

**EXPRESSION PAR MÉTHODE NORMATIVE DE L'INCIDENCE DES PHÉNOMÈNES
LIÉS AU PROCESSUS D'ALTÉRATION SUR LES PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES
DES LATÉRITES DE LA RÉGION DE YAOUNDÉ**

G.E. EKODECK*

Résumé

L'auteur par cette note présente les résultats d'un test supplémentaire de validation de la méthode normative de caractérisation des produits d'altération.

En dépit du grand nombre de travaux effectués à travers le monde dans les domaines de la Géologie et de la Géotechnique des latérites, les liens pressentis n'ont apparemment jamais pu être rationnellement établis entre les caractères génétiques et les propriétés géotechniques de ces matériaux.

Après avoir sélectionné les phénomènes qui doivent être prioritairement pris en considération dans l'interprétation de la composition et du comportement des latérites, et en l'occurrence la lixiviation et le cuirassement, l'auteur présente les résultats de quelques essais de corrélations qui permettent d'en-trevoir, malgré le caractère parfois limité sur le plan numérique des essais effectués, les possibilités d'une quantification normative de l'évolution physique et mécanique des latérites.

Mots clés : Cameroun - latérites - minéralogie - géochimie - restructuration - lixiviation - cuirassement - propriétés physiques - propriétés mécaniques - corrélations.

* Chef du Service Recherche IRGM B.P. 4110 Yaoundé (Cameroun)

INTRODUCTION

La méthode de restructuration normative des produits d'altération a été conçue et élaborée (EKODECK, 1984) à la suite de la lecture des écrits de nombreux auteurs parmi lesquels deux principaux, à savoir : MAIGNIEN (1966) et surtout KAHL (1976).

Pour le premier, après un tour d'horizon des principaux systèmes de classification des latérites en usage dans les années 1960, le constat est que malgré la grande diversité des facteurs pris en considération et des objectifs poursuivis, beaucoup de travail reste à faire car il faudrait "définir des critères simples, facilement observables sur le terrain, correspondant à des propriétés et pédogenèses bien définies qui permettent une discrimination objective des latérites".

Pour le second dont les travaux étaient axés vers la recherche des rapports entre les caractères génétiques et les propriétés géotechniques des latérites, "les termes essentiellement descriptifs de sol ferrugineux, sol ferrallitique et ferrisol ne revêtent aucune signification en géotechnique... De même le rapport silice - sesquioxydes qui servait de base pour la classification des sols résiduels, en mesurant à quel point un sol avait été latéritisé (rapport inférieur à 1,33 : latérites vraies ; compris entre 1,33 et 2 : sols latéritiques, et supérieur à 2,0 : sols tropicaux altérés non latéritiques) ne convient pas en géotechnique. Pour la même raison, aucun des multiples systèmes de classification indiqués au symposium de l'UNESCO (MAIGNIEN 1966), où ils sont décrits comme le système anglais, le système australien, le système des USA, le système belge, le système SPI (Service Pédologique Interafricain) et le système de la FAO n'est convenable".

Partant de ces constats et en admettant à priori, avec de nombreux auteurs du reste comme DAPFLES (1959), LUMB (1962), WILLIAMS (1967), DUNCAN (1967), CIDICASU (1974) etc... que le comportement des latérites est lié à l'ampleur de l'action des phénomènes intervenant au cours du processus d'altération, la recherche d'un mode de caractérisation globale, relativement simple, moins subjective et plus adaptée s'est révélé nécessaire. C'est cette recherche qui a conduit à l'élaboration de la méthode normative de caractérisation des produits d'altération (EKODECK 1984) qui a été présentée antérieurement de façon sommaire (cf. thème I.). Une application corrélatrice dans le domaine de la géotechnique a été tentée dans la même foulée, avec comme substrat les latérites de la région de Yaoundé. C'est cette application que nous présentons brièvement ici. Les premiers

résultats auxquels nous sommes parvenus, malgré le caractère très limité, des moyens mis à notre disposition et qui en restreignent la portée peuvent être considérés comme prometteurs.

Dans la suite de cet article, nous ne reviendrons plus sur certains faits et notions présentées antérieurement (cf. thème 1).

I - CARACTERES GEOTECHNIQUES DES ROCHES DE LA REGION DE YAOUNDE ET DE LEURS PRODUITS D'ALTERATION

1° Cas de roches du socle

Les principales roches qui forment le socle de la région de Yaoundé sont les migmatites et les gneiss. Elles ont un poids volumique apparent qui est de l'ordre de $2,65 \text{ gf/cm}^3$; il est en général plus faible pour les migmatites que pour les gneiss. Leur porosité varie entre 0,9 et 8% et augmente avec l'importance de la fissuration.

Sur le plan mécanique, l'examen de leur comportement à l'essai de compression simple par la méthode de DAYRE et al. (1978), qui est fondée sur l'analyse comparée des phases de la courbe contrainte-déformation (serrage - élasticité - plasticité) (fig. 1) montre qu'il s'agit de roches élastiques à élastoplastique, incompressibles (fig 2). Leur rupture, essentiellement fragile, s'effectue en général parallèlement aux plans de foliation lorsque ces derniers sont parallèles à la direction de la compression, ou obliques par rapport à cette direction ; et dans ces différents cas, le plan de rupture se situe dans un des lits phylliteux. Les caractéristiques mécaniques, qui peuvent être déduites de ces essais sont la résistance à la compression simple qui est comprise entre 45 et 95 MPa, et le Module d'YOUNG, compris entre 75.10^3 et 130.10^3 MPa. Les différences de composition minéralogique ne semblent pas induire nécessairement des différences notoires de comportement ou de performance.

2° Cas des produits d'altération

a) Propriétés physiques

Granulométrie

En raison de l'intervention parfois importante de la fraction graveleuse dans la composition des produits d'altération, et notamment ceux des niveaux médian et parfois inférieur des profils d'altération, et compte tenu des phénomènes générateurs de ces matériaux (fragmentation et désagrégation de la roche mère, hydrolyse des silicates, néogenèse minérale, cuirassement), la confection d'un modèle de diagramme triangulaire de classification nominale nous a paru nécessaire (EKODECK 1984, 1985). L'utilisation de ce diagramme fait ressortir les faits suivants à partir d'une centaine d'échantillons analysés :

- Sur le plateau du Sud Cameroun, le niveau inférieur est constitué de sables argilo-limoneux, le niveau médian, de graviers argileux, et le niveau superficiel d'argiles sableuses.

- En bordure de la Sanaga, les produits d'altération sont essentiellement sableux, quel que soit le niveau considéré (sables pour le niveau inférieur, sable graveleux pour le niveau médian, sables argilo-limoneux pour le niveau superficiel).

Ces indications sont moyennes et, comme on peut le voir sur les diagrammes (fig. 3), les niveaux des profils d'altération comportent des matériaux bien différenciés sur le plateau, et assez peu différenciés en bordure de la Sanaga. Si ces données moyennes permettent de bien marquer la différence entre le plateau et la bordure de la Sanaga, il reste concevable, compte tenu de la dispersion des points sur les diagrammes et de la situation géographique des matériaux testés, qu'une évolution progressive existe qui rend les deux sites complémentaires. Ceci permet par la suite de considérer les matériaux prélevés dans ces sites, non plus séparément, mais globalement, si nous voulons tirer des enseignements utiles; les seules discriminations concernent les niveaux des profils.

. Quelques autres propriétés physiques

L'examen des valeurs moyennes des poids volumiques et de la compacité montre que celles des matériaux du niveau médian sont plus élevées que celles des matériaux du niveau superficiel, qui à leur tour le sont plus que celles des matériaux du niveau inférieur.

. Poids volumique des grains - poids volumique sec - compacité

niveau superficiel =====	2,65 gf/cm ³	. 1,54 gf/cm ³	. 0,58
niveau médian =====	2,78 gf/cm ³	. 1,76 gf/cm ³	. 0,63
niveau inférieur =====	2,61 gf/cm ³	. 1,45 gf/cm ³	. 0,56

Les faits ainsi observés sont vraisemblablement dus à l'intervention du fer dans le niveau médian et à la soustraction généralisée, sans remaniement de texture qui prend place dans le niveau inférieur.

Si on considère les limites d'ATTERBERG ainsi que l'indice de plasticité, leurs valeurs sont plus élevées pour des matériaux du niveau médian, moins sensible à l'eau, et plus faible pour ceux du niveau de surface plus sensible à l'eau.

. Limite de plasticité - limite de liquidité - Indice de plasticité

niveau superficiel =====	25,0 %	49,4 %	24,4 %
niveau médian =====	32,3 %	64,4 %	32,1 %
niveau inférieur =====	30,0 %	58,7 %	28,7 %

Enfin, l'évaluation de l'indice de groupe (5 pour le niveau inférieur, 1 pour le médian et 11 pour celui de surface)

montre que dans les constructions routières, seules les performances des produits du niveau médian sont bonnes, celles des produits des niveaux inférieur et superficiel étant respectivement mauvaises et très mauvaises.

Toutes ces propriétés physiques, plus différenciées sur le plateau qu'en bordure de la Sanaga suivant les niveaux des profils d'altération sont à des degrés divers, de bons indicateurs directs ou indirects, du degré d'évolution texturale des matériaux, qui est en rapport avec le processus d'altération des roches.

b) Comportement mécanique

Nous nous limiterons à l'examen du comportement d'une centaine d'éprouvettes, soumises à l'essai de cisaillement rectiligne, par la méthode de DAYRE et al. (1978) (fig.2). D'autres types d'essais ont cependant été effectués mais de façon moins extensive (essais triaxiaux et essais oedométriques).

- Les matériaux du niveau superficiel sont élasto-compressibles donc fragiles lorsqu'ils sont secs. A mesure que la teneur en eau augmente, ils deviennent successivement élasto-plasto-compressibles, purement plastiques, plasto-compressibles puis purement compressibles lorsque la saturation est atteinte, voire dépassée : ils sont extrêmement sensibles à l'eau et leur comportement est celui d'une argile.

- Les matériaux du niveau médian sont élastoplastiques non compressibles lorsqu'ils sont secs. Ce comportement se rapproche de celui de certaines roches saines. Ils deviennent purement plastiques lorsqu'ils sont lubrifiés par l'eau, et la saturation modifie peu leur comportement.

- Les matériaux du niveau inférieur sont essentiellement plastiques quelle que soit leur teneur en eau, certains échantillons secs présentant un comportement élastique fragile : c'est un comportement de sable argileux.

c) Propriétés mécaniques

Il résulte de l'analyse du comportement mécanique des latérites que l'influence de l'eau est déterminante dans le cas des matériaux du niveau superficiel, et moins importante dans le cas de ceux des autres niveaux et en particulier ceux du niveau médian. En essayant de tenir compte des conditions hydriques malgré le nombre limité des essais effectués, on a pu remarquer quelques faits saillants.

- La cohésion apparente diminue, dans les profils, du niveau de surface vers le niveau inférieur sur le plateau où elle semble dépendre de la teneur en eau. On y observe d'ailleurs généralement une destruction des talus des tranchées qui commence par la formation de sortes de hors-profils, ou d'abris sous cuirasse qui affectent le niveau inférieur. En bordure de la Sanaga par contre, la cohésion apparente diminue du niveau inférieur vers le niveau de surface, et les talus des tranchées routières et ferroviaires ont une meilleure tenue. Cette cohésion diminue aussi lorsqu'augmente la teneur en eau.

- L'angle de frottement interne est fortement influencé par l'eau autant sur le plateau qu'en bordure de la Sanaga. On remarque par ailleurs, en considérant les profils individuellement que cet angle est plus élevé pour les matériaux du niveau médian, plus faible pour ceux du niveau superficiel sur le plateau et pour ceux du niveau inférieur en bordure de la Sanaga.

On peut dire en guise de résumé sur les caractères géotechniques des produits d'altération de la région de Yaoundé, que les différenciations texturales telles qu'elles sont exprimées par l'analyse granulométrique, ont des repercussions manifestes sur le plan du comportement mécanique qui, sableux au départ (niveau inférieur), devient de plus en plus argileux à mesure que s'hydrolysent les silicates. Le niveau médian présente un caractère particulier car il a tendance à devenir plus élastique en raison de son enrichissement en fer. Ces différences de comportement sont encore plus éloquentes que les propriétés mécaniques qui peuvent en être déduites, et pour la plupart de ces particularités géotechniques, des essais de corrélation ont été effectués avec la quantification normative.

II - ESSAIS DE QUANTIFICATION NORMATIVE DE L'EVOLUTION PHYSIQUE ET MECANIQUE DES LATERITES DE LA REGION DE YAOUNDE

1° Altération et propriétés physiques

Parmi les paramètres définis à la suite des restructurations normatives (cf. thème I), ceux susceptibles de mieux traduire l'évolution des propriétés physiques des produits d'altération de la région de Yaoundé où le drainage est bon sont : l'indice de lixiviation potentielle (ilp) ou degré d'altération virtuelle pour les niveaux inférieur et superficiel, et l'indice d'induration potentielle (iip) ou degré de cuirassement virtuel pour le niveau médian. De ce point de vue, et eu égard aux données dont nous disposons, nous avons pu établir quelques relations plausibles en considérant globalement tous les produits d'altération de la région de Yaoundé.

- Pour le niveau inférieur, lorsque l'indice de lixiviation potentielle augmente, la compacité diminue et l'indice des vides augmente.

$$c = - 0,1 \frac{\text{ilp} \%}{100} + 0,6$$

$$e = 0,4 \frac{\text{ilp} \%}{100} + 0,6$$

Ces relations viennent appuyer la méthode isovolumétrique de MILLOT et BONIFAS (1955).

- Pour le niveau superficiel, lorsque l'indice de lixiviation potentielle augmente, la teneur en argile, la limite de liquidité et l'indice de plasticité augmentent aussi.

$$a \% = 0,5 \text{ ilp \%} + 21,2$$

$$w_L \% = 0,4 \text{ ilp \%} + 28,7$$

$$IP\% = 0,2 \text{ ilp \%} + 13,2$$

L'absence de corrélation entre cet indice normatif et les propriétés comme la compacité ou l'indice des vides montre que le niveau superficiel est le siège de nombreux remaniements mécaniques.

- Pour le niveau médian, lorsque l'indice d'induration potentielle augmente, le poids volumique sec et la compacité augmente, alors que diminue l'indice des vides.

$$\gamma_d = 0,5 \frac{\text{ilp \%}}{100} + 1,6 \text{ (gf/cm)}$$

$$c = 0,2 \frac{\text{ilp \%}}{100} + 0,6$$

$$e = -0,5 \frac{\text{ilp \%}}{100} + 0,7$$

Ces relations montrent que la trame ferrugineuse qui se forme dans le niveau médian rend le milieu plus dense tout en stabilisant le volume. Il en résulte d'ailleurs que le bilan du cuirassement du niveau médian des profils pourrait être effectué par méthode isovolumétrique.

2° Altération et caractères mécaniques

Sur le plan général du comportement mécanique, nous pouvons signaler, en plus de ce qui a été dit antérieurement concernant l'analyse par la méthode de DAYRE et al. (1978) des courbes contrainte-déformation, que pour le niveau inférieur, l'ampleur du serrage est directement lié à l'importance des soustractions de matières, cependant que le comportement, et le mode de rupture (ductile) caractérisent autant pour ce niveau que pour le superficiel la présence des argiles, l'absence de gonflement à l'oedomètre confirmant la nature kaolinique de ces argiles. Pour le niveau médian, la granularité et la rigidité acquise à la faveur de l'enrichissement en fer se manifeste par une phase de serrage réduite et une phase d'élasticité linéaire relativement importante.

La quantification normative vient à l'appui de certaines considérations mécaniques. Ainsi donc :

- pour le niveau superficiel, aucune corrélation significative n'a pu être établie entre l'indice de lixiviation potentielle et les propriétés mécaniques. Cela est vraisemblablement dû au fait que ce niveau, comme nous l'avons dit plus haut, est le siège de nombreux remaniements, naturels et artificiels ;

- pour le niveau inférieur, lorsque l'indice de lixiviation potentielle augmente, la cohésion apparente diminue et l'angle de frottement interne augmente.

$$C_u = - 2,7 \frac{iip \%}{100} + 2,4 \text{ (bars)}$$

$$f_u = 0,15 \text{ iip \%} + 18,4 \text{ (degrés)}$$

Ces deux relations rendent compte du caractère sableux des matériaux de ce niveau.;

- pour le niveau médian, lorsque l'indice d'induration potentielle augmente, l'angle de frottement interne diminue. La réduction de ce frottement interne est vraisemblablement induite par la sphéricité qu'acquière les concrétions :

$$f_u = -0,3 \text{ iipf \%} + 68,4 \text{ (degré)}$$

(iipf indice d'induration potentielle due au fer).

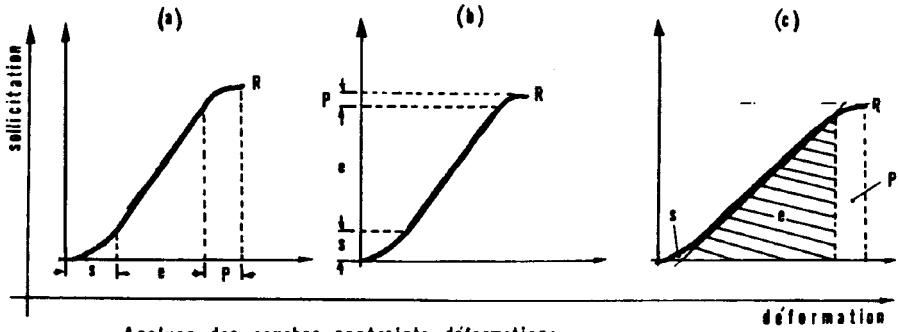
CONCLUSION

La quantification normative dont la méthode a été élaborée pour les produits d'altération, en restant en harmonie avec les données géotechniques, traduit donc bien l'action des phénomènes d'altération. Les relations établies entre les paramètres géochimiques et les propriétés géotechniques l'attestent. Si nous considérons l'indice de lixiviation potentielle par exemple, il est possible de tirer des enseignements utiles sur la texture des matériaux, la différenciation des niveaux des profils, la nature des minéraux argileux prédominants, le comportement prédominant sous charge et la nature des matériaux utilisables dans le Génie civil. Le tableau 1 en donne un aperçu synoptique.

Nos résultats reposent cependant sur un nombre assez limité de données. Les relations qui sont présentées ici sont essentiellement indicatives. C'est pour ces raisons qu'à l'heure actuelle, des travaux sont amorcés dans le cadre des Programmes de recherche de l'IRGM (Institut de Recherches Géologiques et Minières) afin que les tendances que nous avons mises en évidence passent dans le domaine des certitudes, ce qui contribuerait à renforcer la collaboration entre les géologues et les géotechniciens.

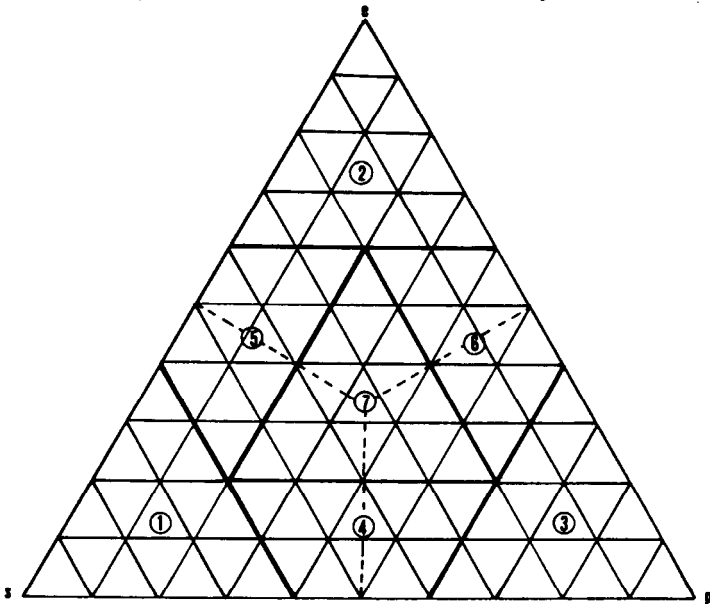
BIBLIOGRAPHIE

- DAPPLES, E.C. (1959) : Basic geology for science on engineering soil form. Proc., Willey, New York, pp 139 - 169
- DAYEE, M., FABRE, D., LETOURNEUR, J., ANTOINE, P., ORENGO, Y. (1978) : Eléments pour une classification géotechnique des terrains. Proc. of the 3rd Int. Congr. I.A.F.G. Sec. II, vol. 2, pp 131 - 139
- DUNCAN, N., (1967) : Discussion on subjective classification of hardness of rocks and associated shear strength. Proc. Reg. Conf. Afr. Soil. Mech. Found. Eng. ; 4th Cape Town, n° 2.
- EKODECK, G.E., (1984) : L'altération des roches métamorphiques du Sud Cameroun et ses aspects géotechniques. Th. Doc. d'Etat Sci. Nat. Univ. Grenoble I, 368 p.
- EKODECK, G.E., (1985) : Un mode de classification rationnelle des produits des séquences d'altération des roches sur la base granulométrique. Revue du Labogénie - Yaoundé, n° 14 pp 13 - 23.
- GIDIGASU, M.D., (1974) The degree of weathering in the identification of laterite material for engineering purposes. Eng. Geol. vol. 8, n° 3, pp 213 - 266.
- KAHL, R.W., (1976) : Laterite soils in environmental management in Nigeria Bull. Ass. Int. Geol. Eng. n° 14, pp 47 -53.
- LIUMB, P., (1962) : The properties of decomposed granite. Geotechnique, vol. 12, n° 3, pp. 226 - 243.
- MAIGNIEN R. (1966) : Compte rendu de recherches sur les latérites. Rech. Rés. Nat. IV, UNESCO, Paris, 155 p.
- MILLOT, G., BONIFAS, M., (1955) : Transformations isovolumétriques dans les phénomènes de latéritisation et de bauxitisation. Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr., n° 8, pp 3 - 10.
- WILLIAMS, A.A.B. (1967) : Discussion on subjective classification of the hardness of rocks and the associated shear strength. Proc. Reg. Conf. Afr. Soil Mech. Found. Eng. 4th, Cape Town, n° 2.



Analyse des courbes contrainte-déformation:

s: serrage, e: élasticité, p: plasticité, R: rupture.
évaluation du domaine de serrage d'élasticité et de plasticité en fonction de la déformation (a) de la sollicitation (b) et du travail (c)



Triangle s.e.p de DAYRE et al. (1978) modifié.

- ① serrage (compressibilité), s
- ② élasticité, e
- ③ plasticité, p
- ④ plasto-compressibilité
- ⑤ élasto-compressibilité
- ⑥ élasto-plasticité
- ⑦ élasto-plasto-compressibilité

Fig. 1 : Schématisation des courbes représentatives du comportement et diagramme de classification des éprouvettes suivant leur mode de comportement sous sollicitation mécanique

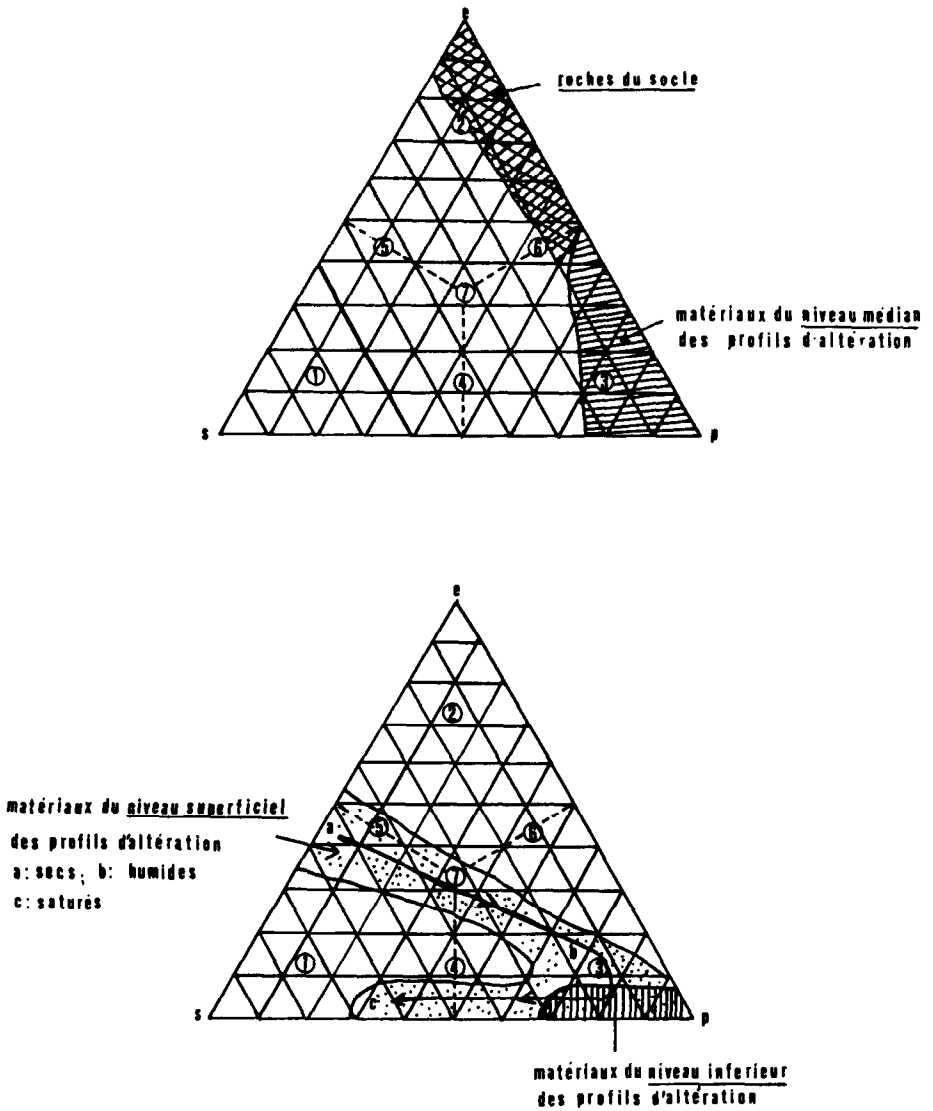


Fig. 2 : Comportement mécanique des roches de la région de Yaoundé et de leurs produits d'altération d'après la méthode de DAYRE et al. (1978)

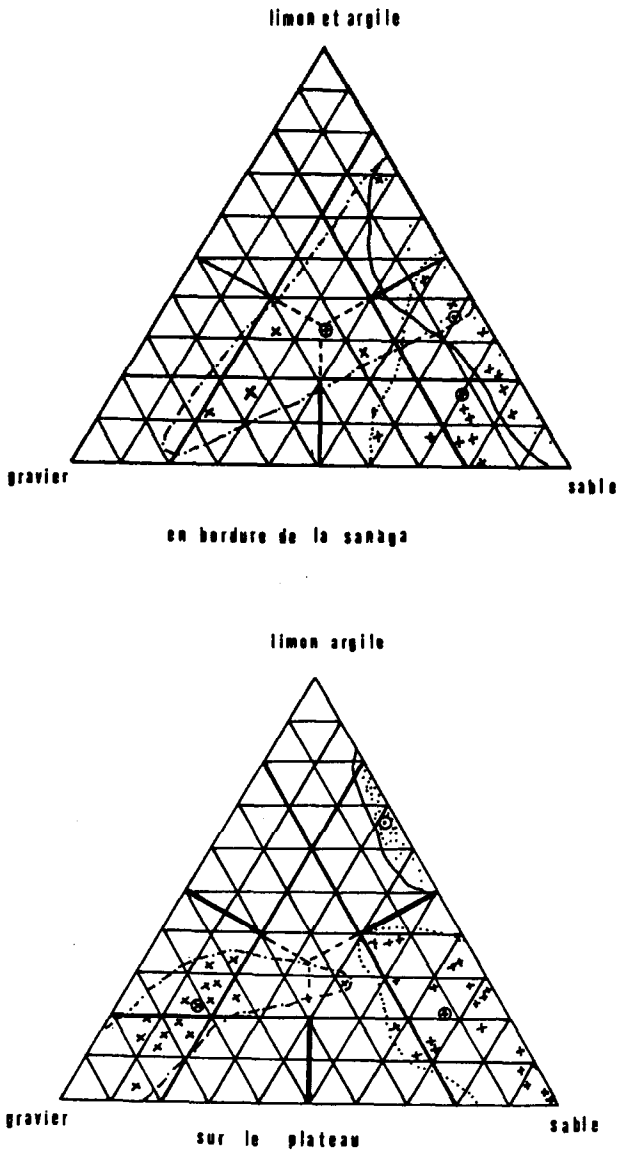


Fig. 3 : Les produits d'altération de la région de Yaoundé dans le diagramme triangulaire de classification granulométrique

- : échantillons du niveau superficiel, — leur circonscription
- × : échantillons du niveau médian ; - - - leur circonscription
- + : échantillons du niveau inférieur ; leur circonscription

indice de lixiviation potentielle (I.L.P)	. 25 .	. 50 .	. 75 .
origine des matériaux	Bordure de la sanaga plateau		
texture des matériaux (niveaux inférieur et superficiel)	rocheuse graveleuse	sableuse	argileuse
niveaux des profils	peu différenciés		bien différenciés
minéraux argileux prédominants	illite		kandites
comportement prédominant sous charge	élastique fragile		plastique compressible
phase de plasticité	inexistante avec rupture brutale	existante avec rupture franche	généralisée, sans rupture franche
matériaux utilisables Génie Civil	tout venant (tous niveaux)	tamisé (tous niveaux)	niveau median seul

Tableau 1 : Indice de lixiviation potentielle des produits d'altération de la région de Yaoundé et les correspondances associées.