

Essai préliminaire de corrélations entre paramètres altérogéniques normatifs et caractéristiques physico-mécaniques des roches et des produits d'altération de la série de Mbalmayo-Bengbis (Sud - Cameroun), à l'usage du génie civil.

ONANA V. L.¹, NDOMÉ EFFOUDOU PRISO E.², KAMGANG KABEYENE BEYALA V.², EKODECK G. E.¹

¹Université de Yaoundé I, Faculté des Sciences, B.P. 812, Yaoundé, Cameroun

²Université de Yaoundé I, Ecole Normale Supérieure, B.P. 8127, Yaoundé, Cameroun

ABSTRACT

The normative alterological reconstruction system, contrary to other methods of genetic characterization of soils, is, according to our present knowledge, the most appropriate method that gives results that are compatible with geotechnical experiments. The interface between fundamental studies and their applications to geotechnics is very less studied and the relevant works that have been carried out on this theme since the mid 80s have led to a very elaborated normative alterology version. This version has been applied to the study of schistose rocks and their weathering materials in the south of Cameroon. Major elements concentrations were determined by X-ray fluorescence (XRF) after sample ignition. FeO concentrations were determined by potassium dichromate titration. Rock sample powders were prepared for inductively coupled plasma-mass spectrometry analyses (ICP-MS) for lithophile trace element concentrations by acid digestion in closed beakers. These chemical analyses were used to determine the alterological parameters. The geotechnical analyses were done in the National Civil Engineering Laboratory of Cameroon (LABOGENIE). The results obtained show good correlations between the alterological parameters of the studied materials and their physical and mechanical characteristics. The chlorite schists and the weathered materials from the lower alteritic and the median nodular horizons are usable in civil engineering works only after mechanical crushing. The surface clayey materials can be used in the production of bricks and roofing tiles. The present study aims at clearly linking the fundamental genetic data of the material studied to a few of their physical and mechanical properties, and to precisely give their use in civil engineering works.

Key words: South Cameroon - Chlorite schists - Laterites - Normative alterological reconstruction system - Geotechnics.

RESUME

La méthode de restructuration altérogénique normative, contrairement aux autres modes de caractérisation génétique des sols, est, à notre connaissance, la plus apte à fournir à l'heure actuelle des résultats compatibles avec l'expérimentation géotechnique. Cette interface entre études fondamentales et applications en géotechnique est très peu étudiée. Ses nombreux développements depuis le milieu des années 80 ont abouti à une version très élaborée. Cette dernière a été appliquée à l'étude des roches schisteuses et à celle des produits dérivés de leur altération dans le sud du Cameroun. Les analyses chimiques des éléments majeurs ont été effectuées par Fluorescence X et par titrimétrie (FeO) et, celles des éléments en traces par ICP-MS, en vue de l'évaluation des paramètres altérogéniques normatifs. Les analyses géotechniques ont été réalisées au Laboratoire National de Génie Civil du Cameroun (LABOGENIE). Les résultats obtenus montrent de bonnes corrélations entre les paramètres altérogéniques des matériaux étudiés et leurs caractères physiques et mécaniques. Les chloritoschistes et les produits d'altération des niveaux inférieurs altéritiques et médians nodulaires sont exploitables dans les travaux du génie civil seulement après concassage. Les matériaux argileux du niveau de surface sont utiles à la fabrication des tuiles et des briques. Le présent travail a pour but de lier clairement les données génétiques fondamentales des matériaux étudiés à quelques unes de leurs propriétés physiques et mécaniques et de préciser l'utilité de ces derniers dans les travaux de Génie.

Mots-clés : Sud Cameroun - Chloritoschistes - Latérites - Restructuration altérogénique normative - Géotechnique.

*Correspondant :

Vincent Laurent ONANA, E-mail :
vincentlaurent_onana@yahoo.com

1. INTRODUCTION

Au cours des quinze dernières années, les techniques et les concepts ont fortement évolué dans le domaine de l'altérologie tropicale. Ce travail met en parallèle les caractères présentés dans les domaines de la géologie (ou de la géochimie) à ceux de la géotechnique dans le but d'établir des rapports de causalité. Des comparaisons sont effectuées entre l'influence des phénomènes liés à l'altération, matérialisés quantitativement par les paramètres normatifs d'une part, et les paramètres physiques et mécaniques d'autre part. Une brève description de la méthode est faite. Ensuite, on analyse le cas des roches du socle, puis, de façon plus détaillée, celui des produits d'altération.

2. CONTEXTE NATUREL DE LA RÉGION D'ÉTUDE

La série de Mbalmayo-Bengbis, grossièrement limitée entre les parallèles 2° et 4° Nord et les méridiens 11° et 16° Est, occupe la partie centrale du Plateau Sud Camerounais (Fig. 1). Mbalmayo (3°20' - 3°35' N ; 11°15' - 11°30' E), Bengbis (3°20' - 3°40' N ; 12°20' - 12°40' E) et Ngoumou (3°30' - 3°45' N ; 11°15' - 11°30' E), sont les trois secteurs étudiés. Le secteur de Mbalmayo-Bengbis est une zone de bas-plateaux d'altitude moyenne 600-700 m à interfluves émoussés (Santoir, 1995). Il présente un modelé de collines largement ondulées à vallées larges ; les versants d'allure générale convexe beaucoup plus adoucie, deviennent

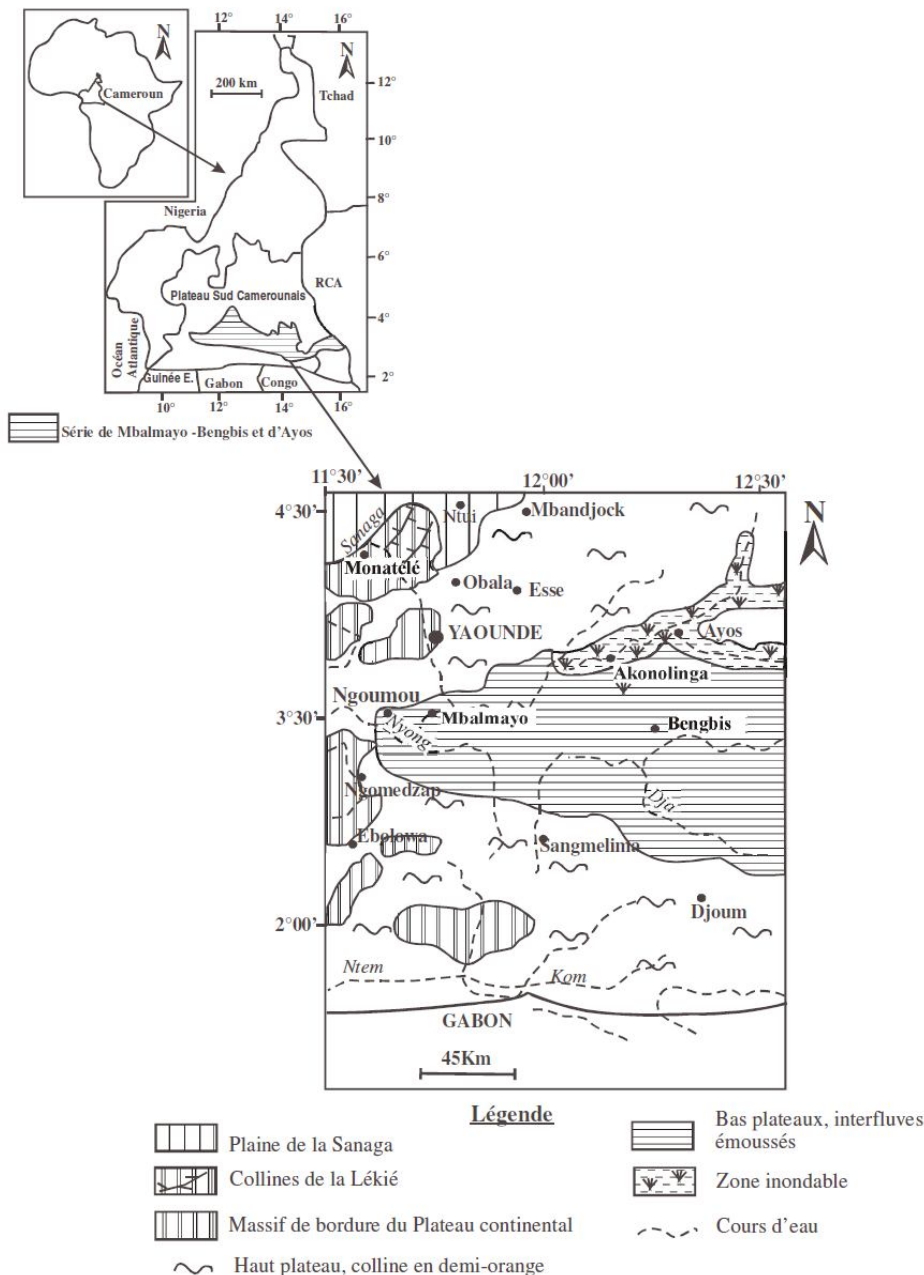


Figure 1: Carte de situation de la série de Mbalmayo-Bengbis

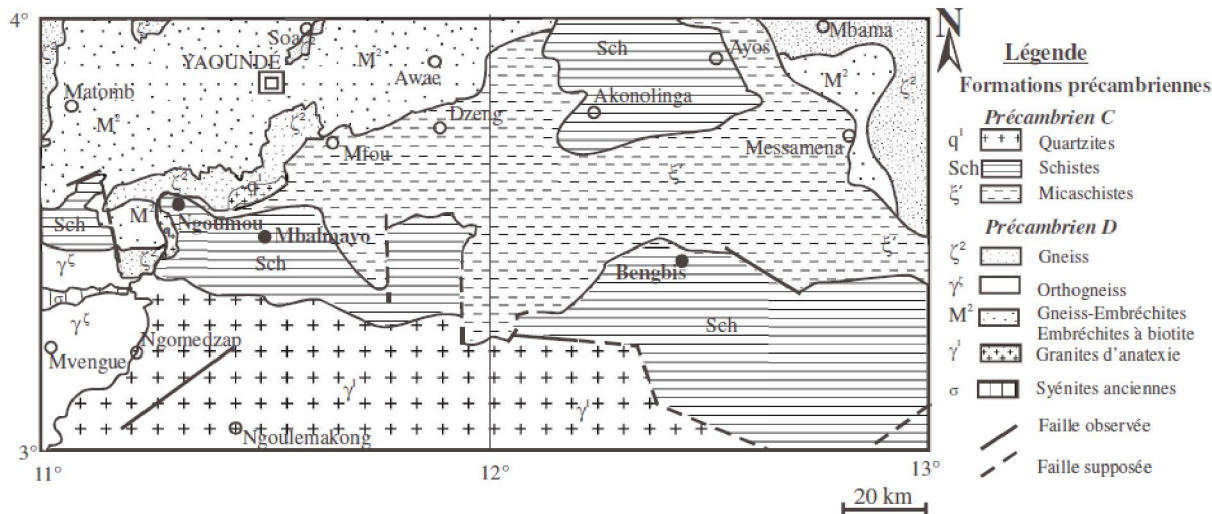


Figure 2: Carte géologique de la région d'étude (D'après Regnoul (1986), modifiée)

concaves au raccordement avec ces vallées (Vallérie, 1995). Le climat actuel y est de type équatorial de transition nuancé des traits océaniques. La végétation est celle du secteur forestier semi caducifolié du grand domaine de la forêt dense humide congo-guinéenne. Située dans la partie Sud de la nappe de Yaoundé, cette série composée de schistes et de tuffs basiques (Fig. 2) rappelle des dépôts en milieu continental de type plateforme ou de type bassin intracontinental (Nédelec et al., 1986). La couverture d'altération dont l'épaisseur varie, suivant les sites, entre 5 et 25 m, montrent de bas en haut les niveaux suivants (Fig. 3) :

- un niveau inférieur d'altération qui présente encore la texture de la roche mère sous jacente ;
- un niveau médian d'accumulation d'oxydes d'hydroxydes de fer ferrique et d'aluminium ;
- un niveau supérieur argileux meuble.

3. MÉTHODES D'ÉTUDE

3.1 Analyses chimiques et géotechniques

Les échantillons de chloritoschistes et ceux prélevés avec ou sans remaniement dans les différents niveaux d'altération ont été l'objet d'analyses chimiques et géotechniques. Les déterminations chimiques globales des éléments majeurs ont été réalisées par fluorescence X, celles des éléments en traces (Cr_2O_3 et NiO) par spectrométrie ICP-MS (Inductively Couple Plasma - Mass Spectrometry) ainsi que le dosage du fer ferreux FeO par titrimétrie aux Geoscience Laboratories (Geo Labs) à Toronto au Canada. Les mesures de divers paramètres physiques (poids volumiques des grains solides des sols et poids volumiques de roches ainsi que leurs densités réelles et apparentes) ont été effectuées au Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et

d'Altérologie du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I. Il en a été de même de l'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie des échantillons de sols. Les essais de détermination des propriétés mécaniques (cisaillement rectiligne) et les essais physiques (limites de consistance) ont été effectués au LABOGENIE et à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé.

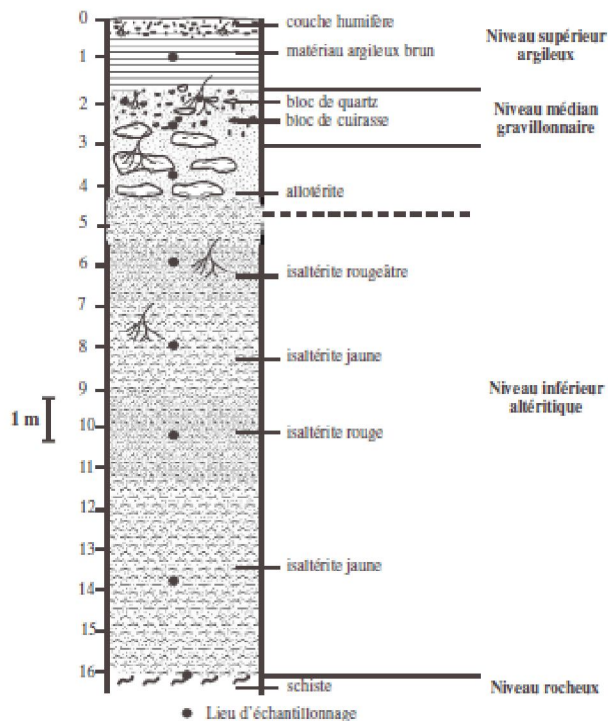


Figure 3: Organisation typique d'un profil d'altération de la série de Mbalmayo-Bengbis

3.2 Présentation de la méthode de restructuration altérologique normative

3.2.1 Objectif, principe et démarche de la méthode

Inspirée dans sa conception de la méthode américaine CIPW (Cross, Iddings, Pearson et Washington) de Cross et al. (1903), la méthode de restructuration altérologique normative (Ekodeck et Kamgang, 2002) part de l'élaboration d'une composition minéralogique virtuelle à partir de la combinaison théorique des molécules de 14 constituants chimiques majeurs. Elle débouche sur la détermination de sept paramètres altérologiques qui permettent des caractérisations ponctuelles, des études évolutives et/ou prospectives de géologie appliquée au Génie civil et même à la recherche minière. Pour une mise en œuvre optimale, les résultats de l'analyse chimique doivent faire apparaître l'eau de constitution, ou, à défaut la perte au feu qui peut y être assimilée. Le fer doit être exprimé sous forme de fer ferrique et de fer ferreux, ses deux formes les plus courantes. Cinq groupes standards regroupant 37 minéraux-étalons sont susceptibles d'apparaître. Ces cinq groupes sont : les minéraux peu ou non altérables non siliciques, les silicates anhydres primaires ou résiduels, les hydrosilicates ou silicates supergènes, les oxyhydroxydes, et la silice. La démarche comporte principalement la caractérisation taxonomique des échantillons sur la base de leur richesse en silice, la reconstitution des silicates et oxyhydroxydes et l'évaluation des paramètres altérologiques.

3.2.2 Paramètres altérologiques

Ces paramètres caractérisent les degrés d'appauvrissement, d'enrichissement et de fermeture du milieu d'altération (Ekodeck et Kamgang, 2002).

3.2.2.1 Paramètres d'appauvrissement du milieu d'altération

Il s'agit de l'indice de lixiviation potentielle ILP et du degré virtuel d'altération de la roche DVAR. Ces deux paramètres se réfèrent à l'ordre d'hydrolyse des silicates primaires et néogénétiques, à la libération des éléments mobiles et aux néogénèses minérales conséquentes. Leurs formules sont les suivantes :

$$\text{ILP} = \text{Ni}/\text{Di} \quad (1)$$

$$\text{Avec Ni} = (\text{Gibb} + \text{Boeh})100 + (\text{Kand})75 + (\text{Sil.al}^\circ\text{Ca-alc})50 + (\text{Sil.al}^\circ\text{FeMg})25 \quad (2)$$

$$\text{Di} = \text{Gibb} + \text{Boeh} + \text{Cor} + \text{Sil} \quad (3)$$

$$\text{D}_{\text{VAR}} = \text{Na}/\text{Da} \quad (4)$$

$$\text{Avec Na} = \text{Ni} + (\text{Si.am})100 \text{ et } \text{Da} = \text{Di} + (\text{Qtz} + \text{Si.am}) \quad (5)$$

Gibb : Gibbsite ; Boeh : Boehmite ; Cor : corindon ; Kand : Kandites ; Sil : Silicates ; Sil.al^o : Silicates

d'altération ; Ca-alc: calcoalcalins ; FeMg : Ferromagnésiens ; Qtz : quartz ; Si.am : Silice amorphe.

Les coefficients de pondération ont à peu près la même signification dans les formules de ces deux paramètres. Sauf que, pour le DVAR, c'est l'ensemble de la roche qui est pris en considération et non plus les silicates seulement comme dans le cas de l'ILP. Ces coefficients de pondération tiennent compte d'un ordre d'apparition des minéraux secondaires conforme à la séquence de Goldich (1938) et à la nomenclature de Pedro et Delmas (1971). Quatre stades théoriques d'évolution expliquent les valeurs attachées aux différents groupes de minéraux de néogénèse.

Stade 1. Les minéraux primaires ferromagnésiens sont tous devenus des hydrosilicates ferromagnésiens : les silicates sont considérés comme altérés à 25 %.

Stade 2. Les minéraux primaires calcoalcalins sont tous devenus des hydrosilicates calcoalcalins : les silicates sont considérés comme altérés à 50 %.

Ces deux premiers stades caractérisent le phénomène de bisiallittisation.

Stade 3. Tous les hydrosilicates, ferromagnésiens et calcoalcalins, ont cédé la place aux kandites : les silicates sont considérés comme altérés à 75 %. Ce stade caractérise la monosiallittisation.

Stade 4. Toutes les kandites ont cédé la place aux hydrates d'aluminium : les silicates sont considérés comme altérés à 100 %. Ce stade caractérise l'allittisation.

3.2.2.2 Paramètres d'enrichissement du milieu d'altération

Ces paramètres expriment l'importance relative des oxyhydroxydes libres d'aluminium IAL et de fer ferrique IFL, ainsi que le degré de cuirassement IIP (indice d'induration potentielle).

$$\text{IAL} = \frac{(\text{Gibb} + \text{Boeh} + \text{Cor})}{\text{Gibb} + \text{Boeh} + \text{Cor} + \text{Goe} + \text{Hem} + \text{Co}} 100 \quad (6)$$

$$\text{IFL} = \frac{(\text{Goe} + \text{Hem})}{\text{Gibb} + \text{Boeh} + \text{Cor} + \text{Goe} + \text{Hem} + \text{Co}} 100 \quad (7)$$

Avec les notations suivantes :

Cor : corindon ; Goe : goethite ; Hem : hématite ;

Co : coefficient de pondération permettant d'éviter les valeurs indéterminées ou infinies à ces paramètres. Ce coefficient s'exprime comme suit :

$$\text{Co} = \%aT - (\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3) \quad (8)$$

%aT : pourcentage analytique total de tous les éléments

majeurs

%Al₂O₃ : teneur initiale en alumine

%Fe₂O₃ : teneur initiale en fer ferrique

Ces deux paramètres complémentaires doivent être évalués ensemble. Ils sont nécessaires à la réalisation et à l'interprétation des diagrammes carrés exploités dans la méthode de restructuration altérologique normative.

$$IIP = \frac{(Ox + Hydrox \text{ Fe}^{3+}, Al^{3+}, Mn^{2+})}{\text{Tous les minéraux}} 100 \quad (9)$$

Ox : Oxydes ; Hydrox : Hydroxydes

3.2.2.3 Paramètre de fermeture du milieu d'altération

L'indice de confinement potentiel ICP ou degré virtuel d'hydromorphie est un paramètre fondé sur le fait que, en milieu fermé, les phyllites de type 2/1/1 et 2/1 se forment préférentiellement. En milieu ouvert, on assiste plutôt à la formation des kandites et des hydroxydes d'aluminium (phyllites 1/1 et 0/1).

$$ICP = \frac{(\text{Silicates} - \text{kandites})}{\text{Gibb} + \text{Cor} + \text{Silicates}} 100 \quad (10)$$

Il convient de noter que les degrés virtuels et indices ainsi définis concernent essentiellement la phase silicatée. Ce sont donc des paramètres absolus. Ils ne s'appliquent à l'ensemble de la roche que lorsque le rapport altérologique est égal à 100. Ils sont alors dits paramètres relatifs.

Le rapport altérologique ra est donné par la formule :

$$ra = \frac{(\%aT - \%Tr)}{\%aT} 100 \quad (11)$$

%aT : pourcentage analytique total de tous les éléments majeurs

%Tr : pourcentage total résiduel (éléments non utilisés dans les reconstitutions minérales)

Ce rapport multiplié par le paramètre absolu donne la valeur du paramètre relatif.

Les différents paramètres ainsi présentés permettent de mettre en évidence quantitativement les principales caractéristiques des roches étudiées du point de vue de l'altération supergène. Plus précisément, ils permettent :

- de préciser la classe normative de la roche étudiée,
- de connaître la prédominance relative des oxyhydroxydes libres d'aluminium ou de fer ferrique pouvant indurer un matériau,

- d'avoir une claire vision, non seulement du degré de transformation des silicates primaires en minéraux d'altération, mais aussi du degré de fermeture et/ou d'ouverture du système.

4. RÉSULTATS

4.1 Restructuration altérologique normative et propriétés physiques des roches de la série de Mbalmayo-Bengbis

Quelques données chimiques (Tab. 1) et certaines valeurs des paramètres géotechniques des roches et matériaux d'altération exploitées (Tab. 2) proviennent en partie des travaux d'Ekodeck (1984, 1990, 1994), Ekodeck et Kabeyene Beyala Kamgang (2002) et Onana (2002).

4.1.1 Cas des roches du socle

Les chloritoschistes constituent le faciès lithologique le plus répandu dans les secteurs de Mbalmayo et de Bengbis. Sur le plan de la composition minéralogique, les différences entre les faciès schisteux de Mbalmayo et Bengbis sont infimes et n'induisent donc pas de variations notables de comportements mécaniques. L'incidence de la géologie sur les performances mécaniques des schistes, comme l'a démontré de long en large Ekodeck (1984), se manifeste lorsqu'on considère l'orientation des efforts de compression par rapport au litage métamorphique ou par rapport à celle des plans de fracturation. Les schistes ont des résistances aux efforts de compression moins élevées que celles des autres faciès lithologiques de la nappe de Yaoundé (Ekodeck, 1984 ; Tangouenta, 1986). Cette faible résistance à la compression est due à l'abondance des minéraux phylliteux. Les chloritoschistes du secteur de Mbalmayo sont des roches très dures (LA > 30 %). Malheureusement, l'absence de données à Bengbis ne permet pas d'étudier les formations de ce secteur. Les profils latéritiques à Mbalmayo sont moins épais que ceux rencontrés à Bengbis. Ce fait est probablement dû à la dureté des formations de Mbalmayo et à la présence de la calcite dans le cortège minéralogique.

Les données physiques des chloritoschistes des secteurs de Ngoumou, Mbalmayo et Bengbis (Tab. 3) donnent les relations purement indicatives suivantes entre le poids volumique des grains solides (γ_s), le poids volumique sec (γ_d), et l'indice relatif d'induration potentielle IRIP (exprimé en pourcentage):

$$\gamma_s = 0,04.I_{RIP} + 2,74 ; N = 5 ; r = 0,92 ; \quad (12)$$

$$\gamma_d = 0,13.I_{RIP} + 2,60 ; N = 5 ; r = 0,95. \quad (13)$$

Il apparaît ainsi une augmentation des poids volumiques en fonction de l'enrichissement en oxydes de fer ferrique.

La relation indicative entre la compacité c et l'indice relatif de confinement potentiel IRCP (exprimé en pourcentage) est :

$$c = -3,60.IRCP + 455,06 ; N = 5 ; r = -0,91. \quad (14)$$

Elle semble indiquer des évolutions opposées entre la compacité et le confinement. Plus le milieu est confiné moins les schistes sont compacts.

Toutes ces relations sont considérées comme indicatives en raison du nombre réduit d'échantillons pris en compte.

4.1.2 Cas des produits d'altération

Les corrélations significatives faites entre paramètres normatifs et propriétés physiques sur des matériaux similaires à Ngoumou (Ekodeck, 1984), Mbalmayo et Bengbis, à partir des données des tableaux 4, 5 et 6, montrent les caractéristiques suivantes d'un niveau du profil d'altération à l'autre.

4.1.2.1 Corrélations entre indice relatif de lixiviation potentielle IRLP et propriétés physiques des matériaux

- Niveau supérieur :

$$Wp = -1,64.IRLP + 164,20 ; N = 7 ; r = -0,90 \quad (15)$$

La limite de plasticité diminue lorsque l'altération des silicates augmente.

Table 1: Données des résultats d'analyses chimiques (en %) des chloritoschistes de la série de Mbalmayo-Bengbis et de leurs produits dérivés

N° Echantillon	Niveau	SiO ₂	Al ₂ O ₃	H ₂ O	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Total	Cr ₂ O ₃	NiO
TR4A	Niveau superficiel	60,00	18,10	8,20	0,00	0,02	0,00	0,02	0,27	8,86	0,50	1,04	0,23	97,24	0,00	0,00
MB3-m		62,62	14,34	10,59	0,39	0,08	0,06	0,04	0,83	9,00	0,33	1,48	0,09	99,85	0,01	0,00
MB1-m		60,22	15,31	13,00	0,54	0,04	0,05	0,03	1,22	6,81	0,37	1,32	0,06	98,97	0,01	0,00
BE3-ms		73,51	11,05	8,04	0,34	0,03	0,02	0,03	0,69	4,57	0,51	1,14	0,05	99,98	0,01	0,00
BE3-m		68,68	13,73	8,16	0,43	0,03	0,05	0,02	0,88	6,61	0,37	1,27	0,07	100,30	0,01	0,00
BE3-mb		67,09	13,35	8,25	0,41	0,03	0,02	0,00	0,75	8,83	0,20	0,98	0,04	99,95	0,01	0,00
BE1-m		62,65	15,90	9,70	0,64	0,03	0,04	0,03	1,62	7,30	0,39	1,08	0,06	99,43	0,01	0,00
TR3A	Niveau médian	20,18	13,60	10,20	0,00	0,12	0,00	0,00	0,06	52,13	0,50	0,44	0,31	97,54	0,00	0,00
MB3-g		63,60	8,73	6,30	0,15	0,02	0,04	0,01	0,30	21,47	0,00	0,46	0,09	101,18	0,07	0,00
MB1g		67,72	9,27	5,98	0,30	0,02	0,05	0,01	0,75	14,64	0,21	0,58	0,07	99,60	0,05	0,00
BE3-g		32,02	16,82	10,89	0,32	0,03	0,04	0,03	0,62	38,48	0,00	0,93	0,11	100,29	0,10	0,00
BE1-g		33,11	15,10	10,80	0,39	0,03	0,04	0,04	0,88	39,00	0,19	0,82	0,16	100,57	0,09	0,00
TR2A	Niveau inférieur	54,38	21,30	8,10	0,00	0,03	0,00	0,06	1,93	10,61	0,64	1,04	0,18	98,27	0,00	0,00
MB3-as		44,11	22,68	9,50	1,54	0,04	0,05	0,09	4,49	14,35	0,82	1,37	0,06	99,10	0,03	0,00
MB3-ab		58,84	16,81	10,05	0,91	0,03	0,01	0,05	2,79	8,65	0,73	0,95	0,03	99,85	0,02	0,00
MB3-is		56,28	19,51	6,74	1,25	0,04	0,00	0,10	4,69	8,43	1,46	1,24	0,04	99,78	0,02	0,00
MB3-i		49,56	21,86	13,18	0,97	0,05	0,04	0,07	3,00	8,32	0,74	1,21	0,07	99,06	0,02	0,01
MB3-ib		57,94	18,40	5,06	1,39	0,04	0,00	0,11	5,03	8,94	1,43	1,40	0,04	99,78	0,03	0,00
MB1-a		45,79	20,31	11,99	0,94	0,07	0,04	0,05	2,48	17,27	0,38	0,91	0,08	100,31	0,03	0,01
MB1-i		54,82	18,31	8,21	1,02	0,07	0,04	0,07	3,36	11,98	0,64	0,98	0,29	99,79	0,02	0,00
BE3-as		51,75	21,82	9,98	1,00	0,11	0,04	0,06	2,84	10,74	0,42	1,19	0,12	100,07	0,02	0,00
BE3-ab		47,85	21,41	10,76	0,93	0,07	0,00	0,06	2,75	14,31	0,52	1,01	0,25	99,92	0,02	0,01
BE3-is		61,71	16,22	5,44	1,02	0,03	0,00	0,06	4,01	9,54	0,99	0,97	0,27	100,26	0,01	0,00
BE3-i3		60,88	18,94	6,16	1,02	0,04	0,04	0,09	3,76	7,51	0,87	1,09	0,12	100,52	0,02	0,00
BE3-i2		60,68	18,97	5,52	1,15	0,03	0,01	0,07	4,57	6,53	1,18	0,97	0,20	99,88	0,01	0,00
BE3-i1		68,83	13,60	3,52	0,97	0,03	0,00	0,07	3,93	7,61	0,29	1,02	0,05	99,92	0,01	0,00
BE3-ib		64,57	17,58	5,74	0,86	0,04	0,02	0,08	3,32	5,53	1,01	0,94	0,24	99,93	0,02	0,01
BE1-a		54,32	22,20	8,17	1,08	0,04	0,04	0,08	3,52	8,89	0,76	1,10	0,03	100,18	0,02	0,00
BE1-i		65,11	18,40	2,83	1,08	0,01	0,04	0,08	3,79	7,94	0,55	0,94	0,22	100,94	0,01	0,00
TR1MN	Roche mère	56,54	15,91	4,94	4,33	0,11	2,80	3,04	2,75	0,90	6,25	1,04	0,19	98,80	0,01	0,00
MBr		64,14	13,23	4,89	2,06	0,10	3,48	2,64	2,36	1,20	4,03	0,70	0,18	99,02	0,01	0,01
BEr		64,62	14,14	5,88	2,01	0,08	0,77	2,78	2,60	1,49	3,91	0,84	0,19	99,31	0,01	0,01
NG1M		60,79	15,20	5,42	2,52	0,01	4,14	2,21	2,44	1,05	4,82	0,48	0,26	99,34	0,00	0,00
AY		57,00	16,18	4,99	4,19	0,10	2,63	2,66	2,88	8,09	-	0,98	0,19	99,79	0,00	0,00

- Niveau médian :
 $W_p = 1,03.IRLP - 39,97 ; N = 5 ; r = 0,73$ (16)
 La limite de plasticité augmente avec l'altération des silicates.

- Niveau inférieur :
 $W_L = 0,61 IRLP + 3,00 ; N = 17 ; r = 0,71.$ (17)
 La limite de liquidité augmente avec l'altération des silicates.

4.1.2.2 *Corrélations entre degré virtuel relatif d'altération de la roche (DVRAR) et propriétés physiques des matériaux*

- Niveau supérieur

Il n'y a pas de corrélation significative entre paramètres normatifs et propriétés géotechniques.

- Niveau médian
 $W_p = -0,19.DVRAR + 47,56, N = 5 ; r = -0,97$ (18)
 La limite de plasticité diminue lorsque l'altération de la roche augmente.

- Niveau inférieur
 $W_L = -0,39.DVRAR + 14,17, N = 17 ; r = -0,68.$ (19)
 La limite de liquidité tend à diminuer lorsque l'altération de la roche augmente.

Table 2: Synoptique de quelques caractères géotechniques et altérologiques des matériaux de la série de Mbalmayo-Bengbis

N° échantillon	Niveau	Caractères géotechniques : Propriétés physiques					Propriétés mécaniques		Caractères altérologiques : Paramètres normatifs					
		γ_s (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	c (%)	W _L (%)	W _p (%)	c _u (bar)	ϕ_u (°)	I _{RLP} (%)	D _{VRAR} (%)	I _{IRIP} (%)	I _{IRCP} (%)	I _{IFL} (%)	
TR4A	Niveau superficiel	2,70	1,46	54,07	69,00	35,00	0,65	41,00	79,33	36,80	19,61	5,90	10,99	
MB3-m		2,59	1,20	46,33	38,00	25,00	0,00	33,00	82,74	63,64	27,70	32,56	9,39	
MB1-m		2,59	1,10	42,47	54,00	40,00	0,40	30,00	78,29	42,10	25,16	41,21	7,02	
BE3-ms		2,57	1,10	42,80	41,00	27,00	1,30	14,00	83,21	24,99	18,77	31,73	5,01	
BE3-m		2,58	1,20	46,51	39,00	30,00	0,82	31,00	82,04	26,01	23,95	33,92	8,13	
BE3-mb		2,62	1,30	49,62	43,00	29,00	0,50	26,00	83,84	25,84	26,53	30,39	9,57	
BE1-m		2,57	1,10	42,80	60,00	40,00	0,50	71,00	74,49	33,39	24,56	48,69	7,53	
TR3A	Niveau médian	2,77	1,95	70,40	72,00	36,00	-	-	74,43	66,32	59,23	2,27	74,43	
MB3-g		2,89	1,50	51,90	58,00	44,00	-	-	82,42	18,46	31,76	16,01	82,42	
MB1g		2,80	1,20	42,86	67,00	45,00	-	-	77,97	17,94	26,88	42,13	77,97	
BE3-g		2,90	1,40	48,28	48,00	37,00	-	-	76,17	50,74	51,53	16,76	76,17	
BE1-g		2,92	1,20	41,10	54,00	38,00	-	-	78,34	42,86	56,71	27,85	78,34	
TR2A	Niveau inférieur	2,60	1,43	55,00	54,00	30,00	0,56	44,30	70,41	41,04	20,00	34,24	70,41	
MB3-as		2,83	1,30	45,94	37,00	28,00	0,16	38,30	59,29	44,85	28,24	78,20	59,29	
MB3-ab		2,78	1,30	46,76	40,00	28,00	0,14	44,10	63,80	38,45	21,19	69,61	63,80	
MB3-is		2,76	1,10	39,86	35,00	26,00	0,17	44,40	54,69	35,47	14,92	87,74	54,69	
MB3-i		2,74	1,10	40,15	48,00	37,00	0,11	42,60	68,23	49,73	27,73	61,17	68,23	
MB3-ib		2,81	1,00	35,59	38,00	28,00	0,07	46,90	50,89	31,36	12,21	94,97	50,89	
MB1-a		2,79	1,40	50,18	49,00	35,00	0,11	40,00	70,87	45,12	37,91	54,44	70,87	
MB1-i		2,78	1,30	46,76	43,00	33,00	0,17	44,40	61,46	35,24	24,54	73,80	61,46	
BE3-as		2,64	1,10	41,67	43,00	30,00	0,31	37,60	69,62	39,09	31,26	58,06	69,62	
BE3-ab		2,70	1,20	44,44	43,00	28,00	0,40	16,00	70,12	42,02	35,09	57,40	70,12	
BE3-is		2,78	1,20	43,17	34,00	27,00	0,06	33,00	54,00	28,52	14,84	89,12	54,00	
BE3-i3		2,75	1,20	43,64	36,00	26,00	0,56	27,00	59,91	29,84	18,42	77,24	59,91	
BE3-i2		2,74	1,20	43,80	35,00	21,00	0,28	33,00	54,78	31,09	12,56	87,66	54,78	
BE3-i1		2,71	1,20	44,28	28,00	19,00	0,32	51,00	49,77	21,96	9,49	97,47	49,77	
BE3-ib		2,67	1,20	44,94	34,00	24,00	0,32	27,00	61,43	27,30	16,31	74,65	61,43	
BE1-a		2,68	1,40	52,24	38,00	26,00	-	-	64,59	36,75	24,35	35,25	64,59	
BE1-i		2,74	1,30	47,45	43,00	31,00	-	-	49,14	24,37	10,99	83,55	49,14	
TR1MN		Roche mère	2,78	2,74	98,60	-	-	-	-	18,94	16,17	1,00	98,95	18,94
MBr			2,73	2,58	94,51	-	-	-	-	26,05	18,56	0,07	100,00	26,05
BEr			2,74	2,63	95,99	-	-	-	-	45,70	31,11	0,09	100,00	45,70
NG1M	2,75		2,64	93,82	-	-	-	-	18,90	17,00	0,08	100,00	18,90	
AY	2,77		2,73	94,95	-	-	-	-	21,00	19,25	1,02	100,00	21,00	

γ_s : poids volumique des grains solides ; γ_d : poids volumique sec ; c : compacité
 W_L : limite de liquidité ; W_p : limite de plasticité
 c_u : cohésion apparente ; ϕ_u : angle de frottement interne apparent

Table 3: Matrice de corrélation des matériaux du niveau roche mère

γ_s	1,00							
γ_d	0,99	1,00						
c	0,62	0,60	1,00					
IRLP	-0,55	-0,44	0,03	1,00				
DVRAR	-0,44	-0,31	0,01	0,98	1,00			
IRIP	0,92	0,95	0,58	-0,49	-0,39	1,00		
IRCP	-0,70	-0,62	-0,91	0,35	0,39	-1,00	1,00	
	γ_s	γ_d	c	IRLP	DVRAR	IRIP	IRCP	

Table 4: Matrice de corrélation des matériaux du niveau inférieur

γ_s	1,00											
γ_d	-0,18	1,00										
c	-0,39	0,97	1,00									
W_L	-0,27	0,39	0,43	1,00								
W_P	0,14	0,15	0,11	0,82	1,00							
IP	-0,63	0,48	0,60	0,73	0,21	1,00						
IRLP	-0,42	0,35	0,42	0,71	0,54	1,00						
DVRAR	0,04	0,18	0,16	0,68	0,67	0,79	1,00					
IRIP	-0,04	0,27	0,25	0,58	0,61	0,86	0,83	1,00				
IRCP	0,57	-0,59	-0,68	-0,71	-0,44	-0,86	-0,63	-0,65	1,00			
Cu	-0,71	0,25	0,41	0,12	-0,31	0,27	-0,17	-0,04	-0,39	1,00		
ϕ_u	0,18	0,02	-0,01	0,06	0,12	-0,29	-0,01	-0,30	0,17	-0,38	1,00	
	γ_s	γ_d	c	W_L	W_P	IRLP	DVRAR	IRIP	IRCP	Cu	ϕ_u	

Table 5: Matrice de corrélation des matériaux du niveau médian

γ_s	1,00								
γ_d	-0,55	1,00							
c	-0,62	1,00	1,00						
W_L	-0,93	0,52	0,58	1,00					
W_P	-0,05	-0,47	-0,44	0,17	1,00				
IP	-0,89	0,71	0,76	0,91	-0,26	1,00			
IRLP	0,50	-0,42	-0,45	-0,28	0,73	1,00			
DVRAR	-0,20	0,63	0,62	0,07	-0,97	-0,83	1,00		
IRIP	0,10	0,42	0,40	-0,14	-0,98	-0,66	0,93	1,00	
IRCP	0,13	-0,89	-0,85	-0,10	0,64	0,31	-0,70	-0,60	1,00
	γ_s	γ_d	c	W_L	W_P	IRLP	DVRAR	IRIP	IRCP

4.1.2.3 Corrélations entre indice relatif de confinement potentiel (IRCP) et propriétés physiques des matériaux

- Niveau supérieur

$$\gamma_d = -0,01 \cdot \text{IRCP} + 1,89, N = 7; r = -0,90 \quad (20)$$

$$\gamma_s = -0,003 \cdot \text{IRCP} + 2,70, N = 7; r = -0,89 \quad (21)$$

$$c = -0,30 \cdot \text{IRCP} + 55,54, N = 7; r = -0,88 \quad (22)$$

Les poids volumiques et la compacité augmentent lorsque diminue le confinement du milieu.

- Niveau médian

$$\gamma_d = -0,02 \cdot \text{IRCP} + 1,84, N = 5; r = -0,89 \quad (23)$$

$$c = -0,67 \cdot \text{IRCP} + 65,02, N = 5; r = -0,85 \quad (24)$$

Le poids volumique sec et la compacité augmentent lorsque diminue le confinement du milieu.

- Niveau inférieur

$$W_L = -0,24 \cdot \text{IRCP} + 3,00, N = 17; r = -0,71 \quad (25)$$

La limite de liquidité augmente lorsque diminue le confinement du milieu.

4.1.2.4 Corrélations entre importance potentielle du fer ferrique libre (IFL) et propriétés physiques des matériaux

- Niveau supérieur

$$\gamma_d = 0,06 \cdot \text{IFL} + 0,72, N = 7; r = 0,87 \quad (26)$$

$$\gamma_s = 0,02 \cdot \text{IFL} + 2,45, N = 7; r = 0,78 \quad (27)$$

$$c = 1,92 \cdot \text{IFL} + 30,59, N = 7; r = 0,88 \quad (28)$$

Les poids volumiques et la compacité augmentent avec l'enrichissement en oxydes de fer ferrique.

Les niveaux médian et inférieur n'ont pas montré de corrélation significative entre l'IFL et les propriétés physiques.

4.2 Restructuration altérogénique normative et propriétés mécaniques des roches de la série de Mbalmayo-Bengbis

Les minéraux des niveaux inférieur et supérieur des profils développés sur schistes de Mbalmayo et Bengbis sont des argiles raides ($15 \leq E' \leq 100$ bars) ou,

moyennes si l'on considère plutôt les indices de compression. Ces argiles sont sous consolidées ($O_{CR} < 1$) dans les niveaux inférieurs de la zone de Bengbis. Ce phénomène indique des " remaniements " au sein desdits niveaux. Ces remaniements induisent probablement l'intensification du phénomène d'altération dans cette zone. Ce fait explique aussi la forte épaisseur des profils étudiés.

Les corrélations entre propriétés mécaniques et paramètres normatifs altérologiques ne sont observables que dans le niveau supérieur argileux (Tab. 6).

4.2.1 *Corrélations entre indice relatif de lixiviation potentielle IRLP et propriétés mécaniques des matériaux superficiels*

L'angle de frottement interne apparent ϕ_u est lié à IRLP par la relation suivante :

$$\phi_u = -4,54.IRLP + 40,12, N = 7 ; r = -0,86 \quad (29)$$

Lorsque l'angle de frottement interne apparent ϕ_u diminue, IRLP augmente.

4.2.2 *Corrélations entre degré virtuel relatif d'altération de la roche DVRAR et propriétés mécaniques des matériaux superficiels*

La relation entre la cohésion apparente C_u et I_{RLP} est la suivante :

$$C_u = -0,02.DVRAR + 1,44, N = 7 ; r = -0,80 \quad (30)$$

La cohésion apparente C_u croît en fonction inverse du degré virtuel d'altération DVRAR.

4.2.3 *Corrélations entre indice relatif de confinement potentiel IRCP et propriétés mécaniques des matériaux superficiels*

$$C_u = -0,10.IRIP + 2,92, N = 7 ; r = -0,82 \quad (31)$$

Plus la valeur de la cohésion est élevée, plus l'indice relatif de confinement potentiel est faible.

5. INTÉRÊTS DES FORMATIONS ET DES MATÉRIAUX D'ALTÉRATION DE LA SÉRIE DE MBALMAYO-BENGBIS

Il s'agit de montrer l'utilité des matériaux étudiés dans le domaine du génie civil. Les corrélations établies

concourent à établir les faits ci-dessous.

Au niveau de la roche mère : plus la roche s'enrichit en fer ferrique, plus son poids volumique augmente. De plus, la roche est d'autant plus compacte que le milieu est moins confiné. Ceci semble traduire le fait que l'altération commençant par la formation de nouveaux minéraux d'altération, réduit la porosité et par conséquent augmente la compacité de la roche. Les valeurs de l'IRLP et du DVRAR gravitent autour de 20 % ; les premières étant supérieures aux secondes en raison de la présence du quartz. D'après Ekodeck et Kabeyene Beyala Kamgang (2002), ces roches sont probablement riches en minéraux tels les chlorites et les smectites, minéraux sujets au phénomène de retrait-gonflement sous l'influence de l'eau. Les valeurs des deux paramètres suscités indiquent qu'il s'agit de roches à comportement élasto-plastique à élastique-fragile et à rupture brutale à ductile sous charge. Il est donc recommandé d'utiliser le matériau tout venant, après concassage, ou ses fractions séparées par concassage (Onana et al., 2007). Enfin, l'utilisation de ces matériaux dans les travaux du génie civil est limitée à cause de l'abondance des minéraux phylliteux.

Dans le niveau inférieur : la limite de liquidité W_L varie en fonction directe de la lixiviation et en fonction inverse de l'altération des matériaux et de leur degré de confinement. Les valeurs de DVRAR corrélées varient entre 20 et 50 %. Les matériaux du niveau inférieur présentent une texture graveleuse à argileuse. Le matériau tout venant est utilisable dans les travaux du génie civil après concassage. Il en est de même des fractions de ces matériaux séparées par concassage.

Dans le niveau médian : la limite de plasticité, comme dans le niveau inférieur, varie de manière directe avec l'évolution de l'altération et de manière inverse avec la lixiviation. Le poids volumique sec et la compacité varient de façon inverse avec le degré de confinement.

Table 6: Matrice de corrélation des matériaux argileux superficiels

γ_s	1,00												
γ_d	0,94	1,00											
c	0,91	1,00	1,00										
W_L	0,62	0,39	0,33	1,00									
W_P	0,10	-0,13	-0,18	0,78	1,00								
IP	0,82	0,67	0,62	0,88	0,40								
IRLP	0,02	0,21	0,26	-0,75	-0,90	1,00							
DVRAR	0,04	-0,01	-0,01	-0,04	-0,12	-0,06	1,00						
IRIP	-0,31	-0,19	-0,16	-0,37	-0,05	0,03	0,49	1,00					
IRCP	-0,89	-0,90	-0,88	-0,32	0,26	-0,34	0,01	0,50	1,00				
IFL	0,78	0,87	0,88	0,34	-0,04	0,05	0,32	0,27	-0,61	1			
Cu	-0,10	-0,11	-0,12	-0,06	-0,11	0,19	-0,80	-0,82	-0,15	-0,56	1		
ϕ_u	0,02	-0,02	-0,04	0,60	0,64	-0,86	0,13	0,19	0,29	0,24	-0,37	1	
	γ_s	γ_d	c	W_L	W_P	IRLP	DVRAR	IRIP	IRCP	IFL	Cu	ϕ_u	

Les valeurs de l'IRLP de ces matériaux sont supérieures à 70 %, ce qui indique la présence généralisée des kandites (kaolinite et/ou halloysite). Ces derniers sont exploitables dans l'industrie du bâtiment (fabrication de briques, tuiles). Les valeurs de DVRAR oscillent entre 17 et 67 %, indiquant leur texture graveleuse à argileuse. Les fractions séparées par concassage de ces matériaux sont utilisables dans le génie civil.

Dans le niveau superficiel : les valeurs de W_p , γ_d , γ_s , c , ϕ_u et C_u augmentent lorsque diminuent celles des paramètres d'appauvrissement et d'ouverture du milieu d'altération. Les valeurs de l'IRLP de ces matériaux signalent la présence des kandites. Ces matériaux comme ceux du niveau médian sont exploitables dans la fabrication des briques et des tuiles.

6. CONCLUSION

Les chloritoschistes de la série de Mbalmayo-Bengbis, soumis aux conditions thermodynamiques qui règnent à l'interface continentale en milieu équatorial, ont subi une évolution supergène qui a affecté leurs propriétés physiques et mécaniques originelles. Altérologues et spécialistes du génie civil s'y accordent. Si ces propriétés physiques et mécaniques nouvelles sont aisément quantifiables par les ingénieurs, il n'en était pas toujours ainsi des propriétés altérologiques par les géologues. D'où la difficulté de lier les causes aux effets dans le comportement des matériaux, de façon à établir des passerelles utiles entre ces deux branches connexes de la science que sont la géologie et la géotechnique. La méthode de caractérisation altérologique normative, en quantifiant les paramètres altérologiques, permet ce rapprochement par le biais de corrélations statistiques intéressantes entre propriétés physiques (γ_d , γ_s , W_L , W_p , c) et mécaniques (c_u , ϕ_u) des matériaux et paramètres altérologiques (IRLP, DVRAR, IRIP, IRCP, IFL). Elle donne en outre l'utilité de ces matériaux dans les travaux de génie civil. Toutefois, la validité des rapprochements effectués est limitée par le nombre d'échantillons étudiés. Il s'agit donc en fait de tendances qui demandent à être confirmées par des expérimentations ultérieures actuellement en projet.

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Cross W., Iddings J. P., Pirsson L. V., Washington H. S. (1903) Quantitative classification of igneous rocks. Univ. of Chicago Press.

Ekodeck G. E. (1984) L'altération des roches métamorphiques du Sud Cameroun et ses aspects géotechniques. Th. Doct. Etat ès Sci. Nat., IRGM, Univ. Scientif. et Médic. de Grenoble I - France, 368 p.

Ekodeck G. E. (1990) Essai de corrélations entre

paramètres altérologiques normatifs et caractères géotechniques des sols saturés : cas des produits d'altération des roches de la région de Yaoundé, Cameroun. Actes du Sympos. Int. Sur les sols structurés, AIGI, 9 - 13 avril, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, pp. 1 - 7.

Ekodeck G. E. (1994) Un mode de caractérisation des sols résiduels compatibles avec les données de l'expérimentation géotechnique. Actes du 7e Congr. Int., AIGI-Lisbonne (Portugal), pp. 3457 - 3468.

Ekodeck G. E., Kabeyene Beyala Kamgang (2002) L'altérologie normative et ses applications : une expression particulière des roches alumino-silicatées du point de vue leur évolution supergène. Press. Univ. De Yaoundé (Cameroun), Collect. Connaissances, 231 p.

Goldich, S. S. (1938) A study in rock weathering. Journal of Geology, 46, 17-23.

Nédelec A., Macaudiere J., Nzenti J. P., Barbey P. (1986) Evolution crustale et métamorphique des schistes de Mbalmayo (Cameroun). Implications sur la structure de la zone mobile panafricaine d'Afrique Centrale au contact du Craton du Congo. C. R. Acad. Sci. Paris, 303, II, 1, 75 - 80.

Onana V. L. (2002) Les roches de la Série d'Ayos et leurs produits dérivés : Altérologie - Géotechnique - Intérêts. Mém. DEA, Fac. Sci. Univ. Yaoundé I (Cameroun), 57 p.

Onana V. L., Ndome Effoudou Priso E., Kamgang Kabeyene Beyala V., Ekodeck G. E. (2007) Corrélations entre les paramètres altérologiques normatifs et les caractéristiques physico-mécaniques des roches de la série de Mbalmayo-Bengbis (Sud Cameroun). In volume des articles du 14ème Congrès Régional Africain de Mécanique des Sols et de la Géotechnique, "Les sols d'Afrique", Vol. 1, Yaoundé (Cameroun), 26 - 28 novembre 2007, pp. 155-164.

Pedro G., Delmas A. G. (1971) Sur l'altération expérimentale par lessivage à l'eau et la mise en évidence de trois grands domaines d'évolution géochimique. Comptes Rendus de l'Académie des sciences, Paris-France, 273 D, 1543-1546.

Robitaille V., Tremblay D. (1997) Mécanique des sols. Théorie et Pratique. Modulo éd. Québec (Canada), 652 p.

Santoir C. (1995) Atlas régional du Sud Cameroun : Vol. Oro - hydrographie, ORSTOM éd., pp. 4 - 5.

Tanguenta J. (1986) Les migmatites de Yaoundé et les schistes de Mbalmayo : une étude comparée des implications géotechniques de leurs caractères pétrographiques. Mém. Maît. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I (Cameroun), 80 p.

Vallerie M. (1995) Atlas régional du Sud Cameroun : Vol. Pédologie, ORSTOM éd., pp. 6 - 7.

Received: 15/07/2008

Accepted: 18/10/2008