

Spectral (MIR) determination of kaolinite and gibbsite contents in lateritic soils

José Madeira, Ali Bédidi, Marcel Pouget, Bernard Cervelle and Nicholas Flay

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 321, série II a,
p. 119 à 128,
1995

J. M. : EMBRAPA-CPAC,
km 18 da Br 020, 73300 Planaltina DF,
Brazil ;

A. B. and B. C. : Université
de Marne-la-Vallée,
Laboratoire de Physique et Mécanique
des Géomatériaux,
2, rue de la Butte-Verte,
93166 Noisy-le-Grand Cedex, France ;

M. P. : ORSTOM-Chili,
Casilla 53390, Santiago 1, Chile ;

N. F. : Académie des Sciences,
23, quai de Conti, 75006 Paris, France.

Abstract Kaolinite and gibbsite are the fundamental components of lateritic soils, along with iron oxides and oxyhydroxides and residual quartz. The relative proportion of these two minerals are a probe of the degree of development of these soils, which explains the importance of quantitative measurement. The relative proportion is usually determined using chemical analysis or X-ray diffraction, which are time consuming and costly techniques. A new procedure, based on diffuse reflectance spectroscopy, is proposed to estimate kaolinite and gibbsite abundances in lateritic soils. For kaolinite, the analysis concerned only the content in the clay fraction of the fine residue. In addition, an index was found, that could estimate accurately the ratio $K_1 = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ in lateritic soils. These measurements may be conducted directly in the field using a portable spectrometer.

Keywords: Diffuse reflectance, Kaolinite, Gibbsite, Mid-infrared.

Résumé Signatures spectrales (MIR) des teneurs en kaolinite et gibbsite des sols latéritiques

Kaolinite et gibbsite sont, avec les oxyhydroxydes de fer et le quartz, les constituants de base des sols latéritiques. Les proportions relatives de ces deux minéraux sont des témoins du degré d'évolution de ces sols, d'où l'intérêt de leur détermination quantitative, généralement réalisée par des analyses chimiques ou par diffraction des rayons X, techniques longues et coûteuses.

Une procédure nouvelle est proposée ; elle est fondée sur la spectroscopie optique en réflectance diffuse et permet une estimation satisfaisante de la teneur en gibbsite et en kaolinite dans les sols étudiés. Pour cette dernière, l'estimation concerne la teneur en kaolinite dans la seule fraction argileuse de la terre fine.

En outre, un indice basé sur les intensités d'absorption de la kaolinite et de la gibbsite ($I_{\text{kaol}}/I_{\text{kaol}} + I_{\text{gib}}$), a été trouvé pour estimer d'une façon précise le rapport $K_1 = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dans les sols latéritiques. Ces déterminations peuvent être effectuées directement sur le terrain à l'aide d'un spectromètre portable.

Mots-clés : Réflectance diffuse, Kaolinite, Gibbsite, Moyen Infra-Rouge.

Version
française
abrégée

INTRODUCTION

AVEC les oxyhydroxydes de fer et le quartz, la kaolinite et la gibbsite constituent la base minéralogique des sols latéritiques. La prédominance de gibbsite et (ou) de kaolinite indique différents stades d'évolution, d'où l'importance de leur détermination quantitative qui s'effectue généralement par des analyses chimiques et diffractométriques longues et coûteuses. D'autres

techniques telles que la spectroscopie de réflectance diffuse sont cependant utilisées pour cette caractérisation minéralogique des sols. La recherche de relations quantitatives entre l'intensité des bandes d'absorption et les constituants minéralogiques est une approche relativement nouvelle, en raison du développement récent de la technologie des spectrophotomètres (coût, performances et portabilité).

On se propose ici de vérifier la possibilité d'utiliser les données spectrales (infrarouge

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

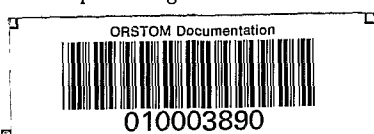
N° : 43154

Cote : B ex 1

Note

présentée par
Georges Pedro.

remise le 20 mars 1995,
acceptée après révision
le 15 juin 1995.



moyen) pour la détermination quantitative de kaolinite et de gibbsite dans les sols latéritiques.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les échantillons de sol

Les 56 échantillons de sols utilisés dans cette étude correspondent à des horizons de surface et de profondeur, prélevés dans 27 profils pédologiques brésiliens représentatifs de la variabilité d'une partie importante des oxisols.

Préparation des échantillons et mesures préliminaires

Après séchage à l'air, les échantillons sont tamisés à 2 mm et leurs différentes teneurs en Al_2O_3 et SiO_2 ont été déterminées après un double traitement chimique : la méthode triacide (Harrison, 1933) et la méthode CBD (Mehra et Jackson, 1960). Les échantillons ont été ensuite traités à l'eau oxygénée (10 %) pour éliminer la matière organique, et analysés par diffraction des rayons X. Par combinaison des résultats de ces analyses, les teneurs en kaolinite et en gibbsite ont été déterminées.

Les échantillons analysés par diffraction X ont été tamisés à 0,05 mm et dispersés aux ultrasons, puis leurs spectres de réflectance diffuse ont été mesurés à l'aide d'un CARY 2300.

Définition et mesure des intensités d'absorption

Dans les sols, lorsque la kaolinite et la gibbsite sont présentes, leurs bandes d'absorption se superposent et rendent difficile l'identification d'une ligne de base sur laquelle on puisse considérer des intensités d'absorption qui ne soient pas affectées par l'absorption voisine (fig. 1). Le point de réflectance maximale situé entre les bandes d'absorption de la kaolinite et gibbsite a donc été choisi comme point de référence pour la mesure des intensités d'absorption des deux minéraux.

Soit :

$$I_{\text{kaol}} = R_{\text{max}} - R_{2205}$$

et

$$I_{\text{gib}} = R_{\text{max}} - R_{2265}$$

où I_{kaol} = intensité d'absorption de la kaolinite ; I_{gib} = intensité d'absorption de la gibb-

site ; R_{max} = réflectance maximum entre 2 205 et 2 265 nm ; R_{2205} = réflectance à 2 205 nm et R_{2265} = réflectance à 2 265 nm.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les teneurs en kaolinite et gibbsite des sols mesurés par voies chimique et diffractométrique

Les teneurs en kaolinite (kaol) et gibbsite (gib), dosées sur les 56 échantillons, varient respectivement de 7,3 à 59,3 % et de 0 à 53,2 %, soit une gamme très étendue.

Pour ces sols ayant subi de fortes altérations, la kaolinite et la gibbsite constituent la quasi-totalité de la fraction argile. Ramenées à cette dernière, on vérifie que les teneurs en ces deux minéraux représentent 53 à 100 % du total. Dans le cas présent, les oxydes de fer, qui complètent la fraction argile, représentent au maximum 17,5 %, exprimés en Fe_2O_3 , de ce total, les concentrations moyennes en oxydes restant sont inférieures à 5 %.

Par ailleurs, l'analyse microscopique des échantillons montre que la fraction sable (50 à 2 000 μm) est essentiellement constituée de quartz avec quelques nodules ferro-argileux résiduels.

Comparaison avec les intensités d'absorption mesurées sur les spectres optiques

Les analyses de régression réalisées entre teneur en gibbsite (gib%) et I_{gib} et entre teneur en kaolinite (kaol%) et I_{kaol} montrent que le coefficient de corrélation est assez satisfaisant ($r = 0,93$) pour la gibbsite (fig. 2), et médiocre ($r = 0,57$) pour la kaolinite.

Cependant, d'autres facteurs influencent I_{kaol} de telle façon que la teneur en kaolinite seule n'explique pas la totalité de la variance de I_{kaol} .

De fait, lorsque l'on effectue une régression multiple I_{kaol} vs (kaol% ; gib%), le coefficient de corrélation atteint 0,88, montrant ainsi que la teneur en gibbsite affecte aussi les mesures d'intensité d'absorption de la kaolinite. En revanche, pour la gibbsite, l'introduction de la teneur en kaolinite dans le modèle de régression n'a pas altéré la corrélation.

La fraction argile étant constituée en grande partie de kaolinite et de gibbsite, on obtient un meilleur degré d'ajustement ($r = 0,91$) en considérant les teneurs en kaolinite rapportée à la fraction argile (fig. 3).

L'hypothèse d'une interférence de l'absorption de la gibbsite sur la mesure I_{kaol} se trouve confortée d'autant que, pour la gibbsite, cette même opération n'améliore pas la corrélation ($r = 0,92$).

En résumé, on constate que la mesure I_{gib} peut être utilisée pour l'estimation de la teneur en gibbsite dans la terre fine ou dans la fraction argile des latosols. En revanche, la mesure I_{kaol} estime de façon satisfaisante les teneurs en kaolinite dans la fraction argile seulement.

Détermination du rapport K_i à partir des spectres de réflectance diffuse

Le rapport moléculaire $K_i = SiO_2/Al_2O_3$ est souvent utilisé comme un indicateur du degré d'altération pour les sols. Dans la classification brésilienne des sols, les valeurs K_i sont prises en compte pour la discrimination de certaines classes de sols. Pour les latosols, pratiquement dépourvus de matériaux primaires facilement altérables, ce rapport SiO_2/Al_2O_3 correspond en fait au rapport des teneurs kaolinite/kaolinite + gibbsite.

Il devient alors possible de tenter une modélisation du rapport K_i à partir des spectres de réflectance diffuse et plus précisément des mesures d'intensité des absorptions de la kaolinite et de la gibbsite.

On vérifie ainsi que le rapport des intensités d'absorption $I_{kaol}/(I_{kaol}+I_{gib})$ est en étroite relation linéaire avec :

- d'une part le rapport kaol/kaol+gib ($r = 0,97$),

- et d'autre part le rapport K_i lui-même (fig. 4).

Ce rapport des intensités d'absorption de la kaolinite et de la gibbsite $I_{kaol}/I_{kaol}+I_{gib}$ permet donc une estimation de la valeur du rap-

port K_i dans les sols étudiés. L'identification des rapports entre kaolinite et gibbsite dans les couvertures latéritiques est un indicateur important pour la discrimination de sols à différentes phases d'évolution génétique. Ce paramètre est difficilement identifiable sur le terrain, puisqu'il n'est en relation avec aucun caractère morphologique. Il n'existe pas non plus de test physique ou chimique de réalisation rapide, permettant une détermination de ce rapport. En effet, la valeur K_i est obtenue par des analyses de laboratoire longues et coûteuses.

CONCLUSION

Les mesures de la réflectance diffuse permettent une identification précise et une estimation quantitative des deux principaux constituants minéralogiques (kaolinite et gibbsite) des sols ferrallitiques étudiés.

D'excellentes relations ont été obtenues entre la valeur du rapport $K_i = SiO_2/Al_2O_3$ et les paramètres dérivés des spectres de réflectance diffuse. Elles découlent de l'absence de minéraux argileux, autres que la kaolinite, susceptibles d'influencer ce rapport dont la détermination peut être réalisée par spectroscopie de réflectance diffuse.

L'application de ces résultats en télédétection spatiale reste conditionnée par l'utilisation, sur les satellites d'observation de la Terre, de capteurs multispectraux tels que AVIRIS (Goetz *et al.*, 1983). En revanche, ces résultats sont immédiatement utilisables pour déterminer sur le terrain, avec des spectroradiomètres portables, le rapport $K_i = SiO_2/Al_2O_3$, indicateur du degré d'évolution génétique des sols latéritiques.

INTRODUCTION

Along with iron oxyhydroxides and quartz, kaolinite and gibbsite form the basic mineral composition of lateritic soils. The relative predominance of gibbsite or kaolinite marks different stages of development, which explains the importance of quantitative measurement. This is usually achieved by

chemical and X-ray diffraction (XRD) analyses, which are long and costly. Other techniques are, however, used for such mineralogical characterization of soils, such as diffuse reflectance spectroscopy. Spectrally, the main kaolinite and gibbsite events, produced by vibrations of hydroxyl ions OH^- in their crystal lattice, are expressed in the mid infrared range by closely situated - between 2,200

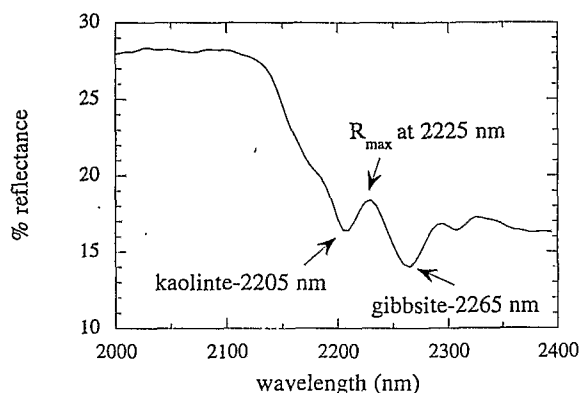


Fig.1 Diffuse reflectance spectrum (2,000 to 2,400 nm) of a soil sample containing 39% kaolinite and 40% gibbsite.

Spectre de réflectance diffuse (2 000 à 2 400 nm) d'un échantillon de sol contenant 39 % de kaolinite et 40 % de gibbsite.

and 2,300 nm – yet easily locatable absorption bands.

Prost *et al.* (1983), studying reflectance spectra of kaolinite pastes (kaolinite + water), have shown correlations between water content and the surface area of water absorption bands. Hauff *et al.* (1990) and Kruse *et al.* (1991) used diffuse reflectance spectra to estimate kaolinite contents in material from the Paris basin containing mixed-layer kaolinite/smectite clays. Their approach related a measurement of the asymmetry of kaolinite absorption bands to its content in the materials analysed.

Beside the surface area and asymmetry of absorption bands, their intensity can be measured. Thus, the search for quantitative relationships between absorption band intensity and mineral constituents is a relatively new approach resulting from recent developments in spectrophotometer technology that make them increasingly effective, cheaper and more compact. Portable ones exist that can be used directly in the field.

We demonstrate here the possibility of using spectral data (mid infrared) for quantitative determination of kaolinite and gibbsite in lateritic soils. To this end, we have obtained with a CARY 2300 spectrometer the diffuse reflectance spectra from 56 soil samples taken from 27 profiles representing most of the lateritic soils found in Brazil. Chemical and mineralogical analyses have enabled comparison between sample composition and spectral characteristics. The problem here lies in the proximity of the two minerals' absorption peaks (between 2,200

and 2,300 nm). A new measurement procedure for absorption intensity of kaolinite and gibbsite that takes into account the maximum reflectance point between the two absorption bands, will be proposed to characterize each sample.

MATERIAL AND METHODS

Origin of soil samples

The 56 soil samples used in this study correspond to surface and deeper horizons occurring in 27 profiles. They are from one of two main sources:

a) a set of 25 samples, supplied by the Brazilian "Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos" (SNLCS), represent 14 soil profiles from all over Brazil:

– 23 samples, from 13 profiles, chosen as representing the variability found in a large number of the oxisols by the International Committee for the Study of Oxisols (ICOMOX) at the Eighth International Soil Classification Workshop. The detailed description of the profiles appears in EMBRAPA-SNLCS (1986);

– 2 samples originate from a profile studied during the Third Classification Meeting "Correlation and Interpretation of Agricultural Potential of Soils" (IIIRD RCC). The description of this profile is in Camargo et Olmos (1984).

b) a set of 31 samples represent 13 profiles belonging to four toposequences studied in the Brasilia area (Madeira, 1991).

In the Brazilian classification system (Camargo *et al.*, 1987), almost all the lateritic soils studied are placed with the latosols (oxisols, ferrallitic soils).

Sample preparation

Samples were dried in air, then sieved at 2 mm. Each was divided into two portions. The first, not treated and containing the original organic matter, was used in atomic absorption spectroscopy measurement of kaolinite and gibbsite contents. The second portion, treated with 10% hydrogen peroxide to eliminate organic matter, was used

for X-ray diffraction analysis and for diffuse reflectance spectra measurement.

Chemical and XRD determination of kaolinite and gibbsite contents

A double chemical extraction was first performed:

a) initial extraction by the triacid method (Harrison, 1933) allowing estimation by atomic absorption spectroscopy of:

- SiO_2 -tot content as triacid-soluble silica, *i.e.* the clay mineral silica.

- Al_2O_3 -tot content as triacid-soluble alumina, *i.e.* the alumina in clay minerals and oxides.

The triacid action dissolves the secondary minerals (clay minerals, iron oxides and oxyhydroxides) without altering the primary ones, quartz in particular (Njopwouo and Orliac, 1979).

b) a second extraction with citrate-bicarbonate-dithionite (Mehra and Jackson, 1960) then measured:

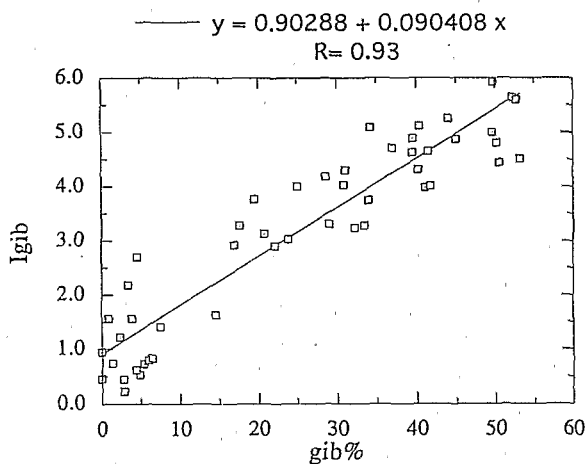
- SiO_2 -CBD content as CBD-soluble silica.

- Al_2O_3 -CBD content as CBD-soluble alumina.

The CBD is extremely effective in dissolving iron oxides and hydroxides without destroying the gibbsite or the kaolinite (Jeanroy, 1983). Amounts of Al_2O_3 dissolved by CBD action can therefore be attributed to isomorphic replacement of Al_2O_3 in the goethite and to amorphous components (Jeanroy, 1983).

Analysis of X-ray diffractograms subsequently reveals the samples' main mineral constituents: quartz, kaolinite, gibbsite, iron oxyhydroxides.

The mineral composition thus found and the extraction properties of the triacid reagents and CBD allow determination of SiO_2 and Al_2O_3 values for kaolinite and gibbsite derived from calculating SiO_2 -tot - SiO_2 -CBD and Al_2O_3 -tot - Al_2O_3 -CBD. Using this reasoning and the theoretical formula for kaolinite ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and gibbsite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), one can calculate:



a) kaolinite content:

$$\text{kaol}\% = \frac{258}{120} (\text{SiO}_2\text{-tot} - \text{SiO}_2\text{-CBD})$$

b) alumina content in the kaolinite:

$$\text{Al}_2\text{O}_{3\text{kaol}\%} = \frac{102}{258} \text{kaol}\%$$

c) gibbsite content:

$$\text{gib}\% = \frac{156}{102} (\text{Al}_2\text{O}_3\text{-tot} - \text{Al}_2\text{O}_3\text{-CBD}) - \frac{1}{102} \text{Al}_2\text{O}_{3\text{kaol}\%}$$

The values for kaolinite, hence for alumina, thus obtained can be a little too high owing to partial solubilization of quartz.

Kaolinite and gibbsite content determination from diffuse reflectance spectra

Recording of diffuse reflectance spectra

The diffuse reflectance spectra between 400 and 2,500 nm (in steps of 5 nm) were obtained with a CARY 2300 spectrophotometer. After drying in air for about 10 days, samples with good uniformity of compaction and surface are achieved by methods described by Shields *et al.* (1968). In order to be passed in the spectrometer the samples are covered with a silica plate, transparent for the wavelengths being studied, and whose optical effects can be ignored (Bédidi *et al.*, 1992).

Fig. 2 Correlation between absorption intensity for gibbsite (I_{gib}) and gibbsite content (gib%) for 52 samples. Magnetite- and ilmenite-rich samples are not taken into account.

Corrélation entre l'intensité d'absorption de la gibbsite (I_{gib}) et la teneur en gibbsite (gib%) pour 52 échantillons de sols. Les échantillons riches en magnétite et en ilménite n'ont pas été pris en compte.

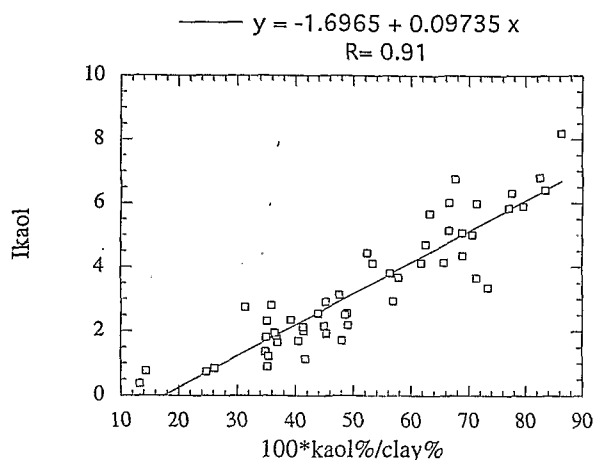


Fig. 3 Correlation between absorption intensities for kaolinite (I_{kaol}) and kaolinite content as a function of clay content in fine earth (kaol%/clay%) for 52 samples. Magnetite- and ilmenite-rich samples not taken into account.

Corrélation entre l'intensité d'absorption de la kaolinite (I_{kaol}) et la teneur en kaolinite ramenée à la fraction argile de la terre fine (kaol%/clay%) pour 52 échantillons de sols. Les échantillons riches en magnétite et en ilménite n'ont pas été pris en compte.

Interpretation of spectra

The principal spectral features for kaolinite are produced by vibrations of hydroxyl ions (OH^-) in its crystal network.

In the near infrared, the absorption bands present in the samples spectra are caused on the one hand by the first harmonic of the fundamental stretching mode of OH^- (1.4 μm), and on the other, by combination of that mode with the fundamental binding mode of Al-O-H (2.2 μm). The exact position of these events is given by Crowley and Vergo (1988): 1,395/1,495 and 2,163/2,208 nm. The spectral events occurring in gibbsite spectra result from vibrations of OH^- groups.

Determination of absorption intensity of kaolinite and gibbsite

The results obtained by Prost *et al.* (1983), quantifying relationships between water content in a kaolinite paste (kaolinite + water) and absorption intensities at 1,93 μm , served as a guide in looking for specific spectral signatures for the soil samples. However, in these soils, when kaolinite and gibbsite are present, their absorption bands superimpose, making it difficult to identify a baseline for investigating the absorption intensities unaffected by the neighbouring absorption (fig. 1). The point of maximum reflectance situated between the absorption bands for kaolinite and gibbsite has therefore been chosen as reference

to measure absorption intensities of the two minerals. Thus:

$$I_{kaol} = R_{max} - R_{2205}$$

$$I_{gib} = R_{max} - R_{2265}$$

where I_{kaol} is kaolinite absorption intensity, I_{gib} is gibbsite absorption intensity, R_{max} is maximum reflectance between 2,205 and 2,265 nm. R_{2205} is reflectance at 2,205 nm and R_{2265} is reflectance at 2,265 nm.

Validation of spectral signatures for estimating kaolinite and gibbsite contents

Validation of the spectral signature entails the checking of correlations that exist between: (1) the concentrations of kaolinite kaol% and gibbsite gib% estimated on the non treated samples; and (2) the absorption intensity corresponding to the kaolinite I_{kaol} and gibbsite I_{gib} determined as described above for samples without the organic matter; this is to avoid the, albeit limited, effects it may have on the reflectance between 2,100 and 2,300 nm (Madeira, 1991).

RESULTS AND DISCUSSION

Soil kaolinite and gibbsite determination by chemical and XRD methods

Concentrations in kaolinite (kaol%) and gibbsite (gib%), evaluated on the 56 tot samples, vary respectively from 7.3 to 59.3% and from 0 to 53.2%, which is an extensive range. In severely weathered soils, kaolinite and gibbsite make up almost the whole of the clay fraction. Reduced to the latter, levels of these minerals are confirmed to be 53 to 100% of the total. In the present case, the iron oxides, which constitute the rest of the clay fraction, represent at most 17.5% of the total, expressed as Fe_2O_3 , the average oxide concentrations staying lower than 5%.

These observations justify the close positive correlation between the sum (kaol + gib) and the clay content (granulometric clay). Alongside this, optical microscopy shows that the samples' sand fraction (50 to 2,000 μm) consists essentially of quartz with some residual iron-clay nodules.

Comparison with absorption intensities measured on optical spectra

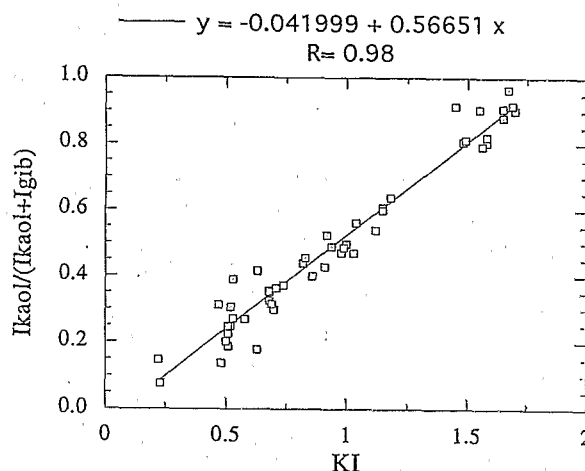
The relationships, obtained by linear regression, between gibbsite content (gib%) and I_{gib} , and kaolinite content (kaol%) and I_{kaol} are significant at a 99% degree of confidence. Correlation coefficients are satisfactory for gibbsite ($R = 0.93$) (fig. 2) but poor ($R = 0.57$) for kaolinite.

These results indicate a linear relationship between kaolinite contents and absorption intensities determined by the described method. However, other factors influence I_{kaol} in such a way that the kaolinite content does not by itself explain all the variance of I_{kaol} . Multiple regression for I_{kaol} vs (kaol%; gib%), yields a correlation coefficient of 0.88, which shows that gibbsite content also affects absorption intensity measurements for kaolinite. For gibbsite, however, inclusion of the kaolinite content in the model did not modify the correlation. As the clay fraction consists mainly of kaolinite and gibbsite, a better degree of adjustment is obtained ($r = 0.91$) by considering the kaolinite contents in relation to the clay fraction (fig. 3). The hypothesis that gibbsite absorption interferes with the I_{kaol} measurement is reinforced by the fact that the clay fraction consist mostly of kaolinite and gibbsite.

It is observed, therefore, that I_{gib} can be used to estimate the gibbsite content of latosols. In contrast, I_{kaol} gives satisfactory estimation of kaolinite contents only for the clay fraction. Inclusion of other parameters can lead to more accurate estimation methods for the kaolinite content of latosols using diffuse reflectance spectra. Work by Hauff *et al.* (1990) and Kruse *et al.* (1991) is particularly relevant to this aspect.

Determination of K_i ratio from diffuse reflectance spectra

The molecular ratio $K_i = SiO_2/Al_2O_3$ is often employed for soils as an indicator of the degree of weathering. In the Brazilian soil classification, K_i values are taken into account to distinguish certain soil classes. For latosols, practically devoid of easily wea-



thered primary materials, this SiO_2/Al_2O_3 ratio corresponds to the kaolinite/(kaolinite + gibbsite) concentration ratio.

The K_i ratio can hence be modelled starting from diffuse reflectance spectra and, more precisely, absorption intensities measured for kaolinite and gibbsite. In this way, one can verify that the ratio of the absorption intensities $I_{kaol}/(I_{kaol} + I_{gib})$ is in close linear relation with: (1) the kaol%/(kaol% + gib%) ratio ($R = 0.97$); (2) the K_i ratio itself (fig. 4). Using this ratio between the absorption intensities of kaolinite and gibbsite $I_{kaol}/(I_{kaol} + I_{gib})$ the K_i ratio for the studied soils can be estimated.

The foregoing results reveal possible applications of diffuse reflectance data in pedology. The identification of ratios existing between kaolinite and gibbsite in lateritic deposits is an important indicator for distinguishing soils at different stages of generation. This parameter is, however, difficult to identify in the field because it bears no relation to any morphological character and no rapid physical or chemical test for it exists. K_i can be obtained only by long, costly laboratory analyses. Nevertheless, rapid technological advances in spectrometry equipment mean that field spectro-images are now available as accurate as laboratory spectrometers (Vane and Goetz, 1988). The potential exists therefore to apply the results obtained here, either directly in the field using portable spectroradiometers that operate in the near and mid infrared (Kruse *et al.*,

Fig. 4 Correlation between K_i ratio and absorption intensity ratio ($I_{kaol}/(I_{kaol} + I_{gib})$) for 52 samples. Magnetite- and ilmenite-rich samples are not taken into account.

Corrélation entre le rapport K_i et le rapport des intensités d'absorption, ($I_{kaol}/(I_{kaol} + I_{gib})$) pour 52 échantillons. Les échantillons riches en magnétite et en ilménite n'ont pas été pris en compte.

1991), or by processing of data on the Earth's surface obtained from air-borne and space-borne sensors.

CONCLUSION

Diffuse reflectance determined using a spectrophotometer (2,000 to 2,400 nm), allows accurate identification and quantitative estimation of the two main mineral constituents (kaolinite and gibbsite) of the ferrallitic soils studied. Analysis of the two minerals' absorption peaks on the spectra leads to definition and measurement of the absorption intensity of kaolinite I_{kaol} and of gibbsite I_{gib} :

a) the gibbsite content of latosols can be satisfactorily estimated by measuring this mineral's absorption intensity, particularly the absorption peak, which is easily distinguishable at 2,265 nm.

b) kaolinite is identified by features situated at 2,205 nm. The method adopted gives a correct value only in the clay fraction of the latosols. Other procedures for determining absorption intensity could be tried to

distinguish between the superimposed bands (such as measurement of band width, use of second derivative of spectra).

Excellent relationships have been obtained between the ratio $K_i = SiO_2/Al_2O_3$ and the parameters derived from diffuse reflectance spectra. They stem from the absence of clay minerals, other than kaolinite, that can alter the relationship measurable by diffuse reflectance spectroscopy.

Application to satellite data cannot be envisaged for existing sensors. Only Thematic Mapper has a band (TM7) in the area of absorptions produced by hydroxyl OH^- group vibration in clays and gibbsite. The width of band TM7 precludes individual recognition of spectral features for these minerals. These results can be applied to satellite remote sensing only if multispectral sensors are used (Goetz *et al.*, 1983). Nevertheless, this technique can be used immediately in the field, employing portable spectrometers to obtain the ratio $K_i = SiO_2/Al_2O_3$, an indicator of the degree of development of lateritic soils.

REFERENCES

- BEDIDI, A., CERVELLE, B., MADEIRA, J. and POUGET, M., 1992. Moisture effects on visible spectral characteristics of lateritic soils, *Soil Sci.*, 153, pp. 129-141.
- CAMARGO, M. and OLMOS, J. I. L., 1984. Guia de excursao de estudo de solos nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro Sao Paulo e Parana, EMBRAPA, Rio de Janeiro.
- CAMARGO, M., KLANT, E. and KAUFFMAN, J. H., 1987. Sistema Brasileiro de classificaçao de solos, *B. Inf., Soc. Bras. Ci. Solo*, 12, pp. 11-33.
- CROWLEY, J. K. and VERGO, N., 1988. Near-Infrared reflectance spectra of mixtures of kaolin-group minerals: use in clay mineral studies, *Clays and Clay Minerals*, 36, pp. 310-316.
- EMBRAPA-SNLCS, 1986. Field guide, *Eighth International Soil Classification Workshop (Brazil)*, EMBRAPA, Rio de Janeiro.
- GOETZ, A. F. H., ROCK, B. N. and ROWAN, L. C., 1983. Remote Sensing for Exploration: An Overview, *Economic Geology*, 78, pp. 573-590.
- HARRISON, J. B., 1933. The katamorphism of igneous rock under humid tropical conditions, *Imperial Bureau of Soil Science*, Harpenden, UK, 79 p.
- HAUFF, P. L., KRUSE, F. A. and THIRY, M., 1990. Spectral identification and characterization of kaolinite/smectite clays in weathering environments, In *5th Australasian Remote Sensing Conference*, Perth, Australia, 8-12 October, pp. 898-905.
- KRUSE, F. A., THIRY, M. and HAUFF, P. L., 1991. Spectral identification (1.2-2.5 μm) and characterization of Paris Basin kaolinite/smectite clays using a field spectrometer, In: *5th International Colloquium. Physical Measurements in Remote Sensing*, Courchevel, France, 14-21 January, 1991, pp. 181-184.
- JEANROY, E., 1983. Diagnostic des formes du fer dans les pédogenèses tempérées. Évaluation par les réactifs chimiques et apports de la spectrométrie de Mössbauer, *Thèse de Doctorat*, Université de Nancy, France, 215 p.
- MADEIRA, J., 1991. Étude quantitative des relations constituants minéralogiques/réflectance diffuse des latosols brésiliens. Application à l'utilisation pédologique des données satellitaires TM (région de Brasília), *Doctorat thesis*, Université Paris-VI, France, 236 p.
- MEHRA, O. P. and JACKSON, M. L., 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate, In: *Clays and Clay Minerals (Proc. 7th Nat. Conf.)*, SWINEFORD, E., Ed., Pergamon Press, New York, pp. 317-327.

NJOPWOUO, D. and ORLIAC, M., 1979. Note sur le comportement de certains minéraux à l'attaque triacide, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 4, pp. 329-337.

PROST, R., KING, C. and LEFEBVRE

D'HELLEN COURT, T., 1983. Propriétés de réflexion diffuse de pâtes de kaolinite en fonction de leur teneur en eau, *Clay Minerals*, 18, pp. 193-204.

SHIELDS, J. A., PAUL, E. A., ST. ARNAUD, R. J. and HEAD, W. K., 1968. Spectrophotometric measurements of soil color and its relation to moisture and organic matter, *Can. J. Soil Sci.*, 48, pp. 271-280.

VANE, G. and GOETZ, A. F., 1988. Terrestrial imaging spectroscopy: *Remote sensing of Environ.*, 24, pp. 1-29.