

Intêret de l'alterologie normative dans la sélection des argiles kaoliniques pour la production industrielle des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques

EKODECK G. E. et KAMGANG KABEYENE BEYALA V.

* Université de Yaoundé I, Faculté des Sciences, B.P. 4930, Yaoundé, Cameroun.

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

RÉSUMÉ

Les auteurs présentent d'abord les deux aspects fondamentaux et complémentaires de la caractérisation courante des matériaux d'altération que sont la définition de la composition minéralogique et celle de la composition chimique, dont la grande variabilité est le résultat de l'action des agents dynamiques de l'interface continentale. Ils présentent ensuite les grandes lignes de la méthode de restructuration normative altérologique développée et mise au point, qui montre des affinités avec la caractérisation courante des produits d'altération, en partant de la composition minéralogique virtuelle qui reste en parfait accord avec la réalité. Ladite méthode aboutit à la définition d'un certain nombre de paramètres qui quantifient l'action des agents géodynamiques. Ils considèrent alors quelques uns des principaux usages industriels du kaolin ainsi que les caractéristiques exigibles dans le choix des argiles essentiellement kaoliniques pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques. Les premières spécifications étant essentiellement d'ordre minéralogique, l'altérologie normative se révèle alors comme un outil apte à fournir des indications intéressantes qui permettraient de sélectionner les matériaux utilisables, non seulement à partir de la composition minéralogique, mais aussi à partir des données paramétriques. Un protocole d'examen minéralogique et paramétrique est proposé pour ladite sélection. Quelques exemples sont alors tirés du Cameroun et de la Guinée-Conakry pour illustrer ces propos.

Mots clés : Manteau d'altération – Matériaux argileux – Caractérisations minéralogique et chimique – Altérologie normative – Caoutchouc – Papier – Peinture – Plastique – Industrie.

ABSTRACT

The authors present at first the fundamental and complementary aspects of the current characterization of the weathering mantle materials, i.e. the mineralogical and the chemical compositions. The great variability of these compositions results from the activity of continental interface dynamic factors. Afterwards, the authors present the major features of the elaborated normative alterological reconstruction system which shows similarities with the current characterization of weathered materials, through virtual mineralogical compositions remaining in line with the reality and reconstructed from their chemical compositions. This method aims at defining alterological parameters which quantify the action of geodynamic agents. Then, the authors consider on one hand the main industrial utilizations of kaoline and on the other hand the requirements in the kaolinic clays choice, for the industrial output of rubber, paper, paint and plastic. The first of these requirements being from the mineralogical point of view, the normative alterology appears therefore to be an appropriate tool to give interesting indications, allowing the selection of usable materials, based not only on the mineralogical composition, but also on alterological parameters. A step by step examination process of mineralogical and parametric properties is proposed for that purpose. A few examples from Cameroon and Guinea-Conakry, are then presented as illustrations.

Key words : Weathering mantle – Clay materials – Mineralogical and chemical characterizations – Normative alterology – Rubber – Paper – Paint – Plastic – Industrial purpose.

INTRODUCTION

Dans la plupart des pays des latitudes intertropicales, l'épaisseur du manteau d'altération des roches est relativement importante. L'intensité de l'action des phénomènes d'altération météorique sur les roches alumino-silicatées conduit à la formation de matériaux argileux susceptibles d'intervenir dans de nombreuses applications industrielles. La caractérisation usuelle de ces matériaux est fondée sur la définition de la variation des éléments minéraux et/ou chimiques le long d'un profil ou le long d'une séquence topographique de profils. Si l'examen de la composition chimique permet de distinguer les éléments migrants des éléments stables, la détermination précise des éléments minéraux, primaires et secondaires, reste un problème encore mal résolu malgré les nombreux perfectionnements technologiques, ce qui contraint de recourir à des artifices normatifs. Pédro et Delmas (1971) relèvent, dans la caractérisation des principaux minéraux secondaires alumineux, que ceux-ci sont bâtis à partir de la couche planaire d'hydroxyde d'aluminium ou couche octaédrique, qui s'individualise lorsque la silice a été complètement évacuée au cours de l'altération. A cette couche peut être associée, lorsque l'évolution n'est pas encore complète, une couche de tétraèdres de silice, soit sur une, soit sur les deux faces de la couche octaédrique. Ils dégagent ainsi trois grandes possibilités minéralogiques théoriques qui sont à la base de trois processus néogénétiques pouvant former une suite évolutive : (1) la bisiallisation, caractérisée par les minéraux argileux ou phyllites 2/1 dont le type est la montmorillonite, (2) la monosiallisation, caractérisée par les phyllites 1/1 dont le type est la kaolinite et (3) l'allitisation, caractérisée par les phyllites 0/1 dont le type est la gibbsite.

Dans le présent article, l'intérêt est porté aux matériaux argileux kaoliniques susceptibles d'être utilisés dans l'industrie du caoutchouc, du papier, des peintures et des plastiques. Une méthode qui, relevant de l'altérologie normative, se veut efficace dans la prédiction de l'aptitude de ces matériaux à se prêter à ces utilisations, est alors proposée. Ainsi donc, après un bref rappel des grandes lignes de l'altérologie normative et des exigences dans le choix des argiles, les possibilités offertes par l'altérologie normative en matière de caractérisation et de sélection seront exposées. Quelques cas permettront des illustrations.

La présente proposition est un autre mode d'application de la méthode de restructuration normative altérologique. Elle vient à la suite de celle

antérieurement présentée pour la sélection des matériaux susceptibles d'être utilisés dans l'industrie de la céramique, des réfractaires et du bâtiment (Ekodeck et Kamgang 2001).

I. L'ALTEROLOGIE NORMATIVE : DEMARCHE ET PARAMETRES

I.1. La démarche normative

La restructuration normative altérologique (Ekodeck 1984, 1989 ; Ekodeck et Kamgang, 2002), est une méthode d'étude de caractérisation et de classification des roches alumino-silicatées inspirée de la méthode américaine CIPW (Cross *et al.*, 1902). Son principe consiste à combiner les molécules d'eau plus quatorze constituants chimiques majeurs parmi lesquels l'eau de constitution, pour faire apparaître en qualité et en quantité des minéraux étalons dont la gamme complète actuelle comporte trente-sept espèces minérales possédant une formule de composition chimique simple et se répartissant en cinq groupes standards : (1) les minéraux peu ou non altérables non siliciques (anatase, apatite, chromite, ilménite, magnétite), (2) les silicates anhydres primaires (orthose, albite, anorthite, kaliophillite, néphéline, métasilicates de potassium et de sodium, wollastonite, ferrosillite, fayalite, enstatite, forstérite), (3) les silicates supergènes (okénite, scolécite, analcime, séricite, daphnite, berthiérine, garniérine, antigorite, stévensite, kaolinite, halloysite), (4) les oxyhydroxydes (corindon, bœhmite, gibbsite, hématite, gœthite, manganosite, pyrochroïte), (5) la silice (quartz, silice amorphe). De la composition minéralogique virtuelle établie pour chaque échantillon, cette méthode aboutit à l'évaluation des paramètres de l'altération qui, intégrant les conditions bioclimatiques de l'évolution pédogénétique, permettent des caractérisations ponctuelles d'échantillons de roches ou des caractérisations évolutives et séquentielles le long d'un profil ou d'une toposéquence.

I.2. Les paramètres de l'altération

Sept paramètres ont été définis (Ekodeck 1984, 1989 ; Ekodeck et Kamgang, 2002) pour caractériser les produits d'altération par les mécanismes d'enrichissement ou d'appauvrissement mis en jeu au cours de leur formation et par les particularités du milieu de leur formation. Leurs valeurs s'obtiennent à partir de la teneur en minéraux reconstitués.

I.2.1. Les paramètres d'enrichissement du milieu d'altération

Quatre paramètres prennent en compte

l'enrichissement absolu ou relatif en oxyhydroxydes.

(1) La **prédominance potentielle relative des oxyhydroxydes libres de fer et d'aluminium (PPFAL)**

$$PPFAL = \frac{\text{Gibbsite} + \text{Bœhmite} + \text{Corindon}}{\text{Gœthite} + \text{Hématite}}$$

Ce paramètre souligne la prééminence des oxyhydroxydes de fer oxydé sur ceux de l'aluminium, l'inverse ou l'équivalence entre ces oxyhydroxydes. Ses valeurs varient de 0, quand il n'y a pas d'oxyhydroxyde normatif d'aluminium, à l'infini quand il n'y a pas d'oxyhydroxyde ferrique normatif.

(2) **L'importance potentielle de l'aluminium libre (IAL)**

$$IAL = \frac{(\text{Gibbsite} + \text{Corindon})}{\text{Gibbsite} + \text{Bœhmite} + \text{Corindon} + \text{Gœthite} + \text{Hématite} + \text{Co}} \times 100$$

(3) **L'importance potentielle de fer ferrique libre (IFL)**

$$IFL = \frac{(\text{Gœthite} + \text{Hématite})}{\text{Gibbsite} + \text{Bœhmite} + \text{Corindon} + \text{Gœthite} + \text{Hématite} + \text{Co}} \times 100$$

Ces deux derniers paramètres, discriminatoires et complémentaires, viennent à l'appui du précédent. Dans leur expression, Co est un coefficient de pondération permettant de leur éviter les valeurs indéterminées ou infinies.

$$Co = \%aT - (\%aAl_2O_3 + \%aFe_2O_3)$$

[N.B. : %aT : pourcentage total des éléments chimiques majeurs résultant des analyses chimiques (échantillon brut); %aAl₂O₃ : teneur initiale en alumine (échantillon brut); %aFe₂O₃ : teneur initiale en fer ferrique (échantillon brut).]

Les valeurs de chacun d'eux vont de 0 à 100. Pour le paramètre IAL par exemple, les valeurs de 0 à 50 indiquent les roches à oxyhydroxydes d'aluminium subordonnés, alors que celles comprises entre 50 et 100 caractérisent les roches à prédominance des oxyhydroxydes d'aluminium. Le deuxième paramètre (IFL) caractérise de façon similaire la subordination ou la prédominance des oxyhydroxydes de fer ferrique.

(4) **L'indice d'induration potentielle (IIP) ou degré virtuel de cuirassement**

$$IIP = \frac{(\text{Oxydes} + \text{Hydroxydes de } Fe^{3+}, Al^{3+}, Mn^{2+})}{\text{Tous les minéraux}} \times 100$$

Le cuirassement, tout comme l'induration qui lui est associée, s'effectue grâce à la présence des oxyhydroxydes de fer ferrique, d'aluminium et de manganèse. Il est pondéré par l'abondance relative des autres minéraux. Les valeurs de ce paramètre varient de 0, quand il n'y a ni oxyde ni hydroxyde de fer ferrique, d'aluminium ou de manganèse, à 100 lorsque la roche n'est composée que de ces oxydes et hydroxydes.

1.2.2. Les paramètres d'appauvrissement du milieu d'altération

Deux paramètres prennent en compte l'appauvrissement en éléments mobiles sous l'effet de l'hydrolyse et de la lixiviation, avec formation de nouvelles phases minérales.

(5) **L'indice de lixiviation potentielle (ILP)**

$$ILP = \frac{(\text{Gib} + \text{Bœ})100 + (\text{Kand})75 + (\text{Sil.al}^{\circ} \text{Ca-alc})50 + (\text{Sil.al}^{\circ} \text{FeMg})25}{\text{Gib} + \text{Bœ} + \text{Cor} + \text{Sil}}$$

(6) **Le degré virtuel d'altération de la roche (DVAR)**

$$DVAR = \frac{(\text{Gib} + \text{Bœ} + \text{Si.am})100 + (\text{Kand})75 + (\text{Sil.al}^{\circ} \text{Ca-alc})50 + (\text{Sil.al}^{\circ} \text{FeMg})25}{\text{Gib} + \text{Bœ} + \text{Cor} + \text{Sil} + \text{Qtz} + \text{Si.am}}$$

[N.B. : Gib : Gibbsite; Bœ : Bœhmite; Cor : Corindon; Kand : Kandites; Sil : Silicates; Sil.al^o : Silicates d'altération; Ca-alc : calcoalcalins; FeMg : ferromagnésiens; Qtz : Quartz; Si.am : Silice amorphe.]

Le paramètre ILP concerne l'attaque hydrolytique des silicates et la lixiviation de leurs éléments migrants. Il indique le degré de transformation des silicates, allant des silicates primaires aux hydroxydes d'aluminium. Les coefficients de pondération qui marquent son expression tiennent compte de l'ordre décroissant de résistance des silicates primaires établi par Goldich (1938) et de l'ordre d'apparition des minéraux secondaires conforme à la suite évolutive définie par Pédro et Delmas (1971).

Le paramètre DVAR tient compte de la présence du quartz qui est réputé résistant à la dégradation mais dont la dissolution partielle ou totale par l'eau se manifeste, dans le cortège de minéraux virtuels, par la présence de la silice amorphe. Les coefficients de pondération qui interviennent dans son expression ont à peu près la même signification théorique que celle qui leur est attachée dans l'expression de l'ILP.

Dans l'ILP seuls les silicates sont concernés, dans le DVAR, c'est l'ensemble de la roche, qui est pris en compte.

I.2.3. Le paramètre de caractérisation du milieu d'altération

Un paramètre caractérise le milieu de formation des produits d'altération qui est soit ouvert donc propice à la migration des éléments mobiles et à l'évolution des silicates vers la monosiallisation et l'allitisation, soit fermé ou confiné donc, défavorable à cette migration et favorable à l'évolution des silicates vers la bisiallisation.

(7) L'indice de confinement potentiel (ICP) ou degré virtuel d'hydromorphie

$$\text{ICP} = \frac{(\text{Silicates} + \text{Corindon} - \text{Kandites})}{\text{Gibbsite} + \text{Bœhmite} + \text{Corindon} + \text{Silicates d'altération}} \times 100$$

Les valeurs de ce paramètre varient de zéro, lorsque l'hydrolyse de tous les silicates de la roche originelle a conduit à la formation des kandites et/ou des oxyhydroxydes d'aluminium, à cent, lorsque la roche silicatée ne contient ni kaolinite, ni oxyhydroxyde d'aluminium. Dans l'une ou l'autre extrémité, le milieu est ouvert ou fermé.

I.2.4. Paramètres absolus et paramètres relatifs

Les trois derniers paramètres présentés ci-dessus concernent la phase silicatée des roches. Ce sont des *paramètres absolus* qui ne s'appliquent à l'ensemble de la roche considérée que lorsque les constituants chimiques majeurs ont été intégralement pris en compte au cours des reconstitutions minérales, ce qui n'est pas toujours le cas. Il convient alors de quantifier le degré de prestation de ces constituants à la restructuration normative altérologique, degré appelé **rapport altérologique** (ra) et qui s'exprime ainsi qu'il suit :

$$ra = \frac{\%aT - \%Tr}{\%aT};$$

[N.B. : %aT : pourcentage analytique total ou pourcentage initial cumulé de tous les constituants chimiques majeurs; %Tr : pourcentage total résiduel ou pourcentage cumulé de tous les constituants majeurs non pris en compte au cours des reconstitutions minérales.]

Les valeurs des paramètres absolus doivent être pondérées par le rapport ainsi déterminé, ce qui ramène à une plus juste considération, l'incidence des phénomènes altérologiques sur l'ensemble de la roche considérée. Les valeurs pondérées sont alors celles des *paramètres relatifs*.

II. SELECTION DES ARGILES INDUSTRIELLES

II.1. Exigences qualitatives

II.1.1. Facteurs de sélection

Les principaux facteurs à prendre en compte dans la sélection des argiles kaoliniques utilisables dans l'industrie, dont Berton et Le Berre (1983) donnent un aperçu général, sont à la fois qualitatifs (nature, minéralogie, etc.) et quantitatifs (importance du gisement, taille minimale exploitable, etc.). Il en existe bien d'autres (propriété foncière, localisation, mode de gisement susceptible de conduire à une exploitation à ciel ouvert ou en galerie souterraine, etc.). La teneur pondérale en kaolinite de la matière brute doit être supérieure à 20 %, celle en quartz inférieure à 15 % et celle en fer oxydé inférieure à 10 %. De nombreux autres critères, à l'exclusion de la minéralogie, sont pris en considération dans la sélection de ces argiles, en particulier les propriétés rhéologiques avant et après délamination, la blancheur avant et après blanchiment à l'hypochlorite de sodium, la granularité et les proportions granulométriques des éléments inférieurs à 40 μm , la viscosité, les teneurs en quartz et micas éventuellement commercialisables, en matières volatiles, en matières solubles, en fer ferrique, en titane, en cuivre, en manganèse, etc.. Seules les exigences qualitatives, minéralogiques et paramétriques seront prises en considération, car l'objectif est de tester et de proposer l'outil normatif, d'usage rapide et simple, applicable lorsque sont disponibles les résultats d'analyses chimiques des éléments majeurs, effectuées de préférence après élimination de la fraction grossière sablo-limoneuse (supérieure à 2 μm).

II.1.2. Principales applications industrielles des argiles kaoliniques

Les argiles kaoliniques ont de nombreuses applications industrielles dont les principales sont la fabrication des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques. Ces argiles améliorent ou apportent, suivant le cas, certaines propriétés au produit fini et permettent d'en abaisser le coût de production (Berton et Le Berre, 1983). Le cas de la céramique fine, qui s'inscrit également dans ce cadre, a déjà été examiné (Ekodeck et Kamgang 2001).

II.1.2.1 Cas des caoutchoucs

Les argiles kaoliniques améliorent la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion et la rigidité des caoutchoucs qui entrent ainsi dans la fabrication des pneumatiques, des revêtements de sols, des gaines de câbles, des semelles de chaussures, etc..

II.1.2.2 Cas du papier

Les argiles kaoliniques sont utilisées comme charge et pour le couchage. En charge, ils combler les interstices entre les fibres de cellulose pour en améliorer la blancheur, l'opacité, l'imperméabilité, la réceptivité à l'encre, la stabilité dimensionnelle et surtout pour en réduire le coût. Le couchage, dépôt d'un revêtement d'argile kaolinique une fois la feuille de papier constituée, a pour effet d'en améliorer les propriétés de surface par le masquage des irrégularités, l'augmentation de la blancheur et l'amélioration de l'aptitude à l'impression.

II.1.2.3 Cas des peintures

Les argiles kaoliniques, chimiquement inertes, ont de bons pouvoirs de recouvrement et donnent les propriétés d'écoulement désirées. Du fait de leur blancheur, elles remplacent partiellement les pigments de coût très élevé. Leur commercialisation permet leur utilisation dans diverses peintures dans un grand intervalle de granularité, la granularité grossière donnant des peintures à fini mat, et la granularité fine, des peintures brillantes.

II.1.2.4 Cas des plastiques

Les argiles kaoliniques, très utilisées dans les plastiques, permettent d'obtenir des surfaces très lisses, une bonne stabilité dimensionnelle et une bonne résistance aux acides. Les plastiques ainsi traités entrent dans la fabrication des tubes et gaines en PVC de pièces d'automobiles et de coques de bateaux.

II.2. Possibilités altérologiques

L'altérologie normative peut apporter des renseignements dignes d'intérêt, tant du point de vue de la composition minéralogique, que de celui des paramètres altérologiques.

II.2.1. Exploitation de la composition minéralogique virtuelle

II.2.1.1. Affinités entre composition normative et composition réelle ou effective

La composition minéralogique effective des produits d'altération, dont la grande variabilité résulte des déplacements permanents des équilibres chimiques dans les conditions thermodynamiques de l'interface continentale, est difficile à établir malgré les perfectionnements technologiques que l'on a pu observer au cours des trois dernières décennies. A l'exclusion de la méthode pétrochimique combinée, proposée par Lelong (1967), qui est une forme de démarche normative, peu de méthodes de détermination de la composition minéralogique quan-

titative complète des produits d'altération sont connues, même si on a pu relever les démarches à affinité normative d'Edou Minko et Trescases (1990) ou de Boulangé (*in* Kamgang, 1998), ou encore les déterminations quantitatives réelles à l'instar de ceux sur les matériaux de profils bauxitiques de Tardy (*in* Carvalho *et al.*, 1997). La plupart des résultats des travaux cités ci-dessus ont été comparés à ceux obtenus de la méthode normative (Ekodeck, 1989; Ekodeck et Kamgang, 2002).

Les résultats minéralogiques de la méthode pétrochimique combinée de Lelong (1967, 1969) ont été comparés à ceux obtenus de la méthode normative. Pour les matériaux des profils sur roches acides, l'équation de la droite de régression des données exprimées en pourcentages pondéraux, tous minéraux confondus a l'expression suivante, discrimination étant faite entre le fer ferreux et le fer ferrique lors de la réalisation des analyses chimiques :

$$(1) Y = 0,93X + 1,40; r = 0,951; N = 207$$

Dans le cas où le fer est totalisé en fer ferrique, l'équation de la droite de régression a pour expression :

$$(2) Y = 0,74X + 4,36; r = 0,749; N = 322$$

D'autres comparaisons ont été effectuées pour le quartz et/ou les alumino-silicates des sols sur roches acides, basiques et ultrabasiques, entre les données pondérales réelles et les résultats normatifs. Les équations respectives des droites de régression, tous minéraux confondus, ont pour expressions :

$$(3) Y = 0,76X + 3,23; r = 0,972; N = 54 \text{ (roches acides : Leprun, 1979)}$$

$$(4) Y = 0,61X - 0,98; r = 0,634; N = 46 \text{ (roches basiques : Pion, 1979)}$$

$$(5) Y = 1,04X - 0,15; r = 0,991; N = 12 \text{ (roches ultrabasiques : Trescases, in Lelong et al., 1976)}$$

Pour les résultats observés dans les cas des matériaux des profils bauxitiques, les équations des droites de régression, tous minéraux confondus sont les suivantes :

$$(6) Y = 0,999X - 0,040; r = 0,99983; N = 54 \text{ (orthobauxite rouge)}$$

$$(7) Y = 1,015X - 0,116; r = 0,99975; N = 84 \text{ (métabauxite blanche)}$$

Dans toutes ces relations, Y correspond aux données pondérales des auteurs cités ci-dessus et X à celles de la méthode normative; r est le coefficient de corrélation

globale et N le nombre de couples de données. La pente des droites de régression est proche de 1, et l'ordonnée à l'origine proche de 0. Les valeurs des coefficients de corrélation, à une exception près, sont comprises entre 0,700 (correspondance acceptable) et 1,000 (correspondance parfaite). Une bonne convergence des résultats se dégage de toutes ces comparaisons.

II.2.1.2. Autres comparaisons de compositions minéralogiques

Parmi les évaluations minéralogiques quantitatives des matériaux argileux prélevés sur des profils d'altération habituellement effectuées au Département de Chimie Inorganique de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, on peut signaler la démarche de Njopwouo (1984, 1986, 1988a et b). Les diverses phases minérales présentes dans les échantillons y sont identifiées par diffraction des rayons X et par analyse thermique différentielle. Pour leur quantification, les données d'analyses chimiques par fluorescence X et d'analyses thermogravimétriques puis, le cas échéant, celles relatives au dosage du soufre et du fer ferreux pour les minéraux renfermant ces éléments sont prises en compte. Les calculs et bilans minéralogiques sont alors effectués sur la base de l'équation suivante :

$$T_a = \sum_{i=1}^n M_i \cdot P_i(a)$$

[N.B. : T_a = teneur en % de l'élément a dans le matériau; M_i = teneur en % du minéral i dans le matériau; $P_i(a)$ = proportion de l'élément a dans le minéral i.]

On peut également signaler la démarche de Liboum (2001) qui associe les analyses chimiques par attaque triacide et par fluorescence X, les analyses thermique différentielle et par diffraction des rayons X, pour aboutir à des évaluations quantitatives. Ainsi, le résidu de l'attaque triacide est assimilé au quartz, la teneur en kandites est déduite de la détermination de la silice combinée, celle en hydroxydes libres d'alumine de la différence entre l'alumine totale et l'alumine combinée dans les kandites. La teneur en fer est exprimée sous forme de goëthite, celle en kaolinite résultant de l'analyse thermopondérale.

Dans chacune de ces démarches, l'établissement de la composition minéralogique exacte des mélanges de grande variabilité présente des incertitudes. Les artifices normatifs gardent ainsi toute leur validité. Les résultats des travaux cités ci-dessus (Njopwouo 1984, 1986, 1988a et b; Liboum 2001), auxquels s'ajoutent non seulement ceux de Njopwouo et Wandji (1988)

mais aussi ceux de Téjiogap et al (2001), ont été comparés à ceux obtenus de la méthode normative (Ekodeck et Kamgang 2002). Ces comparaisons n'ont concerné en fait que quelques espèces minérales communes, en l'occurrence : le quartz, le groupe kandites - hydrates d'alumine, le groupe des oxyhydroxydes de fer ferrique et de manganèse. Les équations des droites de régression des données exprimées en pourcentages pondéraux, tous échantillons confondus ont pour expressions :

(8) $Y = 0,69X - 1,11$; $r = 0,846$; $N = 32$ (quartz; fig.1)

(9) $Y = 0,82X + 17,83$; $r = 0,802$; $N = 32$ (kandites - hydrates d'alumine; fig.2)

(10) $Y = 0,97X + 0,99$; $r = 0,972$; $N = 32$ (oxyhydroxydes de fer ferrique et de manganèse; fig.3)

(11) $Y = 1,02X - 0,45$; $r = 0,879$; $N = 96$ (synthèse des trois cas ci-dessus; fig.4)

Les résultats exclusifs des travaux de Njopwouo (1984, 1986, 1988a et b) et de Njopwouo et Wandji (1988) ont été comparés à ceux obtenus de la méthode normative (Ekodeck et Kamgang, 2002). Ces comparaisons ont concerné globalement les espèces minérales communes suivantes : le quartz, les aluminosilicates potassiques, le groupe kandites - hydrates d'alumine, le groupe des oxyhydroxydes de fer ferrique et de manganèse, le groupe des oxydes de titane (ilménite et anatase). L'équation de la droite de régression des données exprimées en pourcentages pondéraux, tous échantillons confondus a pour expression :

(12) $Y = 1,05X - 0,99$; $r = 0,911$; $N = 30$ (fig.5)

Dans ces équations, Y correspond aux données plurianalytiques et X aux données normatives; r est le coefficient de corrélation globale et N le nombre de couples de données. On observe une fois encore, une bonne convergence des résultats minéralogiques, la pente des droites de régression étant proche de 1, l'ordonnée à l'origine proche de 0 (à l'exclusion du cas du groupe kandites - hydrates d'alumine), et les valeurs des coefficients de corrélation étant comprises entre 0,800 et 1,000.

II.2.1.3. Intérêt dans la sélection des matériaux et protocole de sélection

Les résultats présentés ci-dessus montrent que la méthode normative est un outil de fiabilité suffisante pour la caractérisation minéralogique des produits d'altération. Cependant, deux enseignements principaux ont été tirés des observations de détail à savoir : (1)

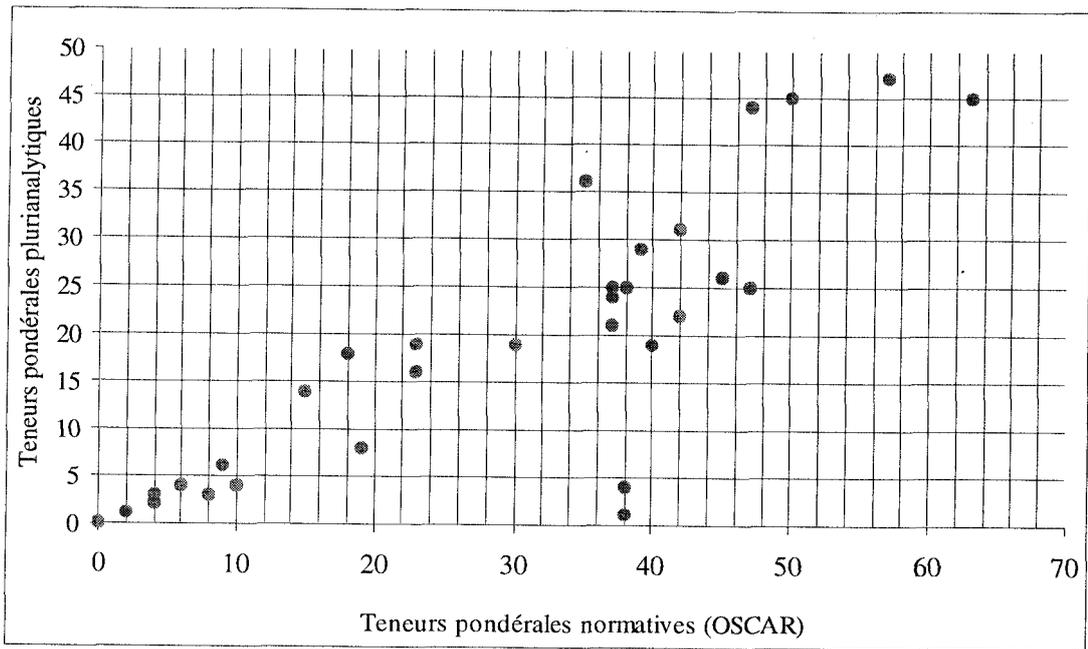


Fig. 1 : Comparaisons des résultats minéralogiques obtenus des méthodes plurianalytiques (NJOPWOUO 1984, 1986, 1988, LIBOUM 2001, NJOPWOUO et WANDJI 1988, TEJIOGAP et al 2001), (en ordonnées) et de la méthode normative altérologique (EKODECK et KAMGANG, 2002.) (OSCAR en abscisses) : cas du quartz.

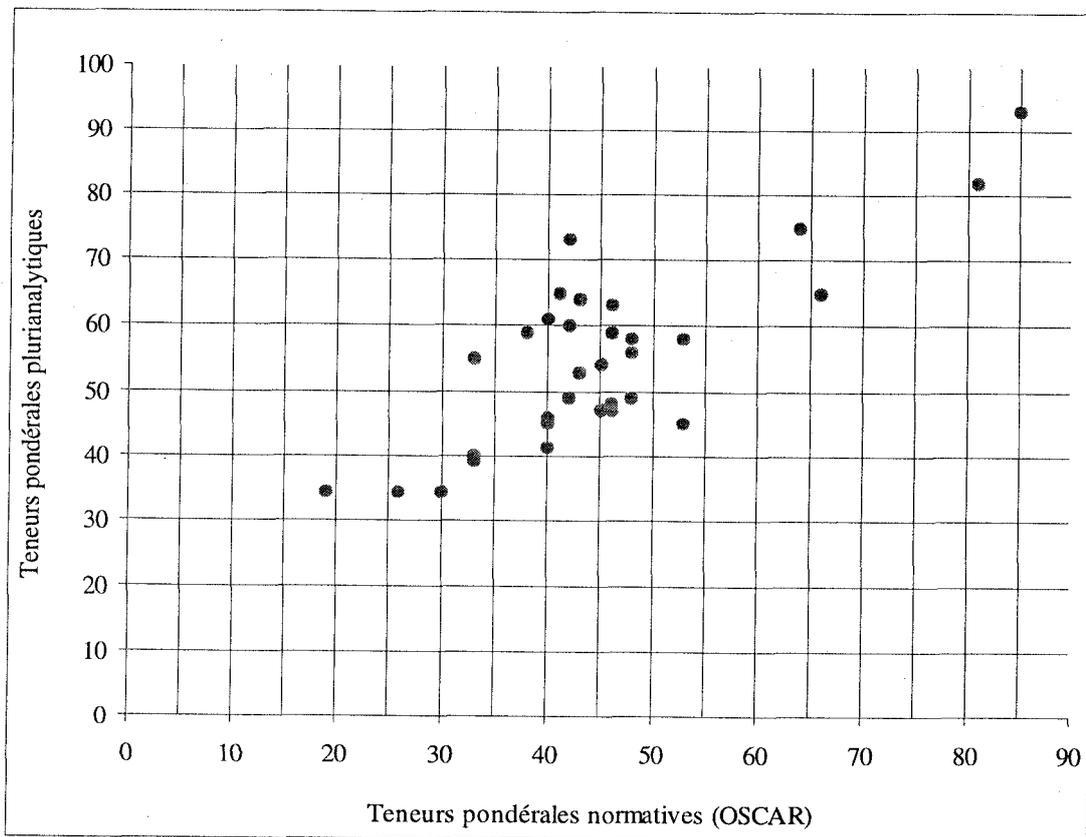


Fig. 2 : Comparaisons des résultats minéralogiques obtenus des méthodes plurianalytiques (NJOPWOUO 1984, 1986, 1988, LIBOUM 2001, NJOPWOUO et WANDJI 1988, TEJIOGAP et al 2001), (en ordonnées) et de la méthode normative altérologique (EKODECK et KAMGANG, 2002.) (OSCAR en abscisses) : cas du groupe kandites - hydrates d'alumine.

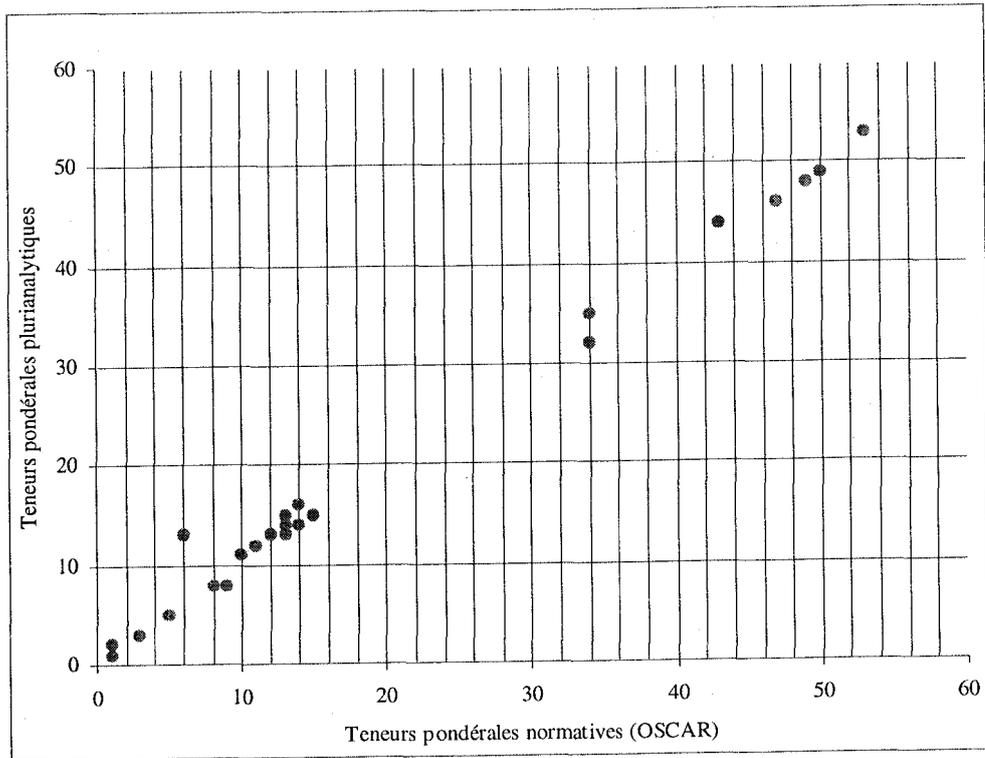


Fig. 3: Comparaisons des résultats minéralogiques obtenus des méthodes plurianalytiques (NJOPWOUO 1984, 1986, 1988, LIBOUM 2001, NJOPWOUO et WANDJI 1988, TEJIOGAP et al 2001), (en ordonnées) et de la méthode normative altérologique (EKODECK et KAMGANG, 2002.) (OSCAR en abscisses) : cas du groupe oxyhydroxydes de fer ferrique et de manganèse.

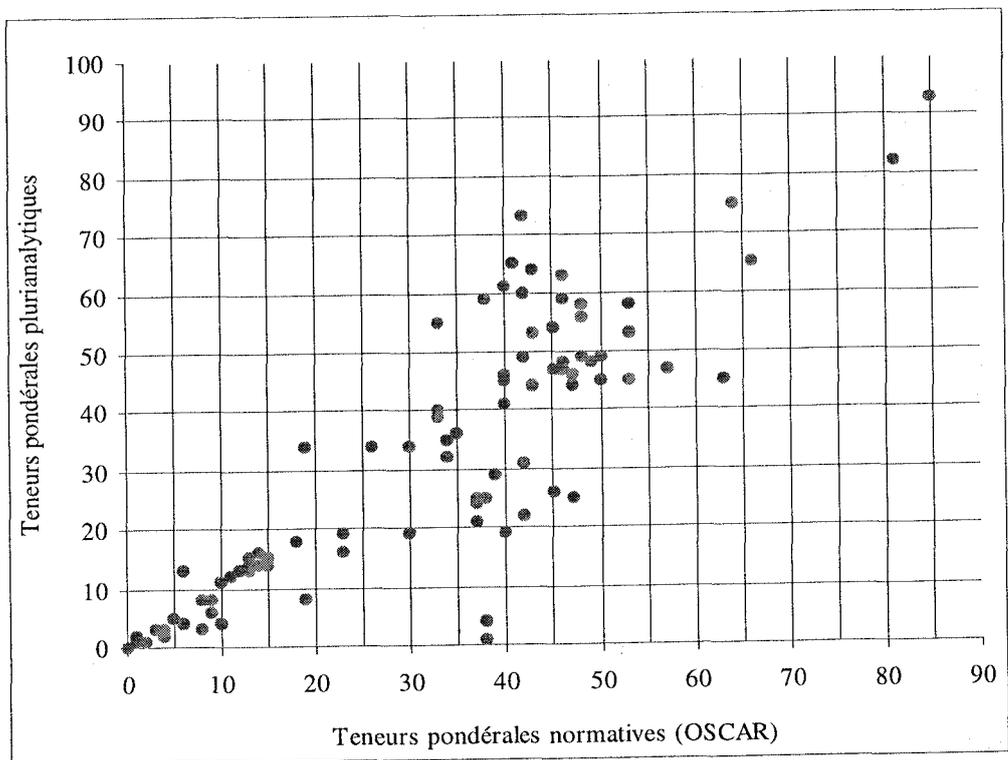


Fig. 4 : Comparaisons des résultats minéralogiques globaux obtenus des méthodes plurianalytiques (NJOPWOUO 1984, 1986, 1988, LIBOUM 2001, NJOPWOUO et WANDJI 1988, TEJIOGAP et al 2001), (en ordonnées) et de la méthode normative altérologique (EKODECK et KAMGANG, 2002.) (OSCAR en abscisses), pour le quartz, le groupe kandites - hydrates d'alumine et le groupe oxyhydroxydes de fer ferrique et de manganèse.

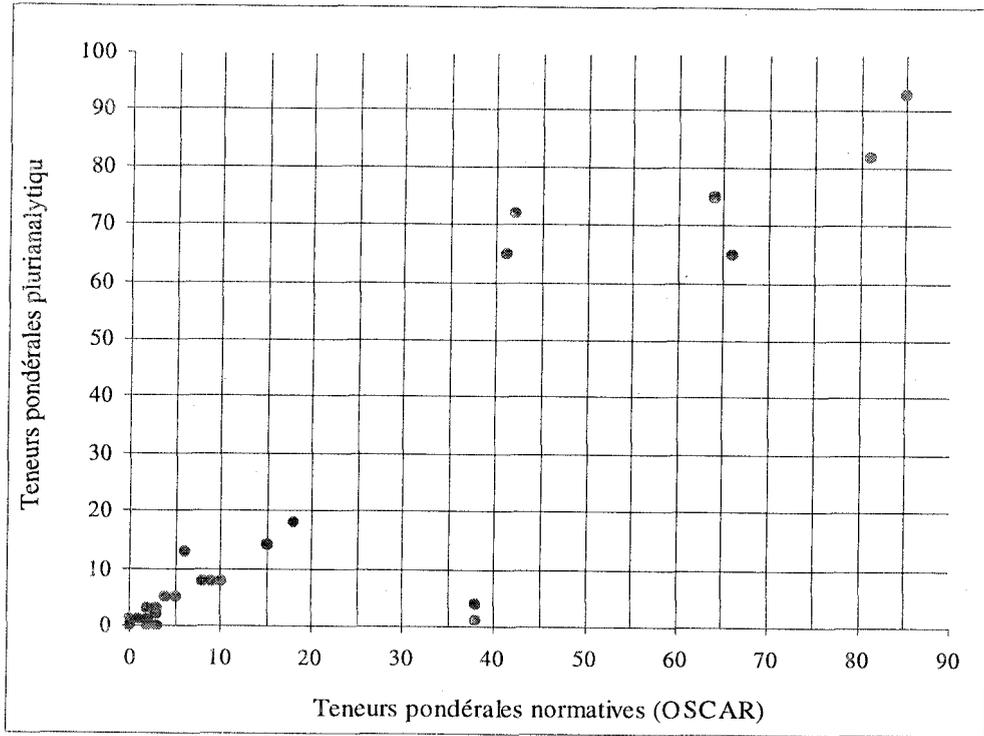


Fig. 5 : Comparaisons des résultats minéralogiques globaux obtenus des méthodes plurianalytiques (NJOPWOUO 1984, 1986, 1988), (en ordonnées) et de la méthode normative altérologique (EKODECK et KAMGANG, 2002.) (OSCAR en abscisses), pour le quartz, les aluminosilicates potassiques, le groupe kandites - hydrates d'alumine, le groupe des oxyhydroxydes de fer ferrique et de manganèse, le groupe des oxydes de titane (ilménite et anatase).

que la non discrimination entre le fer ferreux et le fer ferrique dans les analyses chimiques peut conduire à la surestimation du quartz et des oxyhydroxydes ferriques, en raison de la non reconstitution des silicates ferreux normatifs; (2) qu'il est souvent préférable d'associer les espèces minérales par affinité (comme la kaolinite et la gibbsite) ou par familles (silicates potassiques, silicates calciques et sodiques, ou encore silicates ferreux et magnésiens) dans les comparaisons des données, au lieu de considérer les espèces minérales séparément. Il résulte de ces observations que les exigences minéralogiques rapportées plus haut, dans le choix des matériaux à usage industriel pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques, peuvent être examinées à la lumière de la composition minéralogique normative. Ainsi, le matériau est inutilisable pour une teneur en oxyhydroxydes de fer et en quartz supérieure ou égale à 12,5 % et à 15 % respectivement, et pour une teneur de l'ensemble kaolinite - hydrates d'alumine inférieure à 37,5 %. Les données concernant les silicates anhydres calco-alcalins représentent les feldspaths, alors que celles relatives aux hydrosilicates ferromagnésiens et calco-alcalins représentent les phyllites de type 2/1 (hydromicas, illites, chlorites et smectites). Pour les uns, les teneurs

supérieures à 10 % rendent les matériaux inutilisables, alors que pour les autres, cette limite doit être de 5 %. La démarche de sélection est présentée dans le tableau 1.

II.2.2. Exploitation des paramètres d'altération

Parmi les sept paramètres présentés plus haut, ceux qui peuvent apporter des renseignements dignes d'intérêt dans la sélection des argiles industrielles sont successivement : l'importance potentielle du fer libre (IFL), l'indice relatif de confinement potentiel (IRCP), l'indice relatif de lixiviation potentielle (IRLP) et le degré virtuel relatif d'altération de la roche (DVRAR).

Dans tous les cas de production pris en compte (caoutchoucs, papier, peintures et plastiques), la teneur en Fe_2O_3 devant être inférieure à 10 %, les valeurs des oxyhydroxydes et de l'IFL doivent être légèrement supérieures à celles du Fe_2O_3 . La valeur limite maximale pourrait être fixée à 12,5 % pour les oxyhydroxydes, et 15 % pour l'IFL. La valeur de l'IRCP doit être comprise entre 0 et 50 %, celle de l'IRLP doit être supérieure à 70 % et celle du DVRAR supérieure à 62,5 %. Le tableau 2 présente la démarche de sélection.

Tableau 1 : Protocole de sélection minéralogique des matériaux pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques.

CRITERES				MATERIAU		
Oxyhydrox. de Fe \geq 12,5 %				à proscrire		
Oxyhydrox. de Fe < 12,5 %	Quartz \geq 15%			à proscrire		
	Quartz < 15%	Sil.anh. Ca-alc et FeMg \geq 10%		à proscrire		
		Sil.anh. Ca-alc et FeMg < 10%	Hydrosil. Ca-alc et FeMg \geq 5%		à proscrire	
			Hydrosil. Ca-alc et FeMg < 5%	Kand. et Hydr.Al \leq 37,5%		à proscrire
				Kand. et Hydr.Al > 37,5%		<u>bon pour caoutchoucs, papier, peintures et plastiques.</u>

N.B. : Sil.anh.Ca-alc+FeMg : Silicates anhydres calco-alcalins et ferro-magnésiens ;
 Hydrosil.Ca-alc+FeMg : Hydrosilicates calco-alcalins et ferro-magnésiens ;
 Kand.+Hydr.Al : Kandites (kaolinite, halloysite) et hydrates d'alumine.

Tableau 2 : Protocole de sélection paramétrique des matériaux pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques.

CRITERES				MATERIAU	
IFL \geq 15%				à proscrire	
IFL < 15%	IRCP \geq 50%			à proscrire	
	IRCP < 50%	IRLP \leq 70%		à proscrire	
		IRLP > 70%	DVRAR \leq 62,5%		à proscrire
			DVRAR > 62,5%		<u>bon pour caoutchoucs, papier, peintures et plastiques.</u>

N.B. : IFL : Importance du fer ferrique libre ; IRCP : Indice relatif de confinement potentiel ; IRLP : Indice relatif de lixiviation potentielle ; DVRAR : degré virtuel relatif d'altération de la roche.

II.2.3. Protocoles de sélection des matériaux

Les critères de sélection des matériaux utilisables dans la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques étant principalement d'ordre minéralogique, les critères minéralogiques constituent

les premiers guides dans cette sélection. Les paramètres sont des guides de second ordre. Ils jouent un rôle d'appoint. En tout état de cause, la convergence des prescriptions doit être déterminante dans le choix de l'option finale.

III. PRESENTATION DE QUELQUES CAS TYPIQUES

III.1. Critères de sélection des cas typiques et présentation des données

Le manteau d'altération, qui montre une très grande variabilité des basses aux hautes latitudes (Strakhov, 1967, *in* Lyon Associates Inc., 1971), présente généralement dans son organisation verticale la succession suivante des matériaux au-dessus de la roche mère non altérée : (1) la zone de démarrage de

l'altération, souvent appelée lithomarge, avec des fragments de roches ; (2) la zone d'altération faible d'hydromorphie dans laquelle se développent les phyllites 2/1; (3) la zone d'altération franche ou zone altéritique, dans laquelle se forment des phyllites 1/1, subdivisée en sous-zone isaltéritique avec conservation de la texture de la roche originelle et sous-zone allotéritique sus-jacente sans conservation de ladite texture ; (4) la zone d'accumulation des oxyhydroxydes d'aluminium ou de fer ferrique, pouvant aboutir à la formation de cuirasses; (5) la zone de matériaux meubles

Tableau 3 : Composition chimique de quelques cas typiques du Cameroun et de la Guinée Conakry.

Cameroun : Données de NJOPWOUO (1984, 1986, 1988a et b) et de NJOPWOUO et WANDJI (1988).

N° échantillon	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
Ba	48.34	28.63	8.98	0.03	0.00	0.03	0.03	0.02	3.19	0.00	0.41	0.00
Baff	39.70	35.80	11.80	0.00	0.00	0.02	0.03	0.02	4.45	0.00	0.30	0.00
Bo	48.01	27.41	9.82	0.31	0.12	0.06	0.02	0.41	7.11	0.21	2.34	0.00
Boff	41.34	33.54	11.50	0.15	0.00	0.05	0.04	0.26	7.47	0.00	1.41	0.00
Mu	34.29	28.53	21.65	0.38	0.18	0.21	0.05	0.35	8.34	2.20	2.35	0.44
Mi	38.54	27.43	15.84	0.41	0.09	0.09	0.06	0.21	5.36	2.30	7.72	0.79

Cameroun : Données de TEJIOGAP et al. (2001).

N° échantillon	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
Able	69.37	17.99	6.70	0.21	0.01	0.00	0.00	1.50	1.62	0.00	0.03	0.00
Ablt	68.63	19.41	6.70	0.23	0.01	0.00	0.00	1.52	2.17	0.00	0.05	0.00
Abl*e	55.19	32.17	5.62	0.48	0.00	0.00	0.00	2.47	1.32	0.00	0.03	0.00
Abl*ef	69.25	19.07	9.42	0.38	0.00	0.00	0.00	2.11	1.10	0.00	0.06	0.00
Abl*t	69.25	20.11	5.80	0.42	0.00	0.02	0.00	2.33	1.20	0.00	0.08	0.00
Abl*tf	56.00	29.52	9.13	0.47	0.00	0.00	0.00	2.45	1.36	0.00	0.04	0.02

Cameroun : Données de LIBOUM (2001).

N° échantillon	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
Liah1	49.40	23.90	12.20	0.07	0.03	0.00	0.00	0.08	12.40	0.00	1.50	0.20
Liah2	25.50	20.40	12.30	0.08	0.05	0.05	0.00	0.04	38.60	0.00	0.90	0.25
Liav1	48.90	24.00	12.90	0.12	0.03	0.04	0.00	0.13	11.90	0.00	1.50	0.24
Liav2	24.50	19.40	11.90	0.08	0.03	0.03	0.00	0.06	42.30	0.00	1.00	0.28
Liay1	47.60	24.30	13.10	0.11	0.05	0.04	0.00	0.12	12.70	0.00	1.40	0.20
Liay2	33.10	22.00	12.90	0.10	0.05	0.04	0.00	0.05	30.30	0.00	1.10	0.30
Liba1	51.00	23.40	12.90	0.10	0.03	0.05	0.00	0.12	10.50	0.00	1.50	0.20
Liba2	22.90	18.30	12.60	0.10	0.05	0.05	0.00	0.00	44.40	0.00	1.00	0.32
Licu1	54.00	22.00	11.50	0.13	0.03	0.03	0.00	0.14	10.50	0.00	1.50	0.21
Lick1	55.70	23.40	10.50	0.12	0.04	0.04	0.00	0.13	11.40	0.00	1.20	0.16
Lifb1	53.20	21.80	11.20	0.13	0.13	0.06	0.00	0.14	11.90	0.00	1.70	0.25
Lifb2	35.30	20.20	12.30	0.12	0.29	0.04	0.00	0.08	30.00	0.00	1.30	0.32
Liko1	52.00	24.20	11.70	0.12	0.03	0.04	0.00	0.14	9.80	0.00	1.60	0.24
Liko2	23.50	19.00	12.10	0.10	0.05	0.04	0.00	0.04	43.70	0.00	1.10	0.33
Limf1	50.30	24.70	12.30	0.10	0.04	0.06	0.00	0.10	10.70	0.00	1.50	0.20
Limf2	24.00	17.50	11.90	0.12	0.03	0.03	0.00	0.05	44.80	0.00	1.30	0.29
Limv1	50.30	23.30	11.70	0.10	0.04	0.05	0.00	0.08	13.00	0.00	1.40	0.17
Limv2	21.00	16.50	12.40	0.08	0.04	0.06	0.00	0.20	47.50	0.00	0.79	0.32
Link1	52.30	23.60	11.50	0.14	0.02	0.04	0.20	0.24	9.30	0.00	1.60	0.24
Ling2	22.60	18.80	11.90	0.08	0.04	0.06	0.00	0.05	45.00	0.00	1.10	0.30

Guinée Conakry : Profil sur syénite néphélinique – Données de MILLOT et BONIFAS (1955).

N° échantillon	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
Mb5	5.40	44.30	24.50	0.00	0.10	0.20	0.00	0.00	23.10	0.20	1.40	0.00
Mb4	0.40	58.50	30.90	0.00	0.10	0.40	0.00	0.00	6.40	0.50	2.10	0.00
Mb3	3.30	56.00	29.70	0.00	0.10	0.20	0.00	0.00	7.20	0.80	1.70	0.00
Mb2	58.02	21.70	3.10	0.40	0.10	0.40	4.00	8.10	2.90	0.60	0.60	0.00
Mb1rm	57.30	17.50	1.30	1.10	0.40	2.60	6.00	7.00	4.90	1.50	0.70	0.00

(1rm : syénite néphélinique fraîche; 2 : syénite néphélinique en voie d'altération; 3 : faciès "pierre ponce"; 4 : bauxite rose; 5 : cuirasse bauxitique ferrugineuse)

Tableau 4 : Eléments de compositions minéralogiques pour les différents échantillons. (N.B. : Al.Sil : aluminosilicates; Sil : silicates; Kaol : Kaolinite; Gibb : Gibbsite; Oxyhy : Oxyhydroxydes; mpa : méthode plurianalytique; mna : méthode normative altérologique).

Cameroun : Données de NJOPWOUO (1984, 1986, 1988a et b) et de NJOPWOUO et WANDJI (1988).

N° échantillon	Quartz + Sil.am.		Al.Silic.K		Al.Silic Ca.Na		Silic. Fe.Mg.		Kand. + Gibbs.		Oxyhy. de Fe. et de Mn		Ilménite + Anatase	
	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna
Ba	18.0	18.4	0.5	0.0		0.4		0.1	75.1	63.9	3.2	3.2	0.4	0.4
Baff	0.3	0.4	0.5	0.0		0.0		0.0	93.3	84.6	4.5	4.5	0.3	0.3
Bo	14.1	15.3	0.4	3.2		0.4		0.7	65.3	66.0	7.9	7.5	2.5	2.1
Boff	1.0	2.2	0.0	2.4		0.8		0.4	82.1	80.7	8.3	7.5	1.4	1.4
Mu	0.5	38.2	2.1	3.2		0.4		0.9	72.9	41.7	8.3	9.2	4.5	4.4
Mi	4.0	38.0	1.2	1.6		0.4		0.9	65.3	40.9	12.6	6.1	7.7	10.0

Cameroun : Données de TEJIOGAP et al. (2001).

N° échantillon	Quartz + Sil.am.		Al.Silic.K		Al.Silic Ca.Na		Silic. Fe.Mg.		Kand. + Gibbs.		Oxyhy. de Fe. et de Mn		Ilménite + Anatase	
	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna
Able	47.2	56.5	13.0	12.7		0.0		0.5	34.4	25.8	1.6	0.5	0.1	0.0
Ablt	44.7	50.2	12.6	12.7		0.0		0.6	38.5	32.8	2.1	0.6	0.1	0.1
Abl*e	19.2	30.2	21.0	20.7		0.0		1.1	54.8	32.5	1.3	1.3	0.1	0.0
Abl*ef	45.0	62.8	17.9	17.5		0.0		0.9	33.5	18.9	1.0	1.2	0.1	0.1
Abl*t	43.5	46.8	19.7	19.9		0.0		0.9	34.4	30.1	1.1	1.4	0.2	0.1
Abl*tf	19.0	22.9	20.7	20.7		0.0		1.1	58.3	52.7	1.3	1.4	0.1	0.0

Cameroun : Données de LIBOUM (2001).

N° échantillon	Quartz + Sil.am.		Al.Silic.K		Al.Silic Ca.Na		Silic. Fe.Mg.		Kand. + Gibbs.		Oxyhy. de Fe. et de Mn		Ilménite + Anatase	
	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna
Liah1	21.3	37.4		0.8		0.0		0.2	62.6	45.9	14.0	13.9		1.5
Liah2	4.2	6.2		0.0		0.0		0.2	48.5	47.5	43.7	42.9		0.9
Liav1	22.3	41.6		0.8		0.0		0.3	60.1	42.0	14.8	13.2		1.5
Liav2	2.7	4.0		0.8		0.0		0.2	47.9	46.2	45.9	47.0		1.0
Liay1	19.1	39.8		0.8		0.0		0.3	64.2	42.9	15.6	14.2		1.4
Liay2	8.4	18.8		0.8		0.0		0.2	54.4	45.0	31.5	33.7		1.1
Liba1	24.7	46.9		0.8		0.0		0.2	59.3	38.3	13.2	11.7		1.5
Liba2	5.6	8.8		0.0		0.0		0.2	41.4	39.9	49.3	49.6		1.0
Licu1	26.4	45.1		0.8		0.0		0.3	61.3	40.4	12.6	11.7		1.5
Liek1	35.5	34.7		0.8		0.0		0.3	45.4	52.7	13.3	12.7		1.2
Lifb1	31.0	41.8		0.8		0.0		0.3	49.2	42.2	13.7	13.4		1.7
Lifb2	16.2	23.0		0.8		0.0		0.3	45.7	40.4	34.7	33.8		1.3
Liko1	25.0	37.5		0.8		0.0		0.3	58.1	48.4	11.7	10.9		1.6
Liko2	2.4	4.1		0.0		0.0		0.2	46.7	45.5	47.6	48.7		1.1
Limf1	25.1	37.2		0.8		0.0		0.2	55.9	48.0	12.5	12.0		1.5
Limi2	3.1	7.9		0.8		0.0		0.3	45.0	39.6	48.9	49.8		1.3
Limv1	23.8	36.6		0.8		0.0		0.2	59.0	46.3	15.0	14.5		1.4
Limv2	3.5	10.3		1.6		0.0		0.2	39.5	32.7	53.0	53.0		0.8
Link1	28.5	39.4		2.4		1.3		0.4	53.2	43.4	11.4	10.3		1.6
Ling2	1.2	2.1		0.8		0.0		0.2	46.7	45.3	48.9	50.1		1.1

Guinée Conakry : Profil sur syénite néphélinique – Données de MILLOT et BONIFAS (1955).

(1rm : syénite néphélinique fraîche; 2 : syénite néphélinique en voie d'altération; 3 : faciès «pierre ponce»; 4 : bauxite rose; 5 : cuirasse bauxitique ferrugineuse).

N° échantillon	Quartz + Sil.am.		Al.Silic.K		Al.Silic Ca.Na		Silic. Fe.Mg.		Kand. + Gibbs.		Oxyhy. de Fe. et de Mn		Ilménite + Anatase	
	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna
MB-5		0.0		0.0		1.6		0.0		71.1		24.9		1.7
MB-4		0.0		0.0		1.1		0.0		88.5		7.2		2.6
MB-3		0.0		0.0		1.6		0.0		87.2		7.7		2.5
MB-2		9.8		49.5		31.3		0.9		0.0		3.0		1.2
MB-1rm		0.2		23.1		66.0		3.5		0.0		3.5		1.4

Tableau 5 : Critères et résultats des protocoles de sélection des matériaux argileux pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques.

N° de l'échantillon	Ba	Baff	Bo	Boff	Mu	Mi	Able	Ablt	Abl*e	Abl*f	Abl*t	Abl*f
Oxyhydroxydes de Fer	3.2	4.5	7.3	7.5	8.9	6.1	1.8	2.5	1.3	1.2	1.4	1.4
Quartz	18.4	0.4	15.3	2.2	22.3	35.8	56.5	50.2	30.2	57.9	46.8	22.9
Sil.anh.Ca-alc.+Fe.Mg.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Hydrosil.Ca-alc.+Fe.Mg.	0.5	0.0	4.3	3.6	4.5	3.0	13.2	13.3	21.8	18.4	20.8	21.8
Kand.+Hydr.d'Al.	63.9	84.6	66.0	80.7	41.7	40.9	25.8	32.8	32.5	18.9	30.1	52.7
Prescription minéralogique	Prosc c	Bon	Prosc c	Bon	Prosc c							
IFL	4.97	7.63	10.67	11.97	7.90	5.36	1.96	2.91	1.68	1.23	1.75	1.97
IRCP	5.59	2.70	6.13	4.87	9.81	6.68	33.83	28.86	50.47	49.40	40.87	29.26
IRLP	71.13	72.98	73.21	73.35	94.36	95.37	73.31	70.70	53.34	74.68	65.35	68.20
DVRAR	55.91	72.68	60.10	71.53	70.49	53.78	29.94	33.84	36.51	32.75	34.06	52.19
Prescription paramétrique	Prosc c	Bon	Prosc c	Bon	Bon	Prosc c						
Synthèse des prescriptions	Prosc c	Bon	Prosc c	Bon	?	Prosc c						

N° de l'échantillon	Liah1	Liah2	Liav1	Liav2	Liay1	Liay2	Liba1	Liba2	Licul	Liek1
Oxyhydroxydes de Fer	13.9	42.9	13.2	47.0	14.1	33.6	11.7	49.5	11.7	12.6
Quartz	37.4	6.2	41.6	4.0	39.8	18.8	46.9	8.8	45.1	34.7
Sil.anh.Ca-alc.+Fe.Mg.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Hydrosil.Ca-alc.+Fe.Mg.	1.0	0.2	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	0.2	1.1	1.1
Kand.+Hydr.d'Al.	45.9	47.6	42.0	46.24	42.9	45.0	38.4	39.9	40.4	52.7
Prescription minéralogique	Prosc									
IFL	14.11	48.61	12.63	53.44	13.54	34.86	10.86	51.48	11.56	14.18
IRCP	2.09	0.38	2.48	2.07	2.44	2.13	2.49	0.46	2.58	1.99
IRLP	85.59	77.86	89.85	75.83	89.59	82.46	93.57	80.58	87.56	78.29
DVRAR	47.60	68.94	45.72	69.96	47.03	58.49	42.67	66.13	41.92	47.59
Prescription paramétrique	Prosc									
Synthèse des prescriptions	Prosc									

N° de l'échantillon	Lifb1	Lifb2	Liko1	Liko2	Limfl	Limi2	Limv1	Limv2	Link1	Ling2
Oxyhydroxydes de Fer	13.2	33.5	10.9	48.6	11.9	49.8	14.1	52.9	10.3	50.0
Quartz	41.8	23.0	37.5	4.1	37.2	7.9	36.6	10.3	39.4	2.1
Sil.anh.Ca-alc.+Fe.Mg.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Hydrosil.Ca-alc.+Fe.Mg.	1.1	1.1	1.1	0.2	1.0	1.1	1.0	1.8	4.1	1.0
Kand.+Hydr.d'Al.	42.2	40.4	48.4	45.5	48.3	39.6	46.4	32.7	43.4	45.3
Prescription minéralogique	Prosc									
IFL	13.35	34.03	11.43	54.17	12.25	53.22	15.00	53.27	10.68	56.66
IRCP	2.47	2.58	2.16	0.40	2.00	2.63	2.07	5.13	8.56	2.11
IRLP	84.84	83.11	83.34	76.72	84.96	77.73	83.75	81.71	83.00	75.34
DVRAR	43.14	53.43	47.42	70.43	48.30	65.06	47.23	62.90	45.32	72.07
Prescription paramétrique	Prosc									
Synthèse des prescriptions	Prosc									

N° de l'échantillon	MB-1rm	MB-2	MB-3	MB-4	MB-5
Oxyhydroxydes de Fer	3.0	2.9	7.6	7.2	24.8
Quartz	0.2	9.8	0.0	0.0	0.0
Sil.anh.Ca-alc.+Fe.Mg.	80.9	43.8	0.0	0.0	0.0
Hydrosil.Ca-alc.+Fe.Mg.	11.7	38.0	1.6	1.1	1.6
Kand.+Hydr.d'Al.	0.0	0.0	87.2	88.5	71.1
Prescription minéralogique	Prosc	Prosc	Bon	Bon	Prosc
IFL	3.76	3.50	6.09	5.48	21.08
IRCP	100.00	100.00	1.77	1.19	2.16
IRLP	5.38	21.82	97.55	99.41	95.46
DVRAR	5.36	19.59	97.55	99.41	95.46
Prescription paramétrique	Prosc	Prosc	Bon	Bon	Prosc
Synthèse des prescriptions	Prosc	Prosc	Bon	Bon	Prosc

N.B. : Sil.anh.Ca-alc+FeMg : Silicates anhydres calco-alcalins et ferro-magnésiens ; Hydrosil.Ca-alc+FeMg : Hydrosilicates calco-alcalins et ferro-magnésiens ; Kand.+Hydr.Al : Kandites (kaolinite, halloysite) et hydrates d'alumine (boehmite, gibbsite). IFL : Importance du fer ferrique libre ; IRCP : Indice relatif de confinement potentiel ; IRLP : Indice relatif de lixiviation potentielle ; DVRAR : Degré relatif virtuel d'altération de la roche. Prosc : Proscription; Bon : bon pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques.

Les données numériques en gras indiquent les causes premières, mais non exclusives des proscriptions.

argilo-sableux ou zone éluviale, siège des phénomènes de lessivage ; (6) la zone humifère superficielle, plus ou moins importante. Ce schéma général est assorti de nombreuses variantes.

Les matériaux argileux susceptibles d'être mis en exploitation dans la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques, sont ceux relevant a priori de la zone d'altération franche décrite ci-dessus. On pourrait ajouter la zone d'accumulation des oxyhydroxydes d'aluminium, dans le cas des profils bauxitiques. Les autres zones sont constituées de matériaux soit peu altérés et riches en minéraux peu ou non transformés, soit riches en oxyhydroxydes de fer et, dans tous les cas, non indiqués pour les besoins de la cause en examen. Sont considérés ici, quelques exemples simples issus de régions situées en climat tropical humide et marquées par la brutalité de l'altération, la grande épaisseur du manteau d'altération, l'ampleur des néoformations de kaolinite et de la cristallisation des oxyhydroxydes simples tels que l'hématite, la goëthite, la bœhmite et la gibbsite. Les exemples pris en Afrique Centrale (Cameroun au Sud de l'Adamaoua) et en Afrique de l'Ouest (Guinée Conakry) sont ceux pour lesquels les résultats des analyses chimiques et/ou minéralogiques sont disponibles. Les données relatives aux résultats des analyses chimiques, éléments majeurs ont été reportées sur le tableau 3. Sur le tableau 4, ces résultats sont traduits sous forme de teneurs pondérales normatives (mna) des espèces et groupes d'espèces minérales virtuelles et, le cas échéant, assortis de résultats des évaluations pondérales plurianalytiques (mpa). Le tableau 5 présente les données minéralogiques normatives, les paramètres altérologiques ainsi que les prescriptions correspondantes d'exploitation de ces matériaux argileux pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques.

III.2. Exemples du Cameroun

III.2.1. Exemple de référence : cas des mélanges-mâtres caoutchouc-argile

Les travaux effectués par Njopwouo (1984, 1986, 1988a et b) sur des matériaux argileux provenant de quatre gisements d'argile kaolinique situés en zone d'altération latéritique ont été pris comme référence. Ils concernent les sites argileux (1) de Balengou, (Province de l'Ouest), à environ 6 km au Nord-Ouest de la ville de Bazou, aux coordonnées géographiques 4°06'N et 10°06'E, (2) de Bomkoul, (Province du Littoral), à environ 17 km au Nord-Est de la ville de Douala, aux

coordonnées géographiques 4°06'N et 9°48'E, (3) de Mussaka, (Province du Sud-Ouest), à environ 5 km au Sud-Ouest de la ville d'Ekona, aux coordonnées géographiques 4°11'N et 9°20'E et (4) de Missellélé, (Province du Sud-Ouest), à environ 15 km au Nord-Est de la ville de Tiko, aux coordonnées géographiques 4°07'N et 9°27'E. Les échantillons de matériaux provenant des gisements de Balengou et de Bomkoul sont désignés respectivement sur les tableaux 3, 4 et 5 par les numéros Ba, Bo pour les échantillons bruts, les échantillons numérotés Baff et Boff étant formés par les fractions granulométriques inférieures à 2 μ m extraites de Ba et de Bo respectivement. Quant aux échantillons provenant des gisements de Mussaka et de Missellélé, et numérotés Mu et Mi respectivement, il s'agit de la fraction fine extraite du matériau total par sédimentation dans une solution aqueuse dispersante. Les résultats minéralogiques obtenus montrent que la kaolinite est le minéral de base du matériau brut de Bomkoul, avec une teneur de 65,32 %, tandis que l'halloysite constitue le minéral essentiel du matériau de Balengou (70,41 %). Dans la fraction fine, ces teneurs passent respectivement à 82,09 et 89,71 %. L'argile de Mussaka est à base d'halloysite (72,9%), alors que celle de Missellélé est riche en kaolinite (65,3 %).

Pour l'utilisation des argiles camerounaises par voie humide comme charge renforçatrice dans le caoutchouc naturel, des mélanges-mâtres ont été réalisés par Njopwouo (1984, 1986, 1988a et b), par co-floculation d'une suspension d'argile dans l'eau et du latex liquide, en milieu acide et en présence d'un anti-oxydant, suivie du crépage et du séchage du coagulum obtenu. Ces mélanges ont été effectués avec la suspension de la fraction argileuse, de granulométrie inférieure à 2 μ m, dont le poids de charge avait un taux de 65 % par rapport au caoutchouc sec. Des essais ont ensuite été réalisés afin de situer les performances des mélanges-mâtres réalisés aux fins de comparaisons à celles du caoutchouc chargé au noir de carbone. Les résultats des essais mécaniques montrent que les valeurs de dureté, des modules de résistance et de l'allongement à la rupture sont dans l'ensemble acceptables. Pour ces matériaux, la résistance au déchirement est faible pour le mélange avec l'argile de Bomkoul (31,2 daN/cm), moyenne et acceptable pour le mélange avec l'argile de Balengou (72,5 daN/cm), bonne avec l'argile de Missellélé (90,3 daN/cm) et excellente pour le mélange avec l'argile de Mussaka (94,2 daN/cm), ces différences étant dues essentiellement, selon l'auteur, à la nature et à la

morphologie des particules de charge, les particules de dimensions plus petites étant plus renforçatrices, pour une même morphologie.

Les compositions minéralogiques des six échantillons de Njopwou (1984, 1986, 1988a et b), issues des méthodes normative et plurianalytique montrent une très bonne concordance (cf. figure 5 et tableau 4). Le groupe des kandites et des hydrates d'alumine est dominant et constitue la base de ces matériaux. Les protocoles de sélection minéralogique et paramétrique des matériaux pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques sont synthétisés sur les tableaux 1 et 2 respectivement. Le tableau 5 en donne les résultats. Les prescriptions minéralogiques révèlent que les matériaux bruts de Balengou et de Bomkoul, tout comme les matériaux fins de Mussaka et de Missellélé sont impropres à la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques, à cause de leur richesse en quartz, les matériaux fins de Balengou et de Bomkoul étant indiqués pour cette production. Les prescriptions paramétriques quant à elle, indiquent que les matériaux bruts de Balengou et de Bomkoul, tout comme les matériaux fins de Missellélé sont impropres à la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques, à cause d'une insuffisance d'altération, les matériaux fins de Balengou, de Bomkoul et de Mussaka étant indiqués pour cette production.

III.2.2. Autres exemples

Dans ce cadre, les travaux de Téjiogap et al. (2001) et de Liboum (2001) ont été pris en compte, pour tester l'utilisation de l'outil normatif, indépendamment des objectifs poursuivis par ces auteurs.

Les matériaux argileux examinés dont les données ont été empruntées à Téjiogap et al. (2001) proviennent de Lembo, localité située dans la Province de l'Ouest, de coordonnées géographiques 5°08'N et 10°20'E. Les deux échantillons numérotés Abl et Abl* par les auteurs, ont été prélevés en deux points différents de l'horizon superficiel sur une tranchée de la route Bangangté-Bafang dans le but de tester l'efficacité de quelques techniques simples d'enrichissement du matériau en argiles minéralogiques. Les études ont été menées sur les matériaux totaux notés Ablt et Abl*t, sur les matériaux délités à la main et passant à travers les mailles d'un tamis de 100 μm , notés Able et Abl*e et enfin sur les fractions des particules de diamètre inférieur à 10 μm de l'échantillon originel Abl*, notés Abl*ef et Abl*tf et respectivement extraites du tamisat de 100 μm et du

matériau total par sédimentation dans une solution dispersante, soit au total six échantillons. Les analyses chimiques ont été effectuées par attaque au mélange d'acides HF et HClO₄, et le résidu par fusion alcaline. Les éléments mis en solution ont été dosés par spectrométrie d'émission de plasma. Les analyses minéralogiques ont comporté d'une part un volet qualitatif faisant intervenir l'analyse thermique différentielle et l'analyse par diffraction des rayons X, d'autre part un volet quantitatif par la méthode de calculs minéralogiques empruntée à Njopwou (1984). Les résultats de ces calculs montrent que les matériaux sont constitués pour l'essentiel de kaolinite (33,5 à 58,3 %), de quartz (19,0 à 47,2 %) et d'illite (13,0 à 21,0 %).

Les vingt échantillons de sols, dont les données ont été empruntées à Liboum (2001), ont été prélevés en différents sites de la ville de Yaoundé. Ils sont numérotés Liav (provenance : Aviation), Liay (provenance : Ayéné), Liba (provenance : Biyem-assi), Licu (provenance : Cité universitaire), Liek (provenance : Ekoumdoum), Lifb (provenance : Mont Fébé), Liko (provenance : Kondengui), Limf (provenance : Mfandéna-Omnisport), Limi (provenance : Mimboman), Limv (provenance : Mvolyé), Link (provenance : Nkolafane) et Ling (provenance : Ngouso). Ces numéros comportent le suffixe 1 ou le suffixe 2, selon que le prélèvement a été effectué dans l'ensemble meuble superficiel ou dans l'ensemble nodulaire sous-jacent. L'objectif de l'auteur était d'effectuer la caractérisation physico-chimique et minéralogique de ces matériaux. Les démarches analytiques chimiques et minéralogiques ont été exposées plus haut. Du point de vue de la composition minéralogique quantitative, la kaolinite est le principal minéral des échantillons issus de l'ensemble meuble (43,5 à 61,3 %), tandis que dans la plupart de ceux issus de l'ensemble nodulaire, les teneurs en composés ferriques (31,5 à 53,0 %) sont voisines de celles en kaolinite (37,1 à 53,2 %). La gibbsite est un constituant mineur dans tous ces échantillons (0,0 à 4,7 %). Le résidu quartzueux est plus important dans l'ensemble meuble (19,1 à 35,5 %) que dans l'ensemble nodulaire (1,2 à 16,2 %).

Les compositions minéralogiques issues des méthodes normative et plurianalytique montrent une très bonne concordance (cf. figures 1, 2, 3 et 4, et tableau 4). Les six échantillons de Téjiogap et al. (2001) sont effectivement constitués pour l'essentiel de quartz, de minéraux du groupe des kandites et des hydrates d'alumine et d'alumino-silicates potassiques. Pour les échantillons de Liboum (2001), le groupe des kandites

et des hydrates d'alumine est prédominant dans tous les échantillons quel que soit l'ensemble d'origine. Les teneurs en composés de fer ferrique et de manganèse sont globalement voisines mais subordonnées à celles du groupe précédent dans l'ensemble nodulaire, alors que dans l'ensemble meuble, elles sont nettement plus faibles. Le groupe silico-quartzeux est plus important dans l'ensemble meuble que dans l'ensemble nodulaire.

Les protocoles de sélection minéralogique et paramétrique des matériaux pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques sont synthétisés sur les tableaux 1 et 2 respectivement. Le tableau 5 en donne les résultats. Les prescriptions minéralogiques révèlent que tous les matériaux examinés sont impropres à la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques, à cause de leur richesse en quartz ou en oxyhydroxydes de fer ferrique. Les prescriptions paramétriques indiquent à leur tour que tous ces matériaux sont impropres à la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques, à cause d'une insuffisance d'altération, d'une insuffisance de lixiviation, d'un excès de fer ou d'un confinement relativement avancé.

III.3. Exemple de la Guinée Conakry

L'exemple sélectionné est celui d'un profil d'altération qui se trouve dans les îles de Loos, sur roches magmatiques acides, déficitaires en silice (syénites néphéliniques) (Millot et Bonifas, 1955). Tout comme dans le cas des travaux de Téjogap et al. (2001) et de Liboum (2001), il s'agit de tester l'utilisation de l'outil normatif, indépendamment des objectifs poursuivis par les auteurs originels. Les auteurs originels ont effectué la description générale du profil et déterminé la composition chimique, éléments majeurs, des échantillons prélevés sur ledit profil (tableau 3). L'organisation verticale des matériaux permet d'observer successivement, au-dessus de la syénite néphélinique fraîche, roche mère non altérée, la syénite néphélinique en voie d'altération ou arène syénitique, l'altérite syénitique, caractérisée par son faciès «pierre ponce», la bauxite rose, et au sommet, la cuirasse bauxitique ferrugineuse. La composition minéralogique réelle n'a pas été donnée par les auteurs. La composition chimique permet d'observer, de bas en haut, une perte en éléments calcoalcalins et ferromagnésiens, un enrichissement en alumine, en eau de constitution et en fer ferrique, qui sont caractéristiques d'une altération poussée à l'extrême.

Du point de vue minéralogique (tableaux 4 et 5), les échantillons présentés sont presque sans quartz; ce qui

est normal compte tenu de la nature de la roche mère. Les silicates anhydres, observables dans la roche mère et dans l'arène, ont disparu dans les horizons sus-jacents, pour céder la place à quelques rares hydrosilicates calcoalcalins. Dans ces derniers horizons, la teneur conjointe en kaolinite et en hydrates d'alumine est supérieure à 70%. Quant à la teneur en oxyhydroxydes de fer, faible dans tous les horizons profonds, elle devient plus élevée dans l'horizon cuirassé de surface.

Du point de vue paramétrique (tableau 5), les teneurs en fer libre sont inférieures à 15% pour les échantillons des horizons inférieurs, et supérieures à cette limite pour ceux de l'horizon cuirassé superficiel. Le confinement est extrême dans la roche mère et dans l'arène, alors que dans les horizons sus-jacents le degré de transformation des silicates et le degré global d'altération sont très élevés. Les prescriptions minéralogiques (tableau 5) révèlent que les matériaux provenant de la roche mère, de l'arène et de la cuirasse superficielle ne peuvent pas se prêter à la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques, à cause de leur richesse en silicates anhydres pour les deux premiers, et en oxyhydroxydes de fer ferrique pour le dernier. Par contre, les matériaux des deux horizons intermédiaires peuvent parfaitement se prêter à cette production. Les prescriptions paramétriques (tableau 5) sont parfait en accord avec les précédentes, la proscription étant due, le cas échéant, au confinement ou à la richesse en fer.

III.4. Synthèse et discussion des résultats

A l'exclusion des matériaux situés à la base du profil sur syénite néphélinique de Millot et Bonifas (1955), tous ceux pris en compte dans la présente étude ont une teneur conjointe en kaolinites et hydrates d'alumines, réels ou normatifs, supérieure à 20 %. Il s'agit donc de matériaux essentiellement argileux et kaoliniques, plus ou moins riches en fer, plus ou moins riches en quartz. Certains de ces matériaux font apparaître des caractères propices à la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques.

III.4.1. Exemple de la Guinée-Conakry (Millot et Bonifas 1955).

Pour les matériaux des horizons altérite et orthobauxitique du profil d'altération sur syénite néphélinique aucune préparation préalable à leur mise en œuvre ne semble nécessaire pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques.

III.4.2. Exemples du Cameroun.

Les échantillons de Liboum (2001) montrent que les matériaux des niveaux meubles de surface et

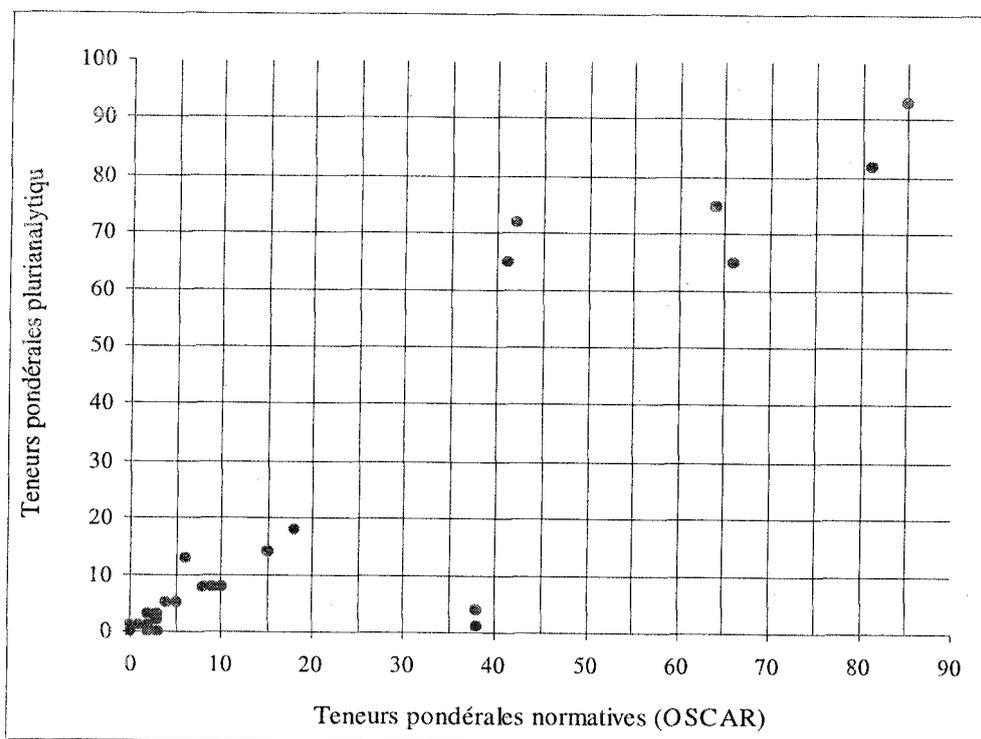


Fig. 5 : Comparaisons des résultats minéralogiques globaux obtenus des méthodes plurianalytiques (NJOPWOUO 1984, 1986, 1988), (en ordonnées) et de la méthode normative altérologique (EKODECK et KAMGANG, 2002.) (OSCAR en abscisses), pour le quartz, les aluminosilicates potassiques, le groupe kandites - hydrates d'alumine, le groupe des oxyhydroxydes de fer ferrique et de manganèse, le groupe des oxydes de titane (ilménite et anatase).

que la non discrimination entre le fer ferreux et le fer ferrique dans les analyses chimiques peut conduire à la surestimation du quartz et des oxyhydroxydes ferriques, en raison de la non reconstitution des silicates ferreux normatifs; (2) qu'il est souvent préférable d'associer les espèces minérales par affinité (comme la kaolinite et la gibbsite) ou par familles (silicates potassiques, silicates calciques et sodiques, ou encore silicates ferreux et magnésiens) dans les comparaisons des données, au lieu de considérer les espèces minérales séparément.

Il résulte de ces observations que les exigences minéralogiques rapportées plus haut, dans le choix des matériaux à usage industriel pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques, peuvent être examinées à la lumière de la composition minéralogique normative. Ainsi, le matériau est inutilisable pour une teneur en oxyhydroxydes de fer et en quartz supérieure ou égale à 12,5 % et à 15 % respectivement, et pour une teneur de l'ensemble kaolinite - hydrates d'alumine inférieure à 37,5 %. Les données concernant les silicates anhydres calco-alcalins représentent les feldspaths, alors que celles relatives aux hydrosilicates ferromagnésiens et calco-alcalins représentent les phyllites de type 2/1 (hydromicas, illites, chlorites et smectites). Pour les uns, les teneurs

supérieures à 10 % rendent les matériaux inutilisables, alors que pour les autres, cette limite doit être de 5 %. La démarche de sélection est présentée dans le tableau 1.

II.2.2. Exploitation des paramètres d'altération

Parmi les sept paramètres présentés plus haut, ceux qui peuvent apporter des renseignements dignes d'intérêt dans la sélection des argiles industrielles sont successivement : l'importance potentielle du fer libre (IFL), l'indice relatif de confinement potentiel (IRCP), l'indice relatif de lixiviation potentielle (IRLP) et le degré virtuel relatif d'altération de la roche (DVRAR).

Dans tous les cas de production pris en compte (caoutchoucs, papier, peintures et plastiques), la teneur en Fe_2O_3 devant être inférieure à 10 %, les valeurs des oxyhydroxydes et de l'IFL doivent être légèrement supérieures à celles du Fe_2O_3 . La valeur limite maximale pourrait être fixée à 12,5 % pour les oxyhydroxydes, et 15 % pour l'IFL. La valeur de l'IRCP doit être comprise entre 0 et 50 %, celle de l'IRLP doit être supérieure à 70 % et celle du DVRAR supérieure à 62,5 %. Le tableau 2 présente la démarche de sélection.

Tableau 1 : Protocole de sélection minéralogique des matériaux pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques.

CRITERES				MATERIAU	
Oxyhydrox. de Fe \geq 12,5 %				à proscrire	
Oxyhydrox. de Fe < 12,5 %	Quartz \geq 15%			à proscrire	
	Quartz < 15%	Sil.anh. Ca-alc et FeMg \geq 10%		à proscrire	
		Sil.anh. Ca-alc et FeMg < 10%	Hydrosil. Ca-alc et FeMg \geq 5%		à proscrire
			Hydrosil. Ca-alc et FeMg < 5%	Kand. et Hydr.Al \leq 37,5%	à proscrire
				Kand. et Hydr.Al > 37,5%	<u>bon pour caoutchoucs, papier, peintures et plastiques.</u>

N.B. : Sil.anh.Ca-alc+FeMg : Silicates anhydres calco-alcalins et ferro-magnésiens ;
 Hydrosil.Ca-alc+FeMg : Hydrosilicates calco-alcalins et ferro-magnésiens ;
 Kand.+Hydr.Al : Kandites (kaolinite, halloysite) et hydrates d'alumine.

Tableau 2 : Protocole de sélection paramétrique des matériaux pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques.

CRITERES				MATERIAU	
IFL \geq 15%				à proscrire	
IFL < 15%	IRCP \geq 50%			à proscrire	
	IRCP < 50%	IRLP \leq 70%		à proscrire	
		IRLP > 70%	DVRAR \leq 62,5%		à proscrire
			DVRAR > 62,5%		<u>bon pour caoutchoucs, papier, peintures et plastiques.</u>

N.B. : IFL : Importance du fer ferrique libre ; IRCP : Indice relatif de confinement potentiel ; IRLP : Indice relatif de lixiviation potentielle ; DVRAR : degré virtuel relatif d'altération de la roche.

II.2.3. Protocoles de sélection des matériaux

Les critères de sélection des matériaux utilisables dans la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques étant principalement d'ordre minéralogique, les critères minéralogiques constituent

les premiers guides dans cette sélection. Les paramètres sont des guides de second ordre. Ils jouent un rôle d'appoint. En tout état de cause, la convergence des prescriptions doit être déterminante dans le choix de l'option finale.

III. PRESENTATION DE QUELQUES CAS TYPIQUES

III.1. Critères de sélection des cas typiques et présentation des données

Le manteau d'altération, qui montre une très grande variabilité des basses aux hautes latitudes (Strakhov, 1967, *in* Lyon Associates Inc., 1971), présente généralement dans son organisation verticale la succession suivante des matériaux au-dessus de la roche mère non altérée : (1) la zone de démarrage de

l'altération, souvent appelée lithomarge, avec des fragments de roches ; (2) la zone d'altération faible d'hydromorphie dans laquelle se développent les phyllites 2/1; (3) la zone d'altération franche ou zone altéritique, dans laquelle se forment des phyllites 1/1, subdivisée en sous-zone isaltéritique avec conservation de la texture de la roche originelle et sous-zone allotéritique sus-jacente sans conservation de ladite texture ; (4) la zone d'accumulation des oxyhydroxydes d'aluminium ou de fer ferrique, pouvant aboutir à la formation de cuirasses; (5) la zone de matériaux meubles

Tableau 3 : Composition chimique de quelques cas typiques du Cameroun et de la Guinée Conakry.

Cameroun : Données de NJOPWOUO (1984, 1986, 1988a et b) et de NJOPWOUO et WANDJI (1988).

N° échantillon	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
Ba	48.34	28.63	8.98	0.03	0.00	0.03	0.03	0.02	3.19	0.00	0.41	0.00
Baff	39.70	35.80	11.80	0.00	0.00	0.02	0.03	0.02	4.45	0.00	0.30	0.00
Bo	48.01	27.41	9.82	0.31	0.12	0.06	0.02	0.41	7.11	0.21	2.34	0.00
Boff	41.34	33.54	11.50	0.15	0.00	0.05	0.04	0.26	7.47	0.00	1.41	0.00
Mu	34.29	28.53	21.65	0.38	0.18	0.21	0.05	0.35	8.34	2.20	2.35	0.44
Mi	38.54	27.43	15.84	0.41	0.09	0.09	0.06	0.21	5.36	2.30	7.72	0.79

Cameroun : Données de TEJIOGAP et al. (2001).

N° échantillon	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
Able	69.37	17.99	6.70	0.21	0.01	0.00	0.00	1.50	1.62	0.00	0.03	0.00
Ablt	68.63	19.41	6.70	0.23	0.01	0.00	0.00	1.52	2.17	0.00	0.05	0.00
Abl*e	55.19	32.17	5.62	0.48	0.00	0.00	0.00	2.47	1.32	0.00	0.03	0.00
Abl*ef	69.25	19.07	9.42	0.38	0.00	0.00	0.00	2.11	1.10	0.00	0.06	0.00
Abl*t	69.25	20.11	5.80	0.42	0.00	0.02	0.00	2.33	1.20	0.00	0.08	0.00
Abl*tf	56.00	29.52	9.13	0.47	0.00	0.00	0.00	2.45	1.36	0.00	0.04	0.02

Cameroun : Données de LIBOUM (2001).

N° échantillon	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
Liah1	49.40	23.90	12.20	0.07	0.03	0.00	0.00	0.08	12.40	0.00	1.50	0.20
Liah2	25.50	20.40	12.30	0.08	0.05	0.05	0.00	0.04	38.60	0.00	0.90	0.25
Liav1	48.90	24.00	12.90	0.12	0.03	0.04	0.00	0.13	11.90	0.00	1.50	0.24
Liav2	24.50	19.40	11.90	0.08	0.03	0.03	0.00	0.06	42.30	0.00	1.00	0.28
Liay1	47.60	24.30	13.10	0.11	0.05	0.04	0.00	0.12	12.70	0.00	1.40	0.20
Liay2	33.10	22.00	12.90	0.10	0.05	0.04	0.00	0.05	30.30	0.00	1.10	0.30
Liba1	51.00	23.40	12.90	0.10	0.03	0.05	0.00	0.12	10.50	0.00	1.50	0.20
Liba2	22.90	18.30	12.60	0.10	0.05	0.05	0.00	0.00	44.40	0.00	1.00	0.32
Licu1	54.00	22.00	11.50	0.13	0.03	0.03	0.00	0.14	10.50	0.00	1.50	0.21
Liek1	55.70	23.40	10.50	0.12	0.04	0.04	0.00	0.13	11.40	0.00	1.20	0.16
Lifb1	53.20	21.80	11.20	0.13	0.13	0.06	0.00	0.14	11.90	0.00	1.70	0.25
Lifb2	35.30	20.20	12.30	0.12	0.29	0.04	0.00	0.08	30.00	0.00	1.30	0.32
Liko1	52.00	24.20	11.70	0.12	0.03	0.04	0.00	0.14	9.80	0.00	1.60	0.24
Liko2	23.50	19.00	12.10	0.10	0.05	0.04	0.00	0.04	43.70	0.00	1.10	0.33
Limf1	50.30	24.70	12.30	0.10	0.04	0.06	0.00	0.10	10.70	0.00	1.50	0.20
Limf2	24.00	17.50	11.90	0.12	0.03	0.03	0.00	0.05	44.80	0.00	1.30	0.29
Limv1	50.30	23.30	11.70	0.10	0.04	0.05	0.00	0.08	13.00	0.00	1.40	0.17
Limv2	21.00	16.50	12.40	0.08	0.04	0.06	0.00	0.20	47.50	0.00	0.79	0.32
Link1	52.30	23.60	11.50	0.14	0.02	0.04	0.20	0.24	9.30	0.00	1.60	0.24
Ling2	22.60	18.80	11.90	0.08	0.04	0.06	0.00	0.05	45.00	0.00	1.10	0.30

Guinée Conakry : Profil sur syénite néphélinique – Données de MILLOT et BONIFAS (1955).

N° échantillon	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
Mb5	5.40	44.30	24.50	0.00	0.10	0.20	0.00	0.00	23.10	0.20	1.40	0.00
Mb4	0.40	58.50	30.90	0.00	0.10	0.40	0.00	0.00	6.40	0.50	2.10	0.00
Mb3	3.30	56.00	29.70	0.00	0.10	0.20	0.00	0.00	7.20	0.80	1.70	0.00
Mb2	58.02	21.70	3.10	0.40	0.10	0.40	4.00	8.10	2.90	0.60	0.60	0.00
Mb1rm	57.30	17.50	1.30	1.10	0.40	2.60	6.00	7.00	4.90	1.50	0.70	0.00

(1rm : syénite néphélinique fraîche; 2 : syénite néphélinique en voie d'altération; 3 : faciès "pierre ponce"; 4 : bauxite rose; 5 : cuirasse bauxitique ferrugineuse)

Tableau 4 : Eléments de compositions minéralogiques pour les différents échantillons. (N.B. : Al.Sil : aluminosilicates; Sil : silicates; Kaol : Kaolinite; Gibb : Gibbsite; Oxyhy : Oxyhydroxydes; mpa : méthode plurianalytique; mna : méthode normative altérologique).

Cameroun : Données de NJOPWOUO (1984, 1986, 1988a et b) et de NJOPWOUO et WANDJI (1988).

N° échantillon	Quartz + Sil.am.		Al.Silic.K		Al.Silic Ca.Na		Silic. Fe.Mg.		Kand. + Gibbs.		Oxyhy. de Fe. et de Mn		Ilménite + Anatase	
	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna
Ba	18.0	18.4	0.5	0.0		0.4		0.1	75.1	63.9	3.2	3.2	0.4	0.4
Baff	0.3	0.4	0.5	0.0		0.0		0.0	93.3	84.6	4.5	4.5	0.3	0.3
Bo	14.1	15.3	0.4	3.2		0.4		0.7	65.3	66.0	7.9	7.5	2.5	2.1
Boff	1.0	2.2	0.0	2.4		0.8		0.4	82.1	80.7	8.3	7.5	1.4	1.4
Mu	0.5	38.2	2.1	3.2		0.4		0.9	72.9	41.7	8.3	9.2	4.5	4.4
Mi	4.0	38.0	1.2	1.6		0.4		0.9	65.3	40.9	12.6	6.1	7.7	10.0

Cameroun : Données de TEJIOGAP et al. (2001).

N° échantillon	Quartz + Sil.am.		Al.Silic.K		Al.Silic Ca.Na		Silic. Fe.Mg.		Kand. + Gibbs.		Oxyhy. de Fe. et de Mn		Ilménite + Anatase	
	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna
Able	47.2	56.5	13.0	12.7		0.0		0.5	34.4	25.8	1.6	0.5	0.1	0.0
Ablt	44.7	50.2	12.6	12.7		0.0		0.6	38.5	32.8	2.1	0.6	0.1	0.1
Abl*e	19.2	30.2	21.0	20.7		0.0		1.1	54.8	32.5	1.3	1.3	0.1	0.0
Abl*ef	45.0	62.8	17.9	17.5		0.0		0.9	33.5	18.9	1.0	1.2	0.1	0.1
Abl*t	43.5	46.8	19.7	19.9		0.0		0.9	34.4	30.1	1.1	1.4	0.2	0.1
Abl*tf	19.0	22.9	20.7	20.7		0.0		1.1	58.3	52.7	1.3	1.4	0.1	0.0

Cameroun : Données de LIBOUM (2001).

N° échantillon	Quartz + Sil.am.		Al.Silic.K		Al.Silic Ca.Na		Silic. Fe.Mg.		Kand. + Gibbs.		Oxyhy. de Fe. et de Mn		Ilménite + Anatase	
	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna
Liah1	21.3	37.4		0.8		0.0		0.2	62.6	45.9	14.0	13.9		1.5
Liah2	4.2	6.2		0.0		0.0		0.2	48.5	47.5	43.7	42.9		0.9
Liav1	22.3	41.6		0.8		0.0		0.3	60.1	42.0	14.8	13.2		1.5
Liav2	2.7	4.0		0.8		0.0		0.2	47.9	46.2	45.9	47.0		1.0
Liay1	19.1	39.8		0.8		0.0		0.3	64.2	42.9	15.6	14.2		1.4
Liay2	8.4	18.8		0.8		0.0		0.2	54.4	45.0	31.5	33.7		1.1
Liba1	24.7	46.9		0.8		0.0		0.2	59.3	38.3	13.2	11.7		1.5
Liba2	5.6	8.8		0.0		0.0		0.2	41.4	39.9	49.3	49.6		1.0
Licu1	26.4	45.1		0.8		0.0		0.3	61.3	40.4	12.6	11.7		1.5
Liek1	35.5	34.7		0.8		0.0		0.3	45.4	52.7	13.3	12.7		1.2
Lifb1	31.0	41.8		0.8		0.0		0.3	49.2	42.2	13.7	13.4		1.7
Lifb2	16.2	23.0		0.8		0.0		0.3	45.7	40.4	34.7	33.8		1.3
Liko1	25.0	37.5		0.8		0.0		0.3	58.1	48.4	11.7	10.9		1.6
Liko2	2.4	4.1		0.0		0.0		0.2	46.7	45.5	47.6	48.7		1.1
Limf1	25.1	37.2		0.8		0.0		0.2	55.9	48.0	12.5	12.0		1.5
Limi2	3.1	7.9		0.8		0.0		0.3	45.0	39.6	48.9	49.8		1.3
Limv1	23.8	36.6		0.8		0.0		0.2	59.0	46.3	15.0	14.5		1.4
Limv2	3.5	10.3		1.6		0.0		0.2	39.5	32.7	53.0	53.0		0.8
Link1	28.5	39.4		2.4		1.3		0.4	53.2	43.4	11.4	10.3		1.6
Ling2	1.2	2.1		0.8		0.0		0.2	46.7	45.3	48.9	50.1		1.1

Guinée Conakry : Profil sur syénite néphélinique – Données de MILLOT et BONIFAS (1955).

(1rm : syénite néphélinique fraîche; 2 : syénite néphélinique en voie d'altération; 3 : faciès «pierre ponce»; 4 : bauxite rose; 5 : cuirasse bauxitique ferrugineuse).

N° échantillon	Quartz + Sil.am.		Al.Silic.K		Al.Silic Ca.Na		Silic. Fe.Mg.		Kand. + Gibbs.		Oxyhy. de Fe. et de Mn		Ilménite + Anatase	
	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna	mpa	mna
MB-5		0.0		0.0		1.6		0.0		71.1		24.9		1.7
MB-4		0.0		0.0		1.1		0.0		88.5		7.2		2.6
MB-3		0.0		0.0		1.6		0.0		87.2		7.7		2.5
MB-2		9.8		49.5		31.3		0.9		0.0		3.0		1.2
MB-1rm		0.2		23.1		66.0		3.5		0.0		3.5		1.4

Tableau 5 : Critères et résultats des protocoles de sélection des matériaux argileux pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques.

N° de l'échantillon	Ba	Baff	Bo	Boff	Mu	Mi	Able	Ablt	Abl*e	Abl*f	Abl*t	Abl*f
Oxyhydroxydes de Fer	3.2	4.5	7.3	7.5	8.9	6.1	1.8	2.5	1.3	1.2	1.4	1.4
Quartz	18.4	0.4	15.3	2.2	22.3	35.8	56.5	50.2	30.2	57.9	46.8	22.9
Sil.anh.Ca-alc.+Fe.Mg.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Hydrosil.Ca-alc.+Fe.Mg.	0.5	0.0	4.3	3.6	4.5	3.0	13.2	13.3	21.8	18.4	20.8	21.8
Kand.+Hydr.d'Al.	63.9	84.6	66.0	80.7	41.7	40.9	25.8	32.8	32.5	18.9	30.1	52.7
Prescription minéralogique	Pros c	Bon	Pros c	Bon	Pros c	Pros c	Pros c	Pros c	Pros c	Pros c	Pros c	Pros c
IFL	4.97	7.63	10.67	11.97	7.90	5.36	1.96	2.91	1.68	1.23	1.75	1.97
IRCP	5.59	2.70	6.13	4.87	9.81	6.68	33.83	28.86	50.47	49.40	40.87	29.26
IRLP	71.13	72.98	73.21	73.35	94.36	95.37	73.31	70.70	53.34	74.68	65.35	68.20
DVRAR	55.91	72.68	60.10	71.53	70.49	53.78	29.94	33.84	36.51	32.75	34.06	52.19
Prescription paramétrique	Pros c	Bon	Pros c	Bon	Bon	Pros c						
Synthèse des prescriptions	Pros c	Bon	Pros c	Bon	?	Pros c						

N° de l'échantillon	Liah1	Liah2	Liav1	Liav2	Liay1	Liay2	Liba1	Liba2	Licu1	Liek1
Oxyhydroxydes de Fer	13.9	42.9	13.2	47.0	14.1	33.6	11.7	49.5	11.7	12.6
Quartz	37.4	6.2	41.6	4.0	39.8	18.8	46.9	8.8	45.1	34.7
Sil.anh.Ca-alc.+Fe.Mg.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Hydrosil.Ca-alc.+Fe.Mg.	1.0	0.2	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	0.2	1.1	1.1
Kand.+Hydr.d'Al.	45.9	47.6	42.0	46.24	42.9	45.0	38.4	39.9	40.4	52.7
Prescription minéralogique	Prosc									
IFL	14.11	48.61	12.63	53.44	13.54	34.86	10.86	51.48	11.56	14.18
IRCP	2.09	0.38	2.48	2.07	2.44	2.13	2.49	0.46	2.58	1.99
IRLP	85.59	77.86	89.85	75.83	89.59	82.46	93.57	80.58	87.56	78.29
DVRAR	47.60	68.94	45.72	69.96	47.03	58.49	42.67	66.13	41.92	47.59
Prescription paramétrique	Prosc									
Synthèse des prescriptions	Prosc									

N° de l'échantillon	Lifb1	Lifb2	Liko1	Liko2	Limf1	Limi2	Limv1	Limv2	Link1	Ling2
Oxyhydroxydes de Fer	13.2	33.5	10.9	48.6	11.9	49.8	14.1	52.9	10.3	50.0
Quartz	41.8	23.0	37.5	4.1	37.2	7.9	36.6	10.3	39.4	2.1
Sil.anh.Ca-alc.+Fe.Mg.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Hydrosil.Ca-alc.+Fe.Mg.	1.1	1.1	1.1	0.2	1.0	1.1	1.0	1.8	4.1	1.0
Kand.+Hydr.d'Al.	42.2	40.4	48.4	45.5	48.3	39.6	46.4	32.7	43.4	45.3
Prescription minéralogique	Prosc									
IFL	13.35	34.03	11.43	54.17	12.25	53.22	15.00	53.27	10.68	56.66
IRCP	2.47	2.58	2.16	0.40	2.00	2.63	2.07	5.13	8.56	2.11
IRLP	84.84	83.11	83.34	76.72	84.96	77.73	83.75	81.71	83.00	75.34
DVRAR	43.14	53.43	47.42	70.43	48.30	65.06	47.23	62.90	45.32	72.07
Prescription paramétrique	Prosc									
Synthèse des prescriptions	Prosc									

N° de l'échantillon	MB-1rm	MB-2	MB-3	MB-4	MB-5
Oxyhydroxydes de Fer	3.0	2.9	7.6	7.2	24.8
Quartz	0.2	9.8	0.0	0.0	0.0
Sil.anh.Ca-alc.+Fe.Mg.	80.9	43.8	0.0	0.0	0.0
Hydrosil.Ca-alc.+Fe.Mg.	11.7	38.0	1.6	1.1	1.6
Kand.+Hydr.d'Al.	0.0	0.0	87.2	88.5	71.1
Prescription minéralogique	Prosc	Prosc	Bon	Bon	Prosc
IFL	3.76	3.50	6.09	5.48	21.08
IRCP	100.00	100.00	1.77	1.19	2.16
IRLP	5.38	21.82	97.55	99.41	95.46
DVRAR	5.36	19.59	97.55	99.41	95.46
Prescription paramétrique	Prosc	Prosc	Bon	Bon	Prosc
Synthèse des prescriptions	Prosc	Prosc	Bon	Bon	Prosc

N.B. : Sil.anh.Ca-alc+FeMg : Silicates anhydres calco-alcalins et ferro-magnésiens ; Hydrosil.Ca-alc+FeMg : Hydrosilicates calco-alcalins et ferro-magnésiens ; Kand.+Hydr.Al : Kandites (kaolinite, halloysite) et hydrates d'alumine (boehmite, gibbsite). IFL : Importance du fer ferrique libre ; IRCP : Indice relatif de confinement potentiel ; IRLP : Indice relatif de lixiviation potentielle ; DVRAR : Degré relatif virtuel d'altération de la roche. Prosc. : Proscription; Bon : bon pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques.

Les données numériques en gras indiquent les causes premières, mais non exclusives des proscriptions.

argilo-sableux ou zone éluviale, siège des phénomènes de lessivage ; (6) la zone humifère superficielle, plus ou moins importante. Ce schéma général est assorti de nombreuses variantes.

Les matériaux argileux susceptibles d'être mis en exploitation dans la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques, sont ceux relevant a priori de la zone d'altération franche décrite ci-dessus. On pourrait ajouter la zone d'accumulation des oxyhydroxydes d'aluminium, dans le cas des profils bauxitiques. Les autres zones sont constituées de matériaux soit peu altérés et riches en minéraux peu ou non transformés, soit riches en oxyhydroxydes de fer et, dans tous les cas, non indiqués pour les besoins de la cause en examen. Sont considérés ici, quelques exemples simples issus de régions situées en climat tropical humide et marquées par la brutalité de l'altération, la grande épaisseur du manteau d'altération, l'ampleur des néoformations de kaolinite et de la cristallisation des oxyhydroxydes simples tels que l'hématite, la gœthite, la bœhmite et la gibbsite. Les exemples pris en Afrique Centrale (Cameroun au Sud de l'Adamaoua) et en Afrique de l'Ouest (Guinée Conakry) sont ceux pour lesquels les résultats des analyses chimiques et/ou minéralogiques sont disponibles. Les données relatives aux résultats des analyses chimiques, éléments majeurs ont été reportées sur le tableau 3. Sur le tableau 4, ces résultats sont traduits sous forme de teneurs pondérales normatives (mna) des espèces et groupes d'espèces minérales virtuelles et, le cas échéant, assortis de résultats des évaluations pondérales plurianalytiques (mpa). Le tableau 5 présente les données minéralogiques normatives, les paramètres altérologiques ainsi que les prescriptions correspondantes d'exploitation de ces matériaux argileux pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques.

III.2. Exemples du Cameroun

III.2.1. Exemple de référence : cas des mélanges-mâtres caoutchouc-argile

Les travaux effectués par Njopwouo (1984, 1986, 1988a et b) sur des matériaux argileux provenant de quatre gisements d'argile kaolinique situés en zone d'altération latéritique ont été pris comme référence. Ils concernent les sites argileux (1) de Balengou, (Province de l'Ouest), à environ 6 km au Nord-Ouest de la ville de Bazou, aux coordonnées géographiques 4°06'N et 10°06'E, (2) de Bomkoul, (Province du Littoral), à environ 17 km au Nord-Est de la ville de Douala, aux

coordonnées géographiques 4°06'N et 9°48'E, (3) de Mussaka, (Province du Sud-Ouest), à environ 5 km au Sud-Ouest de la ville d'Ekona, aux coordonnées géographiques 4°11'N et 9°20'E et (4) de Missellélé, (Province du Sud-Ouest), à environ 15 km au Nord-Est de la ville de Tiko, aux coordonnées géographiques 4°07'N et 9°27'E. Les échantillons de matériaux provenant des gisements de Balengou et de Bomkoul sont désignés respectivement sur les tableaux 3, 4 et 5 par les numéros Ba, Bo pour les échantillons bruts, les échantillons numérotés Baff et Boff étant formés par les fractions granulométriques inférieures à 2 μ m extraites de Ba et de Bo respectivement. Quant aux échantillons provenant des gisements de Mussaka et de Missellélé, et numérotés Mu et Mi respectivement, il s'agit de la fraction fine extraite du matériau total par sédimentation dans une solution aqueuse dispersante. Les résultats minéralogiques obtenus montrent que la kaolinite est le minéral de base du matériau brut de Bomkoul, avec une teneur de 65,32 %, tandis que l'halloysite constitue le minéral essentiel du matériau de Balengou (70,41 %). Dans la fraction fine, ces teneurs passent respectivement à 82,09 et 89,71 %. L'argile de Mussaka est à base d'halloysite (72,9%), alors que celle de Missellélé est riche en kaolinite (65,3 %).

Pour l'utilisation des argiles camerounaises par voie humide comme charge renforçatrice dans le caoutchouc naturel, des mélanges-mâtres ont été réalisés par Njopwouo (1984, 1986, 1988a et b), par co-floculation d'une suspension d'argile dans l'eau et du latex liquide, en milieu acide et en présence d'un anti-oxydant, suivie du crépage et du séchage du coagulum obtenu. Ces mélanges ont été effectués avec la suspension de la fraction argileuse, de granulométrie inférieure à 2 μ m, dont le poids de charge avait un taux de 65 % par rapport au caoutchouc sec. Des essais ont ensuite été réalisés afin de situer les performances des mélanges-mâtres réalisés aux fins de comparaisons à celles du caoutchouc chargé au noir de carbone. Les résultats des essais mécaniques montrent que les valeurs de dureté, des modules de résistance et de l'allongement à la rupture sont dans l'ensemble acceptables. Pour ces matériaux, la résistance au déchirement est faible pour le mélange avec l'argile de Bomkoul (31,2 daN/cm), moyenne et acceptable pour le mélange avec l'argile de Balengou (72,5 daN/cm), bonne avec l'argile de Missellélé (90,3 daN/cm) et excellente pour le mélange avec l'argile de Mussaka (94,2 daN/cm), ces différences étant dues essentiellement, selon l'auteur, à la nature et à la

morphologie des particules de charge, les particules de dimensions plus petites étant plus renforçatrices, pour une même morphologie.

Les compositions minéralogiques des six échantillons de Njopwouo (1984, 1986, 1988a et b), issues des méthodes normative et plurianalytique montrent une très bonne concordance (cf. figure 5 et tableau 4). Le groupe des kandites et des hydrates d'alumine est dominant et constitue la base de ces matériaux. Les protocoles de sélection minéralogique et paramétrique des matériaux pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques sont synthétisés sur les tableaux 1 et 2 respectivement. Le tableau 5 en donne les résultats. Les prescriptions minéralogiques révèlent que les matériaux bruts de Balengou et de Bomkoul, tout comme les matériaux fins de Mussaka et de Missellélé sont impropres à la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques, à cause de leur richesse en quartz, les matériaux fins de Balengou et de Bomkoul étant indiqués pour cette production. Les prescriptions paramétriques quant à elle, indiquent que les matériaux bruts de Balengou et de Bomkoul, tout comme les matériaux fins de Missellélé sont impropres à la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques, à cause d'une insuffisance d'altération, les matériaux fins de Balengou, de Bomkoul et de Mussaka étant indiqués pour cette production.

III.2.2. Autres exemples

Dans ce cadre, les travaux de Téjiogap et al. (2001) et de Liboum (2001) ont été pris en compte, pour tester l'utilisation de l'outil normatif, indépendamment des objectifs poursuivis par ces auteurs.

Les matériaux argileux examinés dont les données ont été empruntées à Téjiogap et al. (2001) proviennent de Lembo, localité située dans la Province de l'Ouest, de coordonnées géographiques 5°08'N et 10°20'E. Les deux échantillons numérotés Abl et Abl* par les auteurs, ont été prélevés en deux points différents de l'horizon superficiel sur une tranchée de la route Bangangté-Bafang dans le but de tester l'efficacité de quelques techniques simples d'enrichissement du matériau en argiles minéralogiques. Les études ont été menées sur les matériaux totaux notés Ablt et Abl*t, sur les matériaux délités à la main et passant à travers les mailles d'un tamis de 100 μm , notés Able et Abl*e et enfin sur les fractions des particules de diamètre inférieur à 10 μm de l'échantillon originel Abl*, notés Abl*ef et Abl*tf et respectivement extraites du tamisat de 100 μm et du

matériau total par sédimentation dans une solution dispersante, soit au total six échantillons. Les analyses chimiques ont été effectuées par attaque au mélange d'acides HF et HClO₄, et le résidu par fusion alcaline. Les éléments mis en solution ont été dosés par spectrométrie d'émission de plasma. Les analyses minéralogiques ont comporté d'une part un volet qualitatif faisant intervenir l'analyse thermique différentielle et l'analyse par diffraction des rayons X, d'autre part un volet quantitatif par la méthode de calculs minéralogiques empruntée à Njopwouo (1984). Les résultats de ces calculs montrent que les matériaux sont constitués pour l'essentiel de kaolinite (33,5 à 58,3 %), de quartz (19,0 à 47,2 %) et d'illite (13,0 à 21,0 %).

Les vingt échantillons de sols, dont les données ont été empruntées à Liboum (2001), ont été prélevés en différents sites de la ville de Yaoundé. Ils sont numérotés Liav (provenance : Aviation), Liay (provenance : Ayéné), Liba (provenance : Biyem-assi), Licu (provenance : Cité universitaire), Liek (provenance : Ekoumdoum), Lifb (provenance : Mont Fébé), Liko (provenance : Kondengui), Limf (provenance : Mfandéna-Omnisport), Limi (provenance : Mimbo-man), Limv (provenance : Mvolyé), Link (provenance : Nkolafane) et Ling (provenance : Ngouso). Ces numéros comportent le suffixe 1 ou le suffixe 2, selon que le prélèvement a été effectué dans l'ensemble meuble superficiel ou dans l'ensemble nodulaire sous-jacent. L'objectif de l'auteur était d'effectuer la caractérisation physico-chimique et minéralogique de ces matériaux. Les démarches analytiques chimiques et minéralogiques ont été exposées plus haut. Du point de vue de la composition minéralogique quantitative, la kaolinite est le principal minéral des échantillons issus de l'ensemble meuble (43,5 à 61,3 %), tandis que dans la plupart de ceux issus de l'ensemble nodulaire, les teneurs en composés ferriques (31,5 à 53,0 %) sont voisines de celles en kaolinite (37,1 à 53,2 %). La gibbsite est un constituant mineur dans tous ces échantillons (0,0 à 4,7 %). Le résidu quartzueux est plus important dans l'ensemble meuble (19,1 à 35,5 %) que dans l'ensemble nodulaire (1,2 à 16,2 %).

Les compositions minéralogiques issues des méthodes normative et plurianalytique montrent une très bonne concordance (cf. figures 1, 2, 3 et 4, et tableau 4). Les six échantillons de Téjiogap et al. (2001) sont effectivement constitués pour l'essentiel de quartz, de minéraux du groupe des kandites et des hydrates d'alumine et d'alumino-silicates potassiques. Pour les échantillons de Liboum (2001), le groupe des kandites

et des hydrates d'alumine est prédominant dans tous les échantillons quel que soit l'ensemble d'origine. Les teneurs en composés de fer ferrique et de manganèse sont globalement voisines mais subordonnées à celles du groupe précédent dans l'ensemble nodulaire, alors que dans l'ensemble meuble, elles sont nettement plus faibles. Le groupe silico-quartzeux est plus important dans l'ensemble meuble que dans l'ensemble nodulaire.

Les protocoles de sélection minéralogique et paramétrique des matériaux pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques sont synthétisés sur les tableaux 1 et 2 respectivement. Le tableau 5 en donne les résultats. Les prescriptions minéralogiques révèlent que tous les matériaux examinés sont impropres à la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques, à cause de leur richesse en quartz ou en oxyhydroxydes de fer ferrique. Les prescriptions paramétriques indiquent à leur tour que tous ces matériaux sont impropres à la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques, à cause d'une insuffisance d'altération, d'une insuffisance de lixiviation, d'un excès de fer ou d'un confinement relativement avancé.

III.3. Exemple de la Guinée Conakry

L'exemple sélectionné est celui d'un profil d'altération qui se trouve dans les îles de Loos, sur roches magmatiques acides, déficitaires en silice (syénites néphéliniques) (Millot et Bonifas, 1955). Tout comme dans le cas des travaux de Téjiogap et al. (2001) et de Liboum (2001), il s'agit de tester l'utilisation de l'outil normatif, indépendamment des objectifs poursuivis par les auteurs originels. Les auteurs originels ont effectué la description générale du profil et déterminé la composition chimique, éléments majeurs, des échantillons prélevés sur ledit profil (tableau 3). L'organisation verticale des matériaux permet d'observer successivement, au-dessus de la syénite néphélinique fraîche, roche mère non altérée, la syénite néphélinique en voie d'altération ou arène syénitique, l'altérite syénitique, caractérisée par son faciès «pierre ponce», la bauxite rose, et au sommet, la cuirasse bauxitique ferrugineuse. La composition minéralogique réelle n'a pas été donnée par les auteurs. La composition chimique permet d'observer, de bas en haut, une perte en éléments calcoalcalins et ferromagnésiens, un enrichissement en alumine, en eau de constitution et en fer ferrique, qui sont caractéristiques d'une altération poussée à l'extrême.

Du point de vue minéralogique (tableaux 4 et 5), les échantillons présentés sont presque sans quartz; ce qui

est normal compte tenu de la nature de la roche mère. Les silicates anhydres, observables dans la roche mère et dans l'arène, ont disparu dans les horizons sus-jacents, pour céder la place à quelques rares hydrosilicates calcoalcalins. Dans ces derniers horizons, la teneur conjointe en kaolinite et en hydrates d'alumine est supérieure à 70%. Quant à la teneur en oxyhydroxydes de fer, faible dans tous les horizons profonds, elle devient plus élevée dans l'horizon cuirassé de surface.

Du point de vue paramétrique (tableau 5), les teneurs en fer libre sont inférieures à 15% pour les échantillons des horizons inférieurs, et supérieures à cette limite pour ceux de l'horizon cuirassé superficiel. Le confinement est extrême dans la roche mère et dans l'arène, alors que dans les horizons sus-jacents le degré de transformation des silicates et le degré global d'altération sont très élevés. Les prescriptions minéralogiques (tableau 5) révèlent que les matériaux provenant de la roche mère, de l'arène et de la cuirasse superficielle ne peuvent pas se prêter à la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques, à cause de leur richesse en silicates anhydres pour les deux premiers, et en oxyhydroxydes de fer ferrique pour le dernier. Par contre, les matériaux des deux horizons intermédiaires peuvent parfaitement se prêter à cette production. Les prescriptions paramétriques (tableau 5) sont parfait en accord avec les précédentes, la proscription étant due, le cas échéant, au confinement ou à la richesse en fer.

III.4. Synthèse et discussion des résultats

A l'exclusion des matériaux situés à la base du profil sur syénite néphélinique de Millot et Bonifas (1955), tous ceux pris en compte dans la présente étude ont une teneur conjointe en kaolinites et hydrates d'alumines, réels ou normatifs, supérieure à 20 %. Il s'agit donc de matériaux essentiellement argileux et kaoliniques, plus ou moins riches en fer, plus ou moins riches en quartz. Certains de ces matériaux font apparaître des caractères propices à la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques.

III.4.1. Exemple de la Guinée-Conakry (Millot et Bonifas 1955).

Pour les matériaux des horizons altéritique et orthobauxitique du profil d'altération sur syénite néphélinique aucune préparation préalable à leur mise en œuvre ne semble nécessaire pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques.

III.4.2. Exemples du Cameroun.

Les échantillons de Liboum (2001) montrent que les matériaux des niveaux meubles de surface et

d'accumulation sous-jacents des profils d'altération latéritique ne sont pas du tout indiqués en leur état pour la production envisagée. Des échantillons de Téjiogap et al. (2001), les résultats observés enseignent qu'un traitement d'enrichissement en argile par extraction sommaire de la fraction grossière ne suffit pas pour rendre les matériaux utilisables dans cette production. En considérant alors les six échantillons de Njopwouo (1984, 1986, 1988), la convergence des résultats normatifs avec ceux de cet auteur est de 9 cas sur 12 soit de 75% en valeur relative. Elle est donc bonne et elle valide l'usage, certes non exclusif, de l'outil normatif dans la sélection des matériaux argileux non seulement pour la production des caoutchoucs, mais aussi et par extension pour celle du papier, des peintures et des plastiques. La prise en compte de la fraction granulométrique inférieure à 2 μm semble être une condition essentielle, car elle permet la réduction sensible des teneurs en quartz et en oxyhydroxydes ferriques. Il convient cependant de relever que les échantillons provenant de Mussaka et de Missellélé (Njopwouo 1984, 1986, 1988; Njopwouo et Wandji 1988) semblent ne s'être pas conformés à ce cas de figure, au regard des prescriptions de l'outil normatif. A cette situation, on peut faire observer que la composition minéralogique réelle donnée par les auteurs fait apparaître la présence de sulfures et de phosphates qui ont une incidence certaine dans l'évaluation de la perte au feu. Cette dernière intervient de façon essentielle dans les reconstitutions minéralogiques normatives. Un essai de correction des résultats, effectué par réduction de la perte au feu, a conduit à une concordance entre les prescriptions de l'outil normatif et les conclusions des auteurs cités ci-dessus relativement au renforcement du caoutchouc.

En considérant l'ensemble des prescriptions normatives, on observe une très bonne convergence entre les prescriptions sur la base minéralogique et celles sur la base paramétrique. On pourrait, comme préconisé plus haut, se fonder sur cette convergence pour la décision finale à prendre. Sur les trente-sept cas examinés un seul cas de divergence a pu être observé. Il se situe près des limites des critères de décision pour le quartz d'une part et pour le degré d'altération d'autre part. Un examen détaillé de la composition minéralogique effective peut permettre de lever l'incertitude.

En tout état de cause, les convergences, tout comme les divergences des prescriptions ne constituent que des potentialités qui doivent donner lieu à un examen complémentaire pour la prise de la décision finale.

CONCLUSION

L'examen des cas présentés a été fondé, non seulement sur la prise en compte des caractéristiques exigibles dans le choix des matériaux argileux pour la production des caoutchoucs, du papier, des peintures et des plastiques, mais aussi sur les possibilités offertes par la méthode de restructuration normative altérologique. Il apparaît clairement que cette méthode normative peut être considérée comme un outil apte à fournir des indications intéressantes permettant de sélectionner les matériaux utilisables, non seulement à partir de la composition minéralogique, dont le caractère virtuel reste en parfait accord avec la réalité, mais aussi à partir des données paramétriques. Le protocole d'examen minéralogique et paramétrique proposé pour ladite sélection peut être amélioré, notamment en matière de détermination des limites ou critères de sélection, et, à l'instar de quelques autres cas antérieurement examinés, il peut également faire l'objet d'un traitement automatique.

La méthode normative n'est pas la méthode de résolution unique et universelle des problèmes que l'on peut rencontrer dans le vaste domaine des altérations. Elle permet tout simplement de se faire une idée rapide des phénomènes et processus mis en jeu et, pour les cas similaires à ceux soumis à l'examen effectué ci-dessus, d'avoir une idée des choix opérables. En raison de son caractère virtuel, elle n'exclut aucunement le recours à d'autres techniques d'analyse, d'interprétation et de sélection. Elle vient plutôt à l'appui des dites techniques à titre de diagnostic et d'anticipation. Ce diagnostic, bien qu'utile, est purement qualitatif. L'exploitabilité du gîte n'est envisageable qu'après des compléments d'évaluation.

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail a été effectuée avec le concours du Département de Chimie Inorganique de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERTON Y., LE BERRE P., (1983) : Guide de prospection des matériaux de carrière. Manuels et Méthodes du BRGM, N°5, BRGM, Orléans Ed. France, 160 p.
- CARVALHO A., BOULANGÉ B., MELFI A.J., LUCAS Y., (1997) : Brazilian bauxites. USP/FAPESP/ORSTOM Ed., Sao Paulo – Paris, 320 p.
- CROSS W., IDDINGS J.P., PIRSSON L.V., WASHINGTON H.S., (1902) : A quantitative chemico-mineralogical classification and nomenclature of igneous rocks. J. Geol., n° 10, pp. 555-690.

- EDOU MINKO A., TRESCASES J.J., (1990) : Un modèle d'altération météorique en zone équatoriale humide : les profils développés sur le gneiss d'Ovala (Gabon). *Géodynamique*, vol. 5, n° 2, pp. 95-110.
- EKODECK G.E., (1984) : L'altération des roches métamorphiques du Sud Cameroun et ses aspects géotechniques. Thèse Doct. d'Etat ès Sci. Nat., IRIGM, Univ. Scientif. et Médic., Grenoble I, France, 368 p.
- EKODECK G.E., (1989) : L'algorithme généralisé de restructuration normative altérologique et les diagrammes correspondants d'interprétation et de caractérisation. Doc. inéd., dact., 116 p.
- EKODECK G.E., KAMGANG K.B., (2001) : Intérêt de l'altérologie normative dans la sélection des matériaux argileux à usage industriel pour le bâtiment, la céramique fine et les réfractaires. Actes de la Première Conférence sur la Valorisation des Matériaux Argileux au Cameroun. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I Thème 2 : céramique et matériau de construction. Yaoundé, 11 – 12 Avril 2001; pp 71-89.
- EKODECK G.E., KAMGANG K.B., (2002) : L'altérologie normative et ses applications. Une expression particulière de la pétrologie des roches alumino-silicatées du point de vue de leur évolution supergène. Presses Univ. de Yaoundé Ed., Coll. Connaissances, 232 p.
- GOLDICH S.S., (1938) : A study in rock weathering. *J. Geol.*, n° 46, pp. 17-23.
- KAMGANG K.B., (1998) : Evolution supergène des roches et incidences phytogéographiques : cas du contact forêt - savane du Sud-Est Cameroun. Thèse Doct. d'Etat ès Sci. Nat., Fac. Sci., Univ Yaoundé I, Cameroun. 208 p.
- LELONG F., (1967) : Détermination quantitative par voie chimique des constituants minéraux de produits argileux d'altération tropicale. *Bull. Gr. Fr. Arg.*, n° 19, pp. 49-67.
- LELONG F., (1969) : Nature et genèse des produits d'altération des roches cristallines sous climat tropical humide (Guyane française). Thèse Fac. Sci. Univ. Nancy I, France. 182 p., et Mém. Sc. Terre, n° 14, 188 p.
- LELONG F., TARDY Y., GRANDIN G., TRESCASES J.J., BOULANGÉ B., (1976) : Pedogenesis, chemical weathering and processes of formation of some supergene ore deposits. In Handbook of stratabound and stratiform ore deposits, Chap. 3. Elsevier Scient. Publ. Co, Amsterdam, pp. 93-173.
- LEPRUN J.C., (1979) : Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique Occidentale sèche. Genèse-Transformations-Dégradation. Thèse Doct., Fac. Sci., Univ. L. P., Strasbourg, France, et *Mém. des Sci. Géol.*, n° 58, 224 p.
- LIBOUM (2001) : Caractérisation minéralogique et superficielle de quelques sols ferrallitiques de la région de Yaoundé en vue de leur utilisation dans les matériaux de terre cuite. Actes de la Première Conférence sur la Valorisation des Matériaux Argileux au Cameroun. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I Thème 2 : céramique et matériau de construction. Yaoundé, 11 – 12 Avril 2001; pp 101-114.
- LYON ASSOCIATES INC., (1971) : Laterites and lateritic soils and other problem soils of Africa. An engineering study for Agency for International Development AID/csd-2164, June 1971. Building and Road Research Institute, Kumasi, Ghana, 290 p.
- MILLOT G., BONIFAS M., (1955) : Transformations isovolumétriques dans les phénomènes de latéritisation et de bauxitisation. *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr., France*, n° 8, pp. 3-10.
- NJOPWOUO D. : (1984) : Minéralogie et physico-chimie des argiles de Bomkoul et de Balengou (Cameroun). Utilisation dans le renforcement du caoutchouc naturel. Thèse doct. d'Etat, Fac. Sci., Univ. Yaoundé, Cameroun, 300 p.
- NJOPWOUO D. (1986) : Caractéristiques minéralogiques et nanomorphologiques de deux argiles de zone latéritique camerounaise et leur influence sur les propriétés des mélanges maîtres caoutchouc-argile. Actes Sémin. Rég. sur les Latérites : Sols, Matériaux, Minerais., Douala (Cameroun), 21-27 Janvier 1986. ORSTOM France Ed., Sér. Colloques et Séminaires, pp. 223-233.
- NJOPWOUO D. (1988 a) : Cristallinité et nanomorphie de l'argile kaolinique de Bomkoul (Cameroun). *Ann. Fac. Sci., Univ. Yaoundé, Sér. Chim., Vol. 2, n° 1-2, pp. 31-42.*
- NJOPWOUO D. (1988 b) : Minéralogie de la fraction fine des matériaux argileux de Missellélé et de Mussaka (Cameroun) utilisables dans le renforcement du caoutchouc naturel. *Ann. Fac. Sci., Univ. Yaoundé, Sér. Chim., Vol. 2, n° 1-2, pp. 159-172.*
- NJOPWOUO D., WANDJI R. (1988) : Minéralogie et comportement de quelques argiles camerounaises au renforcement du caoutchouc naturel par voie humide. *Ann. Fac. Sci., Univ. Yaoundé, Sér. Chim., Vol. 2, n° 1-2, pp. 187-200.*
- PÉDRO 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. *C. R. Acad. Sci., Paris, France*, 273 D., pp. 1543-1546.
- PION J.C., (1979) : Altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale sèche. Etude de quelques toposéquences en Haute Volta. Thèse Doct., Fac. Sci., Univ. L. P., Strasbourg, France, et Mém. des Sci. Géol., n° 57, 220 p.
- TÉJIOGAP E., KAMDEM N., DÉPÉNYOU F.J., KÉNGNÉ C.B., WOUATONG A.S.L., ELIMBI A., NJOPWOUO D. (2001) : Minéralogie des argiles kaoliniques blanches de Lembo (Bana, Ouest-Cameroun) utilisables dans la céramique. Actes de la Première Conférence sur la Valorisation des Matériaux Argileux au Cameroun. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I Thème 2 : céramique et matériau de construction. Yaoundé, 11 – 12 Avril 2001; pp 129-137.

Received: 06/10/02

Accepted: 03/08/03