tempérés (exemple du premier point de vue LOHNES, 1971 exemple du second MEYER, 1967). A notre sens la principale raison de ces avis divergents est que l'on englobe sous l'expression latérite ou sol latéritique des sols présentent des grandes différences tant du point de vue granulométrique que minéralogique. Par exemple, MICHALSKI et TEYSSONNIERE, 1977 ont publié une étude bibliographique intitulée "étude géotechnique des sols tropicaux". En fait cette étude ne concerne que les sols développés sur roches volcaniques en climat tropical humide. On est loin de la généralité du titre. Ceci dit cette très intéressante étude rassemble de nombreux résultats expérimentaux sur les sols à allophanes et/ou halloysite hydratée et conclut qu'il y a contradiction pour ces sols,

entre d'une part leurs propriétés physiques :

- limite de liquidité
- W_l élevée
- grande variabilité de W_l pour les sols à allophanes en particulier
- degré de saturation élevé *in situ*
- γ_d max faible et W_{opt} élevé pour le compactage.
- granulométrie fine

et d'autre part leurs bonnes propriétés mécaniques :

- faible compressibilité
- résistance au cisaillement élevé
- bonne perméabilité *in situ*.

4.2 Sesquioxydes

Les sols à sesquioxydes (R_2O_3) très individualisés forment une classe de la classification pédologique qui correspond à peu près aux sols latéritiques des divers auteurs. Le schéma de formation de ces sols et de leur minéralogie est donné en annexe. Il s'agit de sols formés en climat tropical.

De nombreux auteurs pensent que la présence de sesquioxydes dans les sols ferrallitiques et ferrugineux est la raison pour laquelle ces sols présentent des propriétés géotechniques meilleures, (et non pas plus mauvaises)

à paramètres d'identification semblables (granulométrie et IP), que celles des sols des régions tempérées. En d'autres termes un sol classé Ap dans la classification LPC présenterait en général, si il s'agit d'un sol contenant des sesquioxydes, des propriétés géotechniques meilleures que celles d'un sol tempéré.

L'explication donnée est la suivante : les sesquioxydes recouvrent les particules d'argile d'une couche qui les agglomère en agrégats moins actifs. Cette structure est détruite lors des remaniements extrêmement importants qui ont lieu au cours des mesures de granulométrie et de limites d'Atterberg, et les paramètres mesurés sont alors plus mauvais que ceux du sol in situ. Pour tester en toute rigueur cette hypothèse il faut d'une part mesurer granulométrie et IP et d'autre part mesurer une propriété quantifiant le comportement mécanique du sol, (CBR, cisaillement, triaxial) mais en utilisant seulement des propriétés mesurées sur échantillons non remaniés. Une confirmation indirecte de rôle des sesquioxydes est donnée par le fait que la cohésion tend à décroître quand la teneur en sesquioxydes augmente (Références WINTERKORN et CHANDRASHEKHARAN 1951, TERZAGHI 1958, TOWNSEND et al 1971, LOHNES et al 1975).

Les sesquioxydes sont également liés au poids volumique des grains. Plus la quantité de sesquioxydes est importante, plus le poids volumique des grains est élevé.

Cependant les résultats donnés par MADU (1977) ne montrent pas une bonne corrélation entre poids volumique des grains et teneur en sesquioxyde (figure 5). Il est possible que cela soit dû à ce que les mesures ont été portées sur le mortier du matériau (passant au tamis 3/16) alors que les sesquioxydes se concentrent dans la partie grossière.

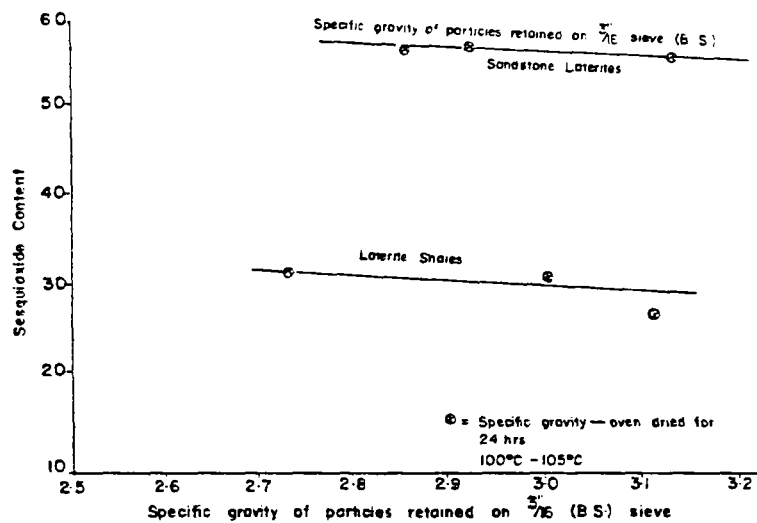


fig 5 : relation entre le poids spécifique et la teneur en sesquioxides

Madu 1977

CHAPITRE III

MONOGRAPHIES DES ETUDES LIANT CARACTERISTIQUES PEDOLOGIQUES

ET PROPRIETES GEOTECHNIQUES

Le premier problème qui se pose pour établir ces monographies est de choisir un mode de présentation des résultats. Il y en a au moins deux possibles : soit rassembler pour un type de sol -par exemple les sols ferrallitiques- les résultats acquis dans divers pays, soit rassembler les résultats acquis sur tous les sols d'une région géographique.

Nous avons préféré ici la seconde manière. En effet, compte tenu de la variété du vocabulaire employé pour définir les types de sol, des imprécisions de nombreux auteurs, de la variété des conditions climatiques, toute extrapolation nous a paru être une source de confusion possible. LEPRUN (1979) cite sur un sujet voisin LACROIX A (1913).

"La lecture des innombrables mémoires consacrés à la latérite m'a amené à la conviction que cette question ne pourra véritablement être élucidée que (...) lorsque les auteurs s'efforceront de ne pas considérer comme générales les conclusions tirées d'un trop petit nombre de faits particuliers".

Le mot latérite est un exemple particulièrement significatif des confusions que peuvent entraîner des généralisations hâtives. Comme ce mot a servi à nommer une grande variété de sols, assez souvent on a étendu à toutes ces catégories de sol les résultats acquis sur seulement une catégorie particulière. MAIGNEN (1966) a fait l'historique des diverses définitions données à ce mot. La plupart des auteurs actuels écrivant en Anglais citent la définition donnée par ALEXANDER et CADY (1962) qui comprend à la fois des critères morphologiques et des critères chimiques. Ils définissent les latérites comme (a) fortement altérées (b) riches en fer secondaire et/ou oxydes d'aluminium (c) pauvres en bases et silicates primaires (d) contenant éventuellement de fortes proportions de quartz de Kaolinite (e) capables de durcir sous l'effet du soleil.

Sans se prononcer sur l'utilité scientifique d'une telle définition

il est à notre avis clair qu'elle n'a pas grand intérêt géotechnique. L'intérêt d'une classification appliquée comme doit l'être une classification géotechnique est de permettre à partir de constatations de terrain et d'essais simples de prévoir le comportement mécanique d'un matériau. Ce n'est pas semble t-il le cas de cette définition.

En fait, on a appelé latérites dans la littérature géotechnique les matériaux provenant de divers horizons de profils ferrallitiques et ferrugineux, la plupart des auteurs traitant à l'intérieur de cette catégorie exclusivement d'une sous-classe pédologique, ou d'un horizon mais sans expliciter les limites de leur étude.

Seules, les études consacrées au continent africain seront considérées dans ce paragraphe. Cependant, les résultats acquis sur les sols tropicaux des autres parties du monde ont été utilisés dans le chapitre 2 traitant des corrélations entre propriété physico-chimiques et propriétés géotechniques des sols.

Par ailleurs on s'est volontairement limité ici aux études présentant des résultats expérimentaux en éliminant les études de synthèse non fondées sur des études de terrain et/ou de laboratoire spécifiques.

1 ETUDE "LYON ASS"

Le bureau d'étude LYON ass. a exécuté en 1970-75 une étude générale des sols tropicaux d'Afrique, qui avait pour objectifs de :

1 - Mettre au point une définition géotechnique des latérites, des sols latéritiques et des autres sols tropicaux posant des problèmes. L'accent étant mis en pratique sur les sols latéritiques et les argiles noires tropicales.

2 - Proposer une classification des sols latéritiques qui décrive correctement leurs propriétés géotechniques.

3 - Evaluer les propriétés géotechniques et leurs intervalles de variations pour chaque classe.

1.1 Etude des sols latéritiques

Pour LYON ass. sont considérés comme sols latéritiques les matériaux rougeâtres provenant de l'altération en place, en région tropicale de la roche mère (reddish tropically weathered materials). Cette définition recouvre pour LYON les sols ferrugineux, les ferrisols et les sols ferrallitiques de la classification de D'HOORE (la figure 6 donne la répartition de ces sols en Afrique) selon cette classification.

- les sols ferrugineux ont un profil ABC qui montre fréquemment des concrétions ou des tâches provenant du lessivage et de la précipitation d'oxydes de fer. La réserve en minéraux altérables est souvent importante bien que le rapport silt/argile (20/2 microns) soit généralement au dessous de 0,15. La kaolinite est l'argile dominante mais il peut aussi y avoir de petites quantités d'argiles à réseau 2 : 1. Il n'y a généralement pas de gibbsite. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est proche de 2 ou parfois plus haut, mais le rapport $\text{SiO}_2/\text{AlO}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ est inférieur à 2. Les sols ferrugineux sont trouvés dans les régions où les précipitations sont inférieures à 1830 mm par an et avec une saison sèche prononcée. La profondeur du profil est rarement supérieure à 2,50 m.

- les sols ferrallitiques sont souvent profonds avec des horizons peu différenciés. Le ratio silt/argile est généralement inférieur à 0,25 dans les horizons B et C. Les minéraux argileux sont du type à réseau 1 : 1 et les oxydes hydratés d'alumine sont généralement présents même si la gibbsite n'est pas un constituant essentiel. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est parfois voisin de 2 mais le plus souvent inférieur. Les sols ferrallitiques sont trouvés dans les régions humides (précipitations supérieures à 1500 mm) et couvertes d'une végétation dense.

- les ferrisols ont des profils très semblables à ceux des sols ferrallitiques. La réserve en minéraux altérables est généralement basse mais peut excéder 10 % de la fraction 50 - 250 microns. Le ratio silt/argile est généralement supérieur à 0,20 pour les roches métamorphiques et volcaniques. La fraction argileuse est presque entièrement constituée de kaolinite,

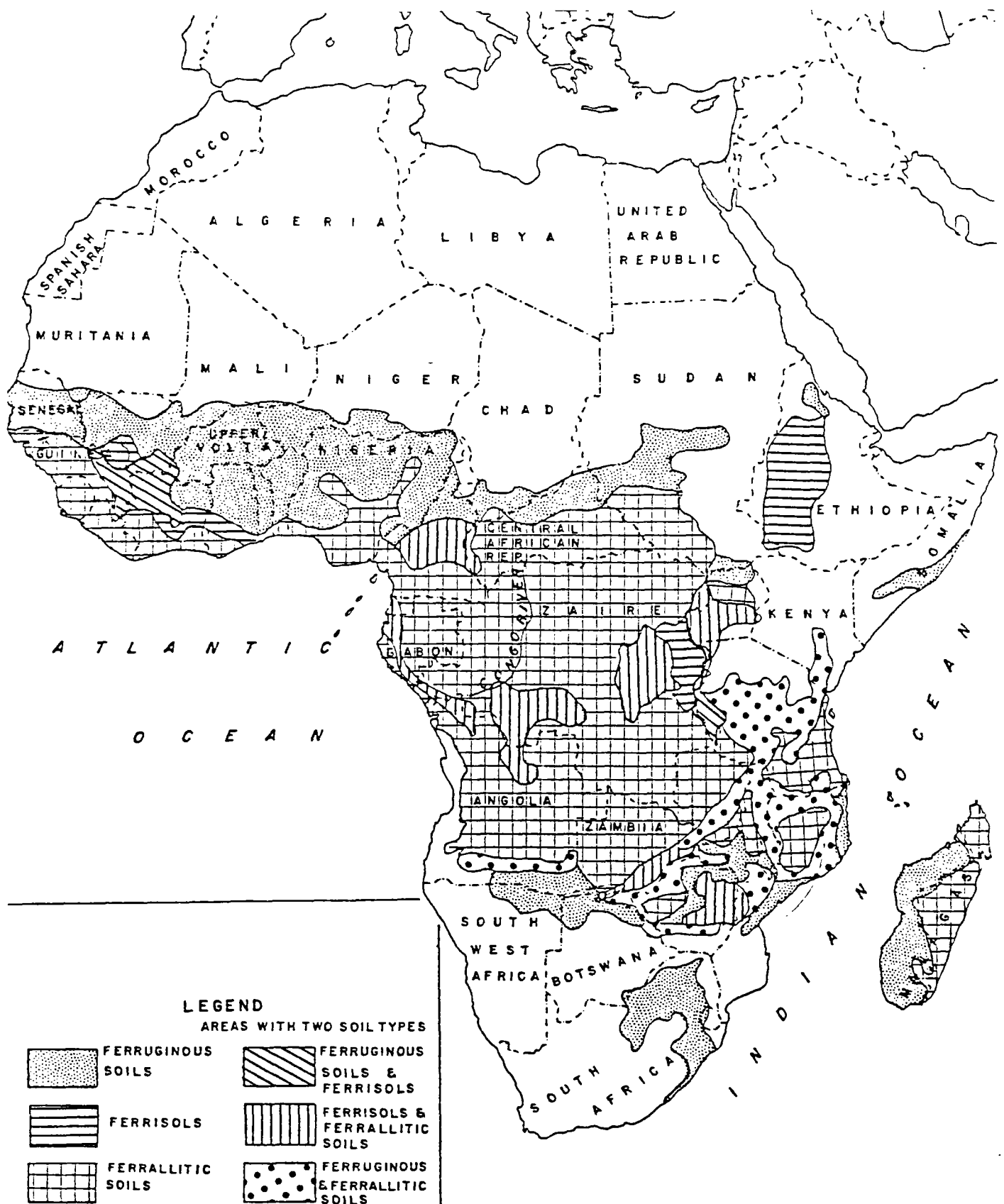


fig6 : repartition des sols lateritiques en Afrique

Lyon ass 1976

d'oxydes de fer, et de gels amorphes, avec parfois de petites teneurs de gibbsite. Le ratio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est voisin de 2, ou légèrement inférieur. Les ferrisols se trouvent dans les zones où les précipitations sont comprises entre 1250 et 2750 mm par an.

Les caractères essentiels des différences entre ces trois classes sont résumés dans le tableau 8 ci-dessous.

	profondeur profil	argile dominante	argile accessoire	Silt/argile	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	pluie (mm)
Ferrugineux	rarement > 2,5 m	Kaolinite		$\leq 0,15$	≈ 2	≤ 1800
Ferrallitiques	souvent profond (6m)	Kaolinite	parfois gibbsite	$\leq 0,25$	≤ 2	≥ 1500
Ferrisols	souvent tronqués par érosion	Kaolinite		$\geq 0,2$	≈ 2	> 1250 < 2750

TABEAU 8

Pour chacune de ces trois classes, ont été étudiés sur un grand nombre d'échantillons :

- a) les fuseaux granulométriques : voir figure 7.

- b) les relations entre LL et IP

sols ferrugineux : $\text{IP} = 0,71 \times \text{LL} - 8,5$

sols ferrallitiques : $\text{IP} = 0,57 \times \text{LL} - 3,62$

Ferrisols : $\text{IP} = 0,50 \times \text{LL} - 1,5$

Les différences entre ces relations ont fait l'objet de tests statistiques qui ont montré qu'elles étaient significatives.

- c) les relations entre CBR et produit $m \times \text{IP}$. voir figure 8.

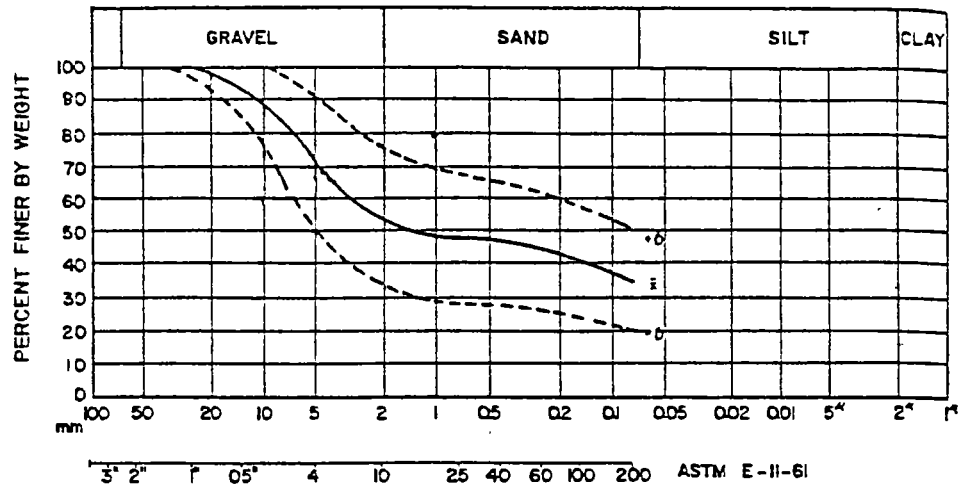


fig 7a : sols ferrugineux

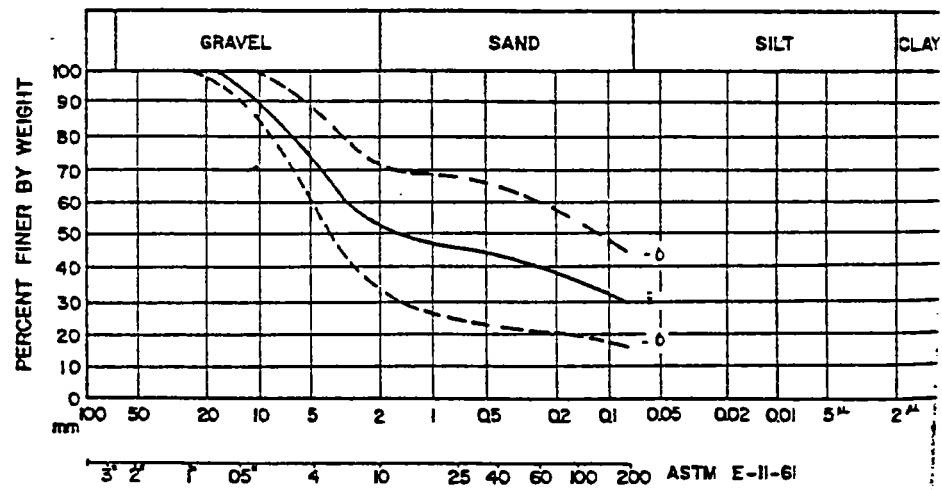


fig 7b : sols ferrallitiques

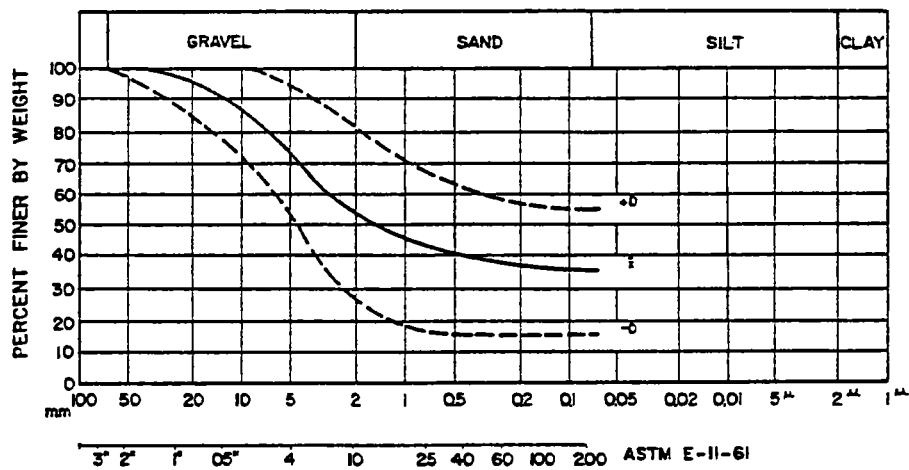


fig 7c : ferrisols

courbes granulométriques des sols latéritiques
africains

Lyon ass 1976

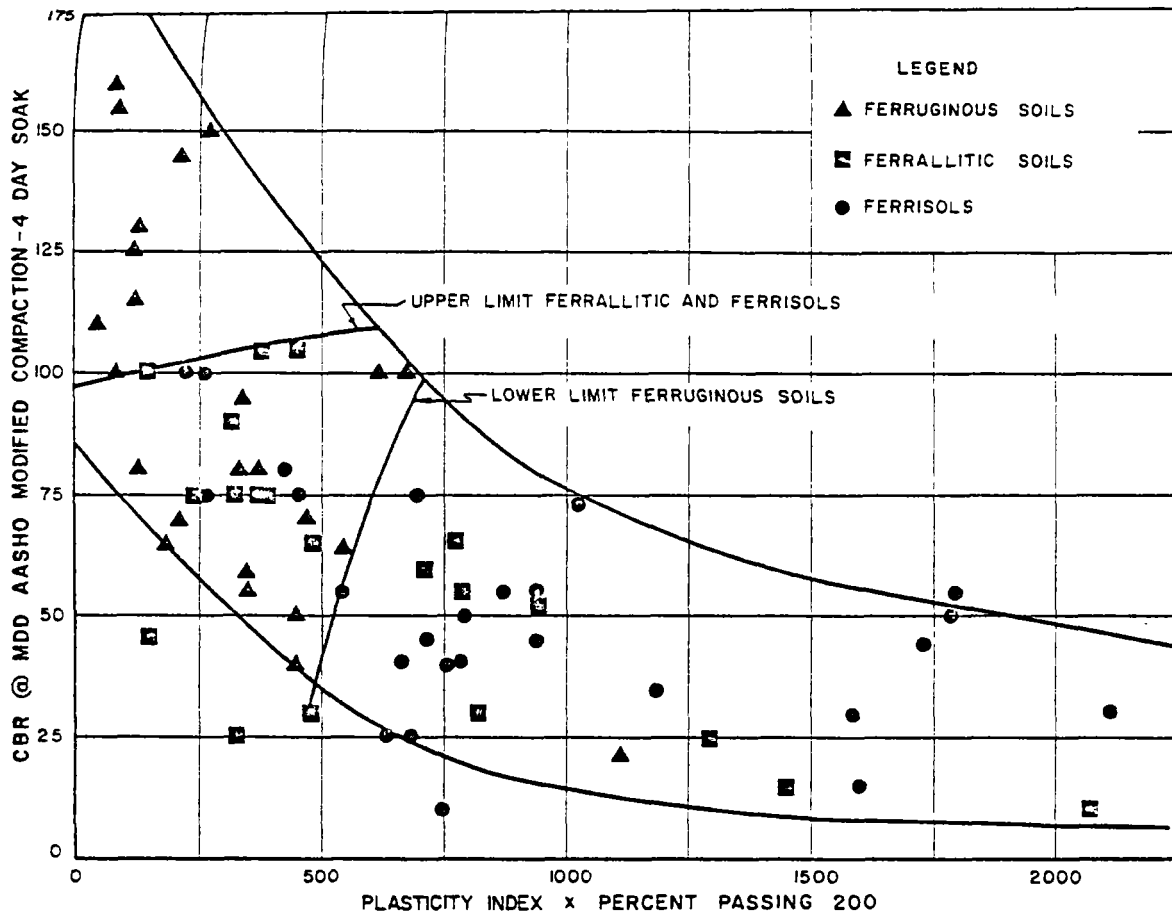


fig 8a: relation entre le CBR et le produit $m \cdot IP$
Lyon ass 1976

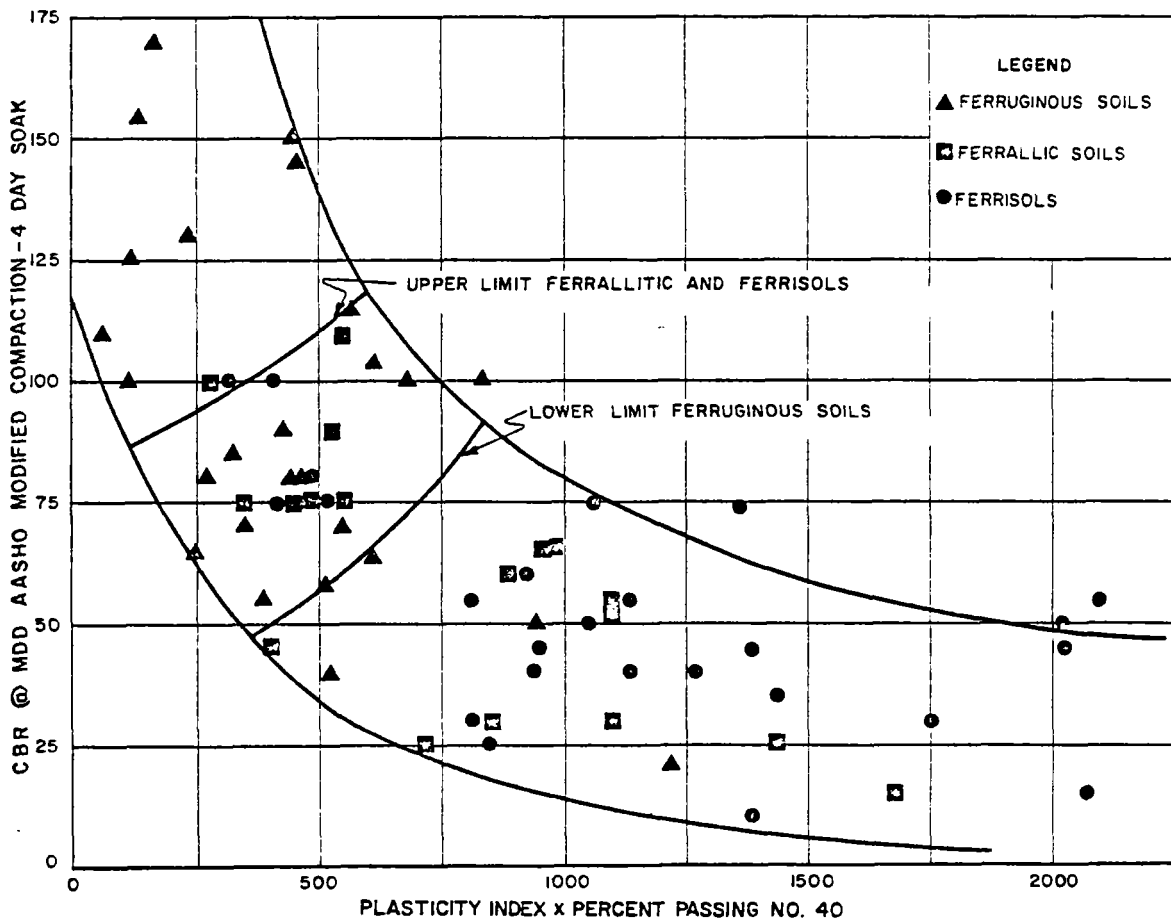


fig 8b: relation entre le CBR et le produit $m \cdot IP$
Lyon ass 1976

Critiques de ces résultats

Trois critiques principales peuvent être formulées.

a) La classification adoptée est trop sommaire. A l'intérieur de chacune des classes existent des groupements dont l'intérêt au plan géotechnique, dépasse celui de la classe. Par exemple la considération de la roche mère est presque toujours un facteur important de différenciation de la granulométrie des horizons profonds : l'horizon C d'un sol développé sur granite a les mêmes caractéristiques géotechniques que le sol soit ferrallitique ou ferrugineux mais à l'intérieur de la classe sol ferrallitique l'horizon C développé sur schiste et l'horizon C développé sur granite sont géotechniquement très différents. (ATLAN 1973...).

b) Si on considère les faisceaux granulométriques présentés il apparaît que la grande majorité des sols étudiés sont des sols comportant environ 20 % de graviers. Ce type de matériau n'est pas, loin s'en faut le plus représenté. Si nous considérons par exemple un profil d'altération ferrallitique sur granite de la Côte d'Ivoire, on a en général la succession des horizons suivants :

- humifère sablo-argileux puissance 0,20 à 1,70 m.
- graveleux argileux puissance 0 à 0,80 m.
- argile puissance plusieurs mètres.
- arène sablo-argileuse (granite altérée) puissance 2 à 3 m.
- roche saine.

Il semble alors d'après les fuseaux donnés par LYON que les matériaux étudiés ne sont représentatifs que de la deuxième couche, ceci explique d'ailleurs pourquoi le point de vue exprimés en a) n'a pas été pris en compte par LYON ass.

c) La considération du ratio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ne semble pas être un critère de classification significatif : AUTRET (1980) ne retrouve pas les domaines de variation de ce ratio données dans le tableau 8.

1.2 Etude des argiles noires tropicales

21 échantillons d'argiles noires tropicales provenant d'Afrique ont été analysés (voir tableau 9). La montmorillonite est toujours l'argile dominante. La teneur en argile et limon varie de 58 à 95 % -voir fuseau granulométrique (figure 9).

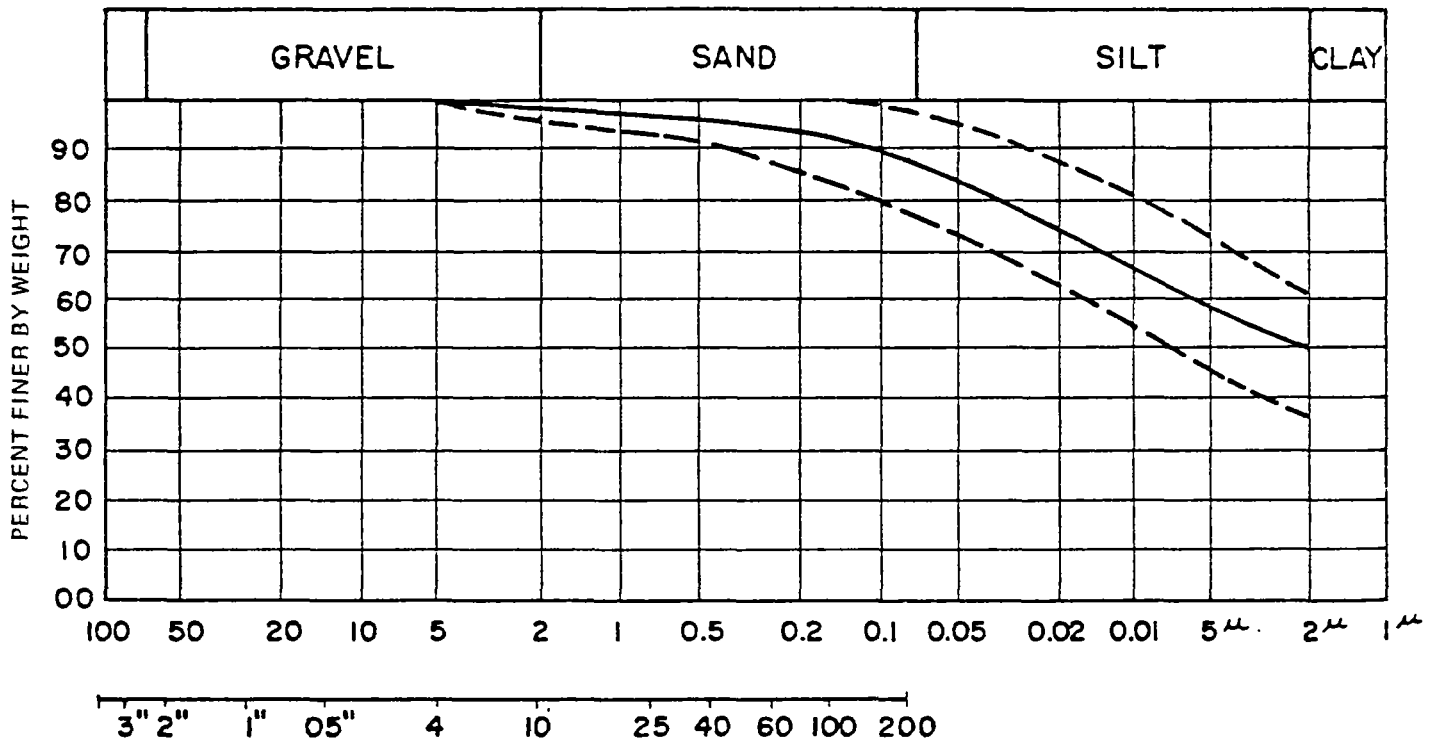


fig9 : courbes granulométriques des argiles noires

Lyon ass 1976

La limite de liquidité varie de 22 à 149 % et l'indice de plasticité de 11 à 93. La densité optimum Proctor modifié varie de 1,4 à 1,9. Les valeurs du CBR sont toutes très basses (< 2), ce qui est à mettre en relation avec le caractère gonflant de la motmorillonite. Le nombre réduit des échantillons ne permet pas de considérer comme significatives les corrélations établies entre densité à l'optimum Proctor et pression de gonflement.

Location	Sample No.	Parent Material	Clay Mineralogy	Cation Exchange Capacity in M.E./100 Gram	Exchangeable Cations	pH	Organic Content
Chad Basin	CB-1	Alluvium		34.90	mostly Ca; with Mg; minor K and Na	8.4	<1.0%
Chad Basin	CB-2	Alluvium		32.83	mostly Ca; with Mg; minor K and Na	6.3	<1.0%
Chad Basin	CB-3	Alluvium	kaolinite, illite, montmorillonite				
Chad Basin	CB-4	Alluvium	quartz, kaolinite montmorillonite			6.3	
Nigeria	NBC-1	Calcareous Rocks	montmorillonite, quartz, kaolinite	44.08	mostly Ca; with Mg; minor K and Na		<1.0%
Ethiopia	ETH-1	Basalt	montmorillonite, kaolinite, halloysite	64.90	mostly Ca; with Mg; minor K and Na	7.2	<1.0%
Kenya	KEN-6	Basalt	montmorillonite, kaolinite			8.8	
Kenya	KEN-9	Basalt	montmorillonite, kaolinite	45.02	mostly Ca; with Mg; minor K and Na	7.2	
Zambia	ZAM-1	Alluvium		32.16	mostly Ca; with Mg; minor K, Na, Mn		1.0-1.5%
Zambia	ZAM-2	Basalt		33.34	mostly Ca; with Mg; minor K, Na, Mn	6.4	<1.0%
Uganda	U-12	Basalt		56.74	mostly Ca; minor Mg, K and Na	7.4	1.0%
Tanzania	TAN-X-1	Alluvium		30.07	mostly Ca; with Mg; minor K and Na	9.2	<1.0%
Tanzania	TAN-3A	Alluvium					
Morocco	MOR-2	Alluvium from basalt	montmorillonite chlorite, kaolinite				
Morocco	MOR-3	Alluvium from shales	montmorillonite chlorite, kaolinite				
Sudan	SU-1	Alluvium from basalt	montmorillonite, kaolinite, illite, quartz, calcite			8.9	
Sudan	SU-2	Alluvium from basalt	montmorillonite illite, kaolinite calcite				
Sudan	SU-3	Alluvium from basalt	montmorillonite kaolinite, illite quartz, calcite				
Sudan	SU-5	Alluvium from basalt	montmorillonite kaolinite, illite quartz, calcite				
Sudan	SUD-D	Unknown	montmorillonite vermiculite, misc.				
West Cameroon	WC-2	Basalt	vermiculite metahalloysite				
Colombia ¹			montmorillonite, some kaolinite quartz	53.5	Na, Ca, K	5.6	
Peru ²	-	Quaternary sediments	montmorillonite, kaolinite		Ca, Na	7.8-8.2	
Brazil	Minas Sertãozinho		montmorillonite			4.6	
Brazil	Patos						
Brazil	Bahia 1	Clay-shale	kaolinite, gibbsite, goethite, hematite			6.85	
	Bahia 2	Clay-shale	montmorillonite, kaolinite, chlorite, gibbsite, goethite, hematite.				

tab9 : echantillons d'argiles noires analyses

Lyon ass 1976

La roche mère des vertisols ne semble pas avoir d'influence sur leurs propriétés. Cependant les argiles noires résiduelles sur roches volcaniques ont souvent de plus faibles densités et des optimum Proctor plus élevés. De plus, le gonflement est moins marqué lorsque les argiles ont des cations calcium plutôt que des cations sodium.

2 RESULTATS DES ETUDES EXECUTEES AU GHANA

L'université de KUMASI au GHANA avait participé de façon importante aux études de LYON. Dans les années qui ont suivi, ces études ont été continuées en particulier par GIDIGASU. Sur des matériaux représentatifs des différents profils représentés au GHANA ont été exécutés des essais physico-chimiques : granulométrie, pH, teneur en carbonate de calcium, teneur en matière organique, capacité d'échange des cations, teneur en eau hygroscopique-le tableau n°10 donne les résultats obtenus-. Ces résultats ont été ensuite interprétés à l'aide de cinq facteurs (1) zone climatiques et végétale (2) roche mère (3) type de pédogénèse (4) degré de lessivage et latérisation et (5) teneur en argile.

Les conclusions suivantes ont alors été énoncées :

(1) pH, teneur en carbonate de Ca, teneur en matière organique dépendent principalement des conditions climatiques et de la végétation.

(2) Les différents degrés de lessivage et de latérisation des différents types de sol dans les trois zones climatiques distinguées (voir tableau n° 11) exercent une influence considérable sur les relations entre teneur en argile, capacité d'échange de cation, et teneur en eau hygroscopique.

(3) Les sols tropicaux du GHANA ne peuvent pas être classés à partir seulement de la granulométrie. La genèse des sols doit aussi être considérée.

(4) Des propriétés géotechniques moyennes peuvent être attribuées à des groupes de sol classés en fonction de leur granulométrie, de la roche mère, du climat et de la végétation des zones où ces sols sont dé-

THE APPROXIMATE RANGES OF THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF THE SOILS STUDIED¹

<i>Climatic-vegetational zone</i>	<i>Parent rock</i>	<i>Genetic type</i>	<i>pH</i>	<i>CaCO₃ (%)</i>	<i>Organic matter content (%)</i>	<i>Base exchange capacity (mequiv./100g)</i>	<i>Hygroscopic moisture content (W h %)</i>
Coastal savannah zone	gneiss	residual	5 -9	0-20	0-3	1 0-22(3)	0 -3.2(0.6)
						2 22-33(3)	3.2-5 (0.6)
						3 33-54(3)	5 -11 (0.6)
	non-residual	1 0-12				0 -3.4(0.6)	
		2 12-18				3.4-4.8(0.6)	
		3 18-28				4.8-7.4(0.6)	
Woodland savannah zone	granite + sandstone	residual	5 -8	0- 2	0-3.5	1 0- 5(3)	0 -1.3(0.5)
						2 5- 7(3)	1.3-1.8(0.5)
						3 7- 9(3)	1.8-3.0(0.5)
Forest zone	granite	residual	4.5-8	0- 1	0-4.5	1 0-10(3)	0 -2.8(0.4)
						2 10-14(3)	2.8-3.4(0.4)
						3 14-20(3)	3.4-5.2(0.5)
	phyllite	residual				1 0- 9(3)	0 -2.8(0.4)
						2 9(3)	2.8-3.9(0.4)
						3 9(3)	3.9-5.2(0.5)
Woodland savannah and forest zone	phyllite, shale and granite	non-residual	4.5-8	0- 2	0-4.5	1 0- 9(4)	0 -2 (0.5)
						2 9-11(4)	2 -2.9(0.5)
						3 11-12(4)	2.9-5.3(0.5)

¹ 1 = cohesionless and slightly cohesive soils; 2 = moderately cohesive soils; 3 = highly cohesive soils.

(figure in parentheses) = plus-minus range of variation.

tab10 : resultats d'essais physicochimiques executes sur
des sols de Ghana
Gidigasu 1971

Profile no.	Climatic vegetation zone	Proposed soil group	Parent rock	Genetic type	Pit no.	No. of samples	Local topography	Drainage conditions	Mineral composition of the clay fraction ¹ predominant accessory		Degrees of leaching and laterisation ²
1	Forest zone	forest ochrosols and oxysols	granite phyllite	residual	1- 3 12-16	25 39	upland	good	kaolinite	mica (muscovite)	high
2	Woodland savannah zone	savannah ochrosols	voltaian sandstones	residual	21-25	35	upland	good	kaolinite	mica (muscovite)	high
		ground-water laterites	granite phyllite	non residual	4	8	valley, lowland	fairly good to poor	kaolinite	-	high
			voltaian shale		17	7	lowland		kaolinite	montmorillonite, vermiculite, mica	low/high
			mudstone	residual	19, 20	15					
3	Coastal savannah zone			residual	18	7	upland				
		tropical clays	gneiss	residual	6-9, 11	35	mainly lowland valley, lowland dunes to valley lowland	poor to very poor	montmorillonite	kaolinite	low
		coastal sands	coastal sands	non-residual	5, 10 26	10 5		good	N.D. ³	N.D.	low

¹ Mineralogical data after MORIN et al. (1969); BAMPO ADDO et al. (1969); and B.R.R.I. records.

² Based on pedological informations and field studies.

³ N.D. = not determined.

tab11 : caracteristiques des sols etudies au Ghana

Gidigasu 1971

veloppés (GIDIGASU 1972).

Critiques de ces résultats

- Les résultats expérimentaux ne concernent pratiquement que les sols dits latéritiques. Il n'y a pas prise en compte des autres types de sol ni tentative d'application systématique des cartes et données pédologiques aux études géotechniques. Ce n'était d'ailleurs pas le propos des auteurs.

Le paramètre profondeur de prélèvement c'est à dire l'horizon dans lequel est prélevé l'échantillon testé n'est pas explicité dans les publications antérieures à 1980. Cela pourrait signifier que seul la partie supérieure de l'horizon B a été étudiée. Cela peut également signifier que c'est par l'intermédiaire de la granulométrie que sont différenciés les échantillons pris à différentes profondeurs. Il y a en tout cas une ambiguïté, commune à la plupart des études, et qui semble ici aussi due à un problème de vocabulaire : il semble que l'expression "laterite" soit réservée pour GIDIGASU à la partie supérieure de l'horizon B. En effet un article paru en juin 80 (GIDIGASU, 1980) donne les secteurs et courbes granulométriques ci-dessous (figures 10, 11) qui d'une part confirme les indications données par ATLAN (1974) sur les sols de Côte d'Ivoire, mais d'autre part montrent que le vocabulaire employé (latérite zone, mottled zone...) mériteraient d'être unifiés.

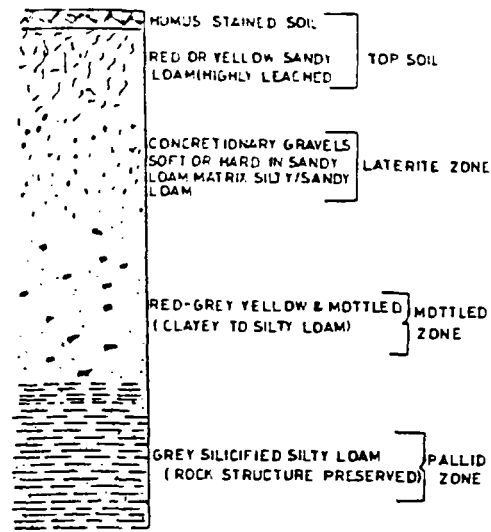


fig10 : profil lateritique

Gidigas 1980

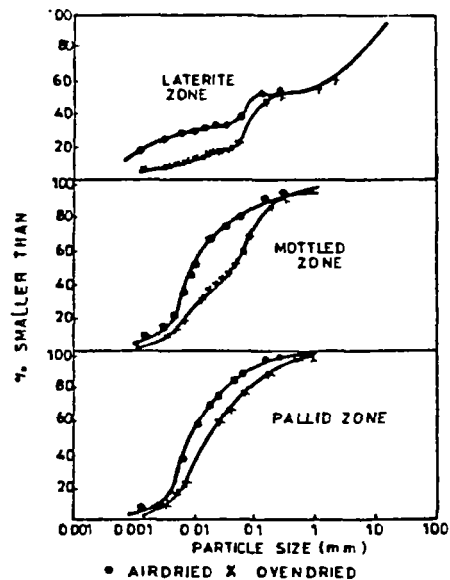


fig11 : courbes granulometriques fonction de la methode de

sechage

Gidigas 1980

- Les résultats obtenus sur les quelques échantillons des sols vertiques analysés ont été présentés en même temps que ceux sur les sols "latéritiques" ce qui ne paraît pas souhaitable, en égard à leur spécificité. Signalons cependant (GIDIGASU et ANDOH 1980) une étude récente qui à propos des fondations sur sols gonflants précise pour le GHANA les conditions génétiques amenant à la formation d'argiles noires tropicales.

3 LE NIGERIA

3.1 Les sols latéritiques du Nigéria

Lyon ass (1976) a de même que pour les sols de GHANA, étudié les propriétés des sols du Nigéria en tenant compte de la classification de D'HOORE. Les mêmes critiques et observations sont à formuler.

D'autres études ont été effectuées. Elles font intervenir les facteurs roche mère, degré d'altération. Les études de KAHL (1976) donnent les propriétés géotechniques des sols du Nigéria en relation avec la roche mère (figure 12 , tableau 12).

MADU (1977) quant à lui, distingue les sols latéritiques sur grès et les sols latéritiques sur schistes. Les premiers présentent une teneur en sesquioxydes plus élevées que les seconds. Il relie les limites d'Atterberg à la teneur en sesquioxydes. La corrélation est trouvée bonne (Figure 13). En revanche, la densité sèche maximale n'est pas liée à la teneur en sesquioxydes. Il faut cependant noter que ces courbes sont obtenues à partir d'essais réalisés sur 6 échantillons ce qui peut paraître insuffisant, quant au calcul du coefficient de corrélation qui n'est d'ailleurs pas précisé ici. Lal (1978) réalise le même type d'études en distinguant les sols développés sur roches basiques et sur roches sédimentaires. Les sols du second groupe ont un plus faible pourcentage en silt, ceci correspond au fait que ces sols ont un degré d'altération plus important que les sols du premier groupe.

On peut constater à ce niveau que les deux paramètres roche mère et degré d'altération sont pris en compte simultanément. Le facteur roche mère est étudié de façon purement qualitative. Les auteurs ne s'accordent pas toujours sur l'importance de son rôle en particulier sur la granulomé-

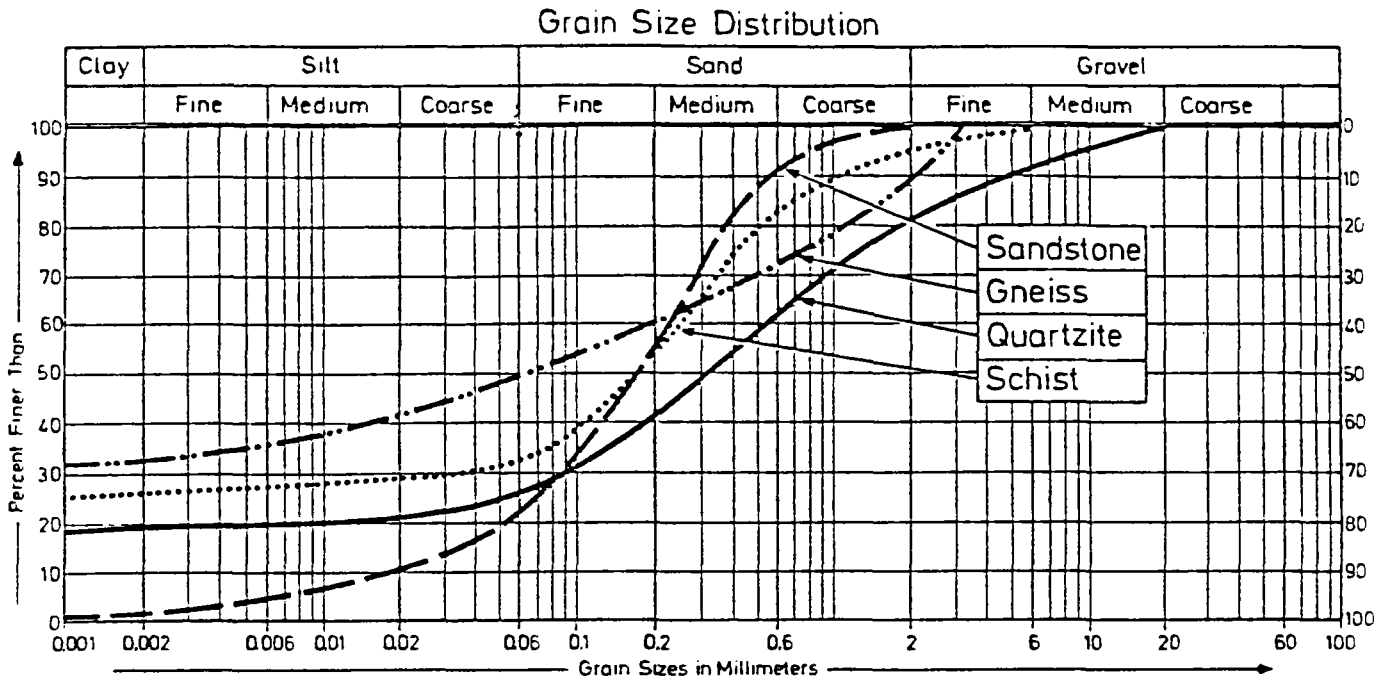


fig12 : courbes granulométriques des sols du Nigeria en fonction de la roche mère

Kahl 1976

	Parent Rock Material				
	Schist	Quartzite	Gneiss	Granite	Sandstone
Moisture content (%)	6.9	12.5	25.4	26.6	7.2
Liquid limit (%)	36.4	40.6	60.2	63.7	26.9
Plastic limit (%)	32.0	31.9	48.5	50.1	21.0
Plasticity index	4.4	8.5	11.7	13.6	5.9
Linear shrinkage (%)	5.0	11.6	14.1	7.3	2.2
Specific gravity (Mg/m ³)	2.69	2.66	2.71	2.69	2.64
Water absorption (%)	51.7	86.8	73.3	103	48.3
Cohesion (kg/cm ²)	0.4	0.2	0.4	0.25	0.1
Angle of friction (°)	25	27	31	28.5	27
SiO ₂ (%)	48.09	68.52	67.42	53.91	63.97
Fe ₂ O ₃ (%)	24.31	8.01	10.22	11.30	7.58
Al ₂ O ₃ (%)	27.44	22.79	9.6	23.04	29.88

tab12 : caractéristiques géotechniques des sols du Nigeria

Kahl 1976

118

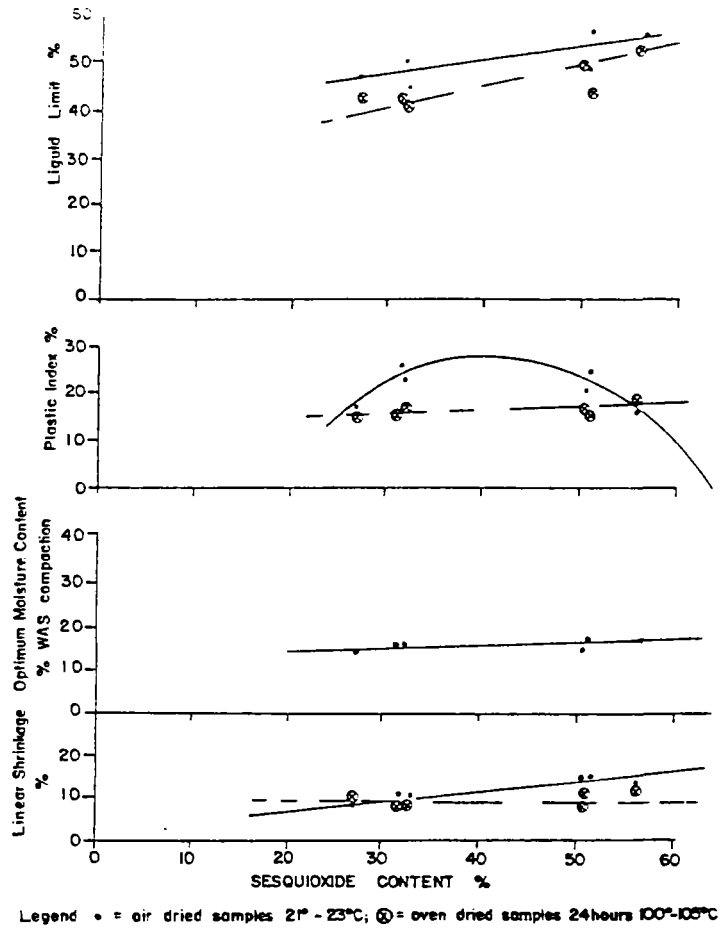


fig13 : relation entre les caracteristiques geotechniques
et la teneur en sesquioxides

Maclu 1977

trie (comparaison des résultats obtenus par KAHL et MADU).

Le rôle de la teneur en sesquioxydes, donc le degré d'altération, est en revanche étudié de façon quantitative et corrélé aux caractéristiques géotechniques.

3.2 Les vertisols

Les vertisols du Nigéria, développés sur des formations sédimentaires récentes, ont un mauvais comportement géotechnique. Les caractéristiques mécaniques sont faibles (cf résultats obtenus par OLA 1978, LYON). Un mélange de chaux et de ciment permet une amélioration de ces caractéristiques. La chaux diminue le gonflement et le ciment permet une augmentation de la résistance. Une combinaison de 6 % de chaux et 8 % de ciment semble la mieux adaptée pour les sols du Nigéria (cf OLA 1978).

Il faut noter que les résultats proposés par les différents auteurs présentent une grande homogénéité.

4 COTE D'IVOIRE

Les sols ferrallitiques et ferrugineux de Côte d'Ivoire ont été l'objet d'une classification géotechnique spécifique par ATLAN (1974). Cette classification s'appuie essentiellement sur les travaux pédologiques de l'ORSTOM de Côte d'Ivoire.

Le système de constitution des groupes est le suivant :

1) Géotechnique. Classer le sol selon la classification L.P.C, en fonction de sa granulométrie.

2) Géologique. Préciser la roche mère.

3) Pédologique. Préciser la place occupée par l'échantillon dans le profil type ABC. Préciser la nature de l'altération (ferrallitique ou ferrugineuse), le faciès de la couche indurée ou non (tache rouille, carapace tachetée, bariolée).

On peut ainsi définir un échantillon de sol latéritique par 5 qualificatifs :

- sa classification L.P.C. ;
- nature de la roche mère ;
- nature de l'altération ;
- niveau de l'horizon de prélèvement (A , B ou C) ;
- faciès de la couche caractérisé par un ou plusieurs adjectifs pris dans la liste suivante : typique, modal, remanié, induré, appauvri.

On aboutit alors au tableau ci-dessous (Tableau 13).

CLASSIFICATION DES SOLS LATÉRIQUES

Géotechnique	Roche mère	Horizon	Pedologie	Alteration
Graves argileuses	granite schiste	B	modal remanié recouvrement appauvrissement	ferralitique ferrugineuse
Sables limoneux ou argileux	granite	B BC C		ferrugineuse
	continental terminal	B		ferralitique
Ap	granite schistes	B BC C	modal	ferralitique
			indurée	ferrugineuse
At	granite	B BC C	modal	ferralitique ferrugineuse
			indurée	
Limon Lt Limon Lp		BC C	modal indurée	ferralitique ferrugineuse

tab:13 : classification des sols lateritiques de Cote d'Ivoire
 Atlan 1974

Cette classification pour être opérationnelle devrait comporter pour chacune des classes une fourchette des valeurs des propriétés géotechniques essentielles et les corrélations existantes à l'intérieur de chaque groupe entre les paramètres géotechniques. Il faudrait en plus prouver par des testes statistiques que les critères de classification sont tous significatifs. Ceci n'a été fait que de manière qualitative : tous les groupes ne sont pas également étudiés, et les résultats présentés ne sont que des moyennes ne permettant pas une analyse statistique (tableau 14). Comme l'écrit l'auteur, ces travaux ne sont donc qu'une première approche méritant d'être confirmée par un programme expérimental important.

CBR des argiles latéritiques de C.I

:	:	:	:
:	Classification LPC	:	Ap
:	:	:	At
:	:	:	:
:	Roche mère	:	Granite
:	:	:	20 à 50
:	:	:	10 à 30
:	:	:	:
:	:	:	Schiste
:	:	:	8 à 20
:	:	:	8 à 12
:	:	:	:

Tableau n° 14

Les graveleux latéritiques, matériaux d'une grande importance économique, puisqu'ils sont utilisés pour la construction des couches de chaussée, ont fait l'objet en 1977 d'une étude portant sur plus de 300 emprunts (MENIN 1980).

Les résultats obtenus confirment la classification de ce matériau en trois classes géotechniques mais ne semblent pas avoir pu permettre une distinction à partir de la roche mère ou des zones climatiques (tableau 15).

Critères et paramètres de classification		Désignation des classes		
		G 1	G 2	G 3
Critère absolu	: Indice de plasticité : IP :	5 - 15	15 - 25	25 - 35
	: Teneur en fines : < 0,08 mm : f % :	5 - 15	15 - 25	25 - 35
Paramètres associés	: Produit F x IP :	50 - 250	250 - 600	500 - 1000
	: Limite de liquidité : WL :	15 - 40	25 - 60	40 - 70
	: Indice CBR à 95 % OPM : après 96 h d'imbibition :	30 - 80	20 - 50	15 - 40
	: Densité sèche max. OPM : γ_d max T/m ³ :	2,10 - 2,50	2,00 - 2,25	1,90 - 2,20
	: Teneur en eau optimale : W _{opm} % :	5 - 8	7 - 10	8 - 12

Tableau 15

5 SENEGAL

ATLAN et FELLER C (1980) ont publié pour les sols fins du Sénégal une étude des relations entre caractéristiques pédologiques et caractéristiques géotechniques.

Les principaux résultats montrent que pour ces sols :

- il existe une bonne corrélation entre teneur en eau à pF 2,5 et indice de plasticité.

- la présence de montmorillonite même en faible quantité implique une très nette diminution des propriétés géotechniques. La présence de montmorillonite, est par ailleurs prévisible au moyen de considérations pédogénétiques. Ceci a conduit les auteurs à proposer un système de passage

de la classification pédologique à une classification géotechnique qui est le suivant :

- Premier niveau : les unités cartographiques pédologiques seront d'abord isolées ou regroupées en fonction de la présence ou de l'absence de montmorillonite dans les sols. La lecture de la carte pédologique se fait alors essentiellement au niveau de la famille de sols.

Exemple du Sénégal :

On pourra regrouper en :

A - unité géotechnique "sans argile gonflante" tous les sols développés sur des matériaux à texture variable mais à pôle minéralogique "kaolinite-illite".

- les sols sur matériaux sableux dunaires
 - . sols bruns subarides
 - . sols brun-rouge subarides
 - . sols ferrugineux tropicaux peu lessivés.

- les sols sur matériaux issus des grès argileux du Continental terminal ou du Maestrichtien

- . sols peu évoluées d'apport
- . sols ferrugineux tropicaux lessivés
- . sols faiblement ferrallitiques
- . sols hydromorphes.

B - unité géotechnique "à argiles gonflantes"

- les sols sur matériaux alluviaux du Walo et du Fonde de la vallée du Sénégal :

- . sols peu évolués
- . vertisols
- . sols hydromorphes

- les sols sur niveaux calcaires ou marno-calcaire à faible profondeur (région de Dakar, Thiès et Matam) ou sur roches volcaniques (régions de Dakar)

- . sols carbonatés
- . vertisols
- . sols bruns eutrophes
- . sols isohumiques plus ou moins vertiques

- les sols alluviaux ou non sur matériaux issus des altérations du socle primaire du Sénégal oriental (altérations de schistes, pélites, grès feldspathiques, roches éruptives) conduisant à la néoformation d'argiles de type motmorillonite.

- . sols peu évolués d'apport (modaux, vertiques, alcalises)
- . vertisols
- . sols bruns eutrophes
- . sols hydromorphes
- . sols sodiques.

- Deuxième niveau : dans les unités géotechniques "sans argile gonflante" définies au niveau 1, des sous-unités pourront alors être retenues en fonction de la texture du matériau (sableuse, sablo-argileuse, argilo-sableuse, argileuse).

CHAPITRE IV

CONCLUSION

- 1 - Les conditions de genèse des sols sont considérées par la plupart des auteurs comme intervenant de façon fondamentale dans leurs propriétés géotechniques.
- 2 - L'application pratique de cette constatation est rendue difficile par :
 - les différences de conception et de méthode entre pédologie et géotechnique .
 - les problèmes de vocabulaire liés à l'existence de plusieurs classifications pédologiques différentes et à l'utilisation de vocables ayant pris des sens différents au cours de l'histoire.
- 3 - En conséquence si de nombreuses études ont lié caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des argiles aux propriétés géotechniques et à leur mesure, aucune classification des sols tropicaux utilisant les données pédologiques de façon satisfaisante n'a été publiée. Il y a là, à notre avis, des progrès à faire. Le travail à entreprendre devrait être essentiellement appliqué. Il aurait pour but de traduire en termes de géotechnique les groupements pédologiques pour une région ou un pays donné en mettant en évidence les distinctions pédologiques n'ayant pas d'intérêt géotechnique et réciproquement les données considérées par la pédologie comme peu importantes mais par contre intéressantes le géotechnicien.

Des notions parfois négligées comme la variation du matériau d'un profil en fonction de la profondeur, l'importance de la station (Situation topographique , drainage, roche mère) seraient soulignées.

Seuls les paramètres faciles à mesurer ou à observer seraient retenus. Cette approche a déjà été ébauchée au Sénégal. Il resterait à la compléter et c'est ce que nous nous proposons de faire au cours de la deuxième phase de cette étude.

4 - A plus long terme, il serait intéressant:

4.1 - De réaliser une étude analogue à celle en cours du Sénégal, mais dans un pays de l'Afrique tropicale humide.

4.2 - De rédiger un manuel, à l'intention des ingénieurs géotechniciens, ayant pour objet de donner les explications et les recommandations utiles pour l'interprétation en terme de géotechniques des données pédologique.

B I B L I O G R A P H I E

- AGENCE DE COOPERATION CULTURELLE ET TECHNIQUE (1978) - Vocabulaire de l'environnement pédologique tropical - Paris 81 p.
- ALEXANDER, L.T. et CADY, J.G (1962) - Genesis and hardening of laterite in soils - US Dept Agriculture Tech. Bull 1282 - Washington DC.
- ATLAN Y., FELLER C (1980)- Application de la pédologie à la caractérisation géotechnique de quelques sols fins du Sénégal. Congrès International de géologie. Paris, Juillet 1980.
- ATLAN Y. (1974) - Classification géotechnique routière des sols latéritiques de Côte d'Ivoire - Revue générale des routes n° 476.
- AUTRET P. (1980) - Contribution à l'étude des graveleux latéritiques traités au ciment. Thèse LCPC - PARIS.
- BCEOM - CEBTP (1975) - Manuel sur les routes dans les zones tropicales et désertiques. Tome 2. Etudes et construction. République Française - Ministère de la Coopération.
- COMBEAU A. (1964) - Remarques sur les facteurs de variation des limites d'ATTERBERG. Cahier ORSTOM (1964) vol II fas 4 29-40.
- DUCHAUFOUR PH, (1977) - Pédologie. 1. Pedogenese et classification - MASSON PARIS.
- GIDIGASU M.D et ANDOH M.B (1980) - Broad regional evaluation of expansive soil conditions for shallow foundations in GHANA. Seventh Regional conference for Africa on soil mechanics and Foundation engineering - ACCRA, June 1980.
- GIDIGASU M.D (1980) - Variability of geotechnical properties of subgrade soils in a residual profile over phyllite. Seventh Regional conference for Africa on soil mechanics and Foundation Engineering - ACCRA, June 1980.
- GIDIGASU M.D (1972) - Mode of formation and geotechnical characteristics of laterite materials of GHANA in relation to soil forming factors. Eng Geology, 6 1972 p. 79.
- GIDIGASU M.D (1971) - The importance of soil genesis in the engineering classification of GHANA soils. Eng Geology, 5 (1971) 117-161.
- HALLAIRE M. (1953) - Diffusion capillaire de l'eau dans le sol, Ann. Agr. Mars, Avril 1953 p. 143-244.
- IAEG COMMISSION "ENGINEERING GEOLOGICAL MAPPING" (1979) - Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. IAEG bulletin 1979 n° 19 364-371. KREFELD.

- KAHL R.W (1976) - Lateritic soils in environmental management in Nigeria. Bulletin Association Int. de Géologie de l'Ingenieurⁿ 14 47-53 Krefeld.
- LAL R. (1978) - Physical properties and moisture retention characteristics of some Nigerian soils.
- LA ROSA D. (1978) - Relation of several pedological characteristics to engineering qualities of soil. Journal of soil science, 1979, 793-799.
- LEONARDS G.A. (1962) - Foundation Engineering. Mc Graw Hill - New York.
- LEPRUN J.C (1979) - Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche. Thèse 1979 Inst. de Géol. STRASBOURG.
- LITTLE A.L (1969) - The Engineering classification of residual tropical soils. Seventh Int. Conf. on soil Mechanics and Foundation Eng. Proc. Mexico City VI p. 1-10.
- LOHNES et AL. (1975) - Relation ship of mineralogy to soil strenght in severely weathered tropical soils. Abst of 1975 - Annual meeting geol. soc. of America vol 7 number 7. Sept. 1975 BOULDER - COLORADO.
- LOHNES, RA et TUNLER, (1976) Proposed engineering classification of lateritic soils. Abst of 1976 annual Meeting of geol. Soc. of America vol 8, Number 6 Sept 76 BOULDER. COLORADO.
- LOHNES R.A, FISH R.O, DEMIREL T. (1971) - Geotechnical properties of selected Puerto Rican Soils in relation to climate and Parent rock. Geol. Soc of America Bulletin 1971-82 2617-2624.
- MADU R.M (1977) - An investigation into the geotechnical properties of some laterites of Eastern Nigeria. Eng. Geology, 11 (1977) : 101-125.
- MAIGNIEN R. (1965) - Carte pédologique du Sénégal au 1/1000 000. ORSTOM (1965) DAKAR-HANN.
- MAIGNIEN R. (1966) - Compte rendu de recherche sur les latérites UNESCO.
- MENIN M. (1981) - Comportement mécanique d'une couche de base en graveleux latéritique améliorés au ciment. Cas des routes de Côte d'Ivoire. Thèse Ecole Nationale des Ponts et Chaussée. Paris.
- MICHALSKI E.R et TEYSSONNIERES M. (1977) - Etude géotechnique des sols tropicaux. Rapport BRGM 77 SGN 099 GTL.
- MORIN W.J, TODOR P.C (1976) - Laterite and lateritic soils and other problem soils of the tropics. 1976 AID/CSD 3682.
- MEYER M.P (1967) - Comparaison of engineering properties of selected temperate and tropical surface soils. Geol. soc. America. Abs 1967, Spec. Paper 115, p148.

- NOGAMI J.S, VILLIBOR D.F - Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. Bulletin Ass. Int. Geologie de l'Ingénieur n° 19 196-199.
- OLA S.A (1980) - Mechanical properties of concretionary laterites from rain forest and savannah zones of Nigéria. Bulletin Ass. Int. Geol. Ing. n° 21, 21-26 KREFELD 1980.
- OLA S.A (1980) - Mineralogical properties of some Nigerian residual soils in relation with building problems. Eng. Geology, 15 (1980) 1-13.
- OLA S.A (1978) - The geology and geotechnical properties of the black cotton soils of northeastern Nigeria. Eng. Geology 12 (1978) 375-391.
- ORSTOM (1972) - Le milieu naturel de Côte d'Ivoire. ABIDJAN (1972).
- PELTIER (1965) - Manuel du laboratoire routier. Ed. DUNOD. PARIS.
- REMILLON A. (1967) - Les recherches routières entreprises en Afrique d'expression française. Annales I.T.B.T.P. n° 231-232.
- SKEMPTON A.W (1953) - The colloidal activity of clays. Third Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng vol. 1 : 57-61.
- TERZAGHI K. (1958) - Design and performance of SASUMVA dam Inst Civil Eng. Proc, v.9 p. 369-395.
- TOWNSEND F.C, MANKE P.G, PARCHER J.V (1971) - The influence of sesquioxides on lateritic soil properties. Highway Res. Rec n° 374, 80-92.
- WINTERKORN, H.F et CHANDRASHEKHARAN E.C (1951) - Laterite soil and their stabilization. Highway Research Board Bull. 44, p. 10-29.