

1/29

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 321, série II a, N° 4
p. 311 à 316,
1995

Rapidité de la vitesse d'altération des minéraux du sol en conditions ferrallitiques. Méthode des minéraux-test

Sophie Cornu, Yves Lucas, Thierry Desjardins et Serge Nitsche

Résumé Les minéraux des sols sont soumis à des dissolutions et reprécipitations en fonction des conditions de milieu, et en particulier de l'activité biologique. Pour déterminer la cinétique des réactions mises en jeu dans le recyclage des éléments chimiques, des sachets de minéraux test contenant séparément de la gibbsite, deux types de kaolinite et un verre siliceux, ont été introduits dans les horizons supérieurs d'un sol ferrallitique de forêt amazonienne. Au bout de 6 mois, toutes les phases implantées ont été altérées, et d'autres minéraux, oxy-hydroxydes de fer et de titane, sont apparus. La réactivité des minéraux secondaires avec les conditions de milieu est donc rapide à l'échelle des temps pédologiques dans les sols étudiés.

Mots-clés : Minéraux test, Altération, Sols ferrallitiques, Forêt équatoriale, Amazonie, Kaolinite.

Abstract **Rapid weathering kinetics of secondary minerals
in forest ferralsols of Central Amazonia: bag-mineral method**

Secondary minerals of soil depend on physical-chemical conditions in the soil horizons where they form, which are largely controlled by biological activity. Small bags containing various minerals, gibbsite, two kinds of kaolinite, and a silica gel, were introduced in top ferralsol horizons under Amazonian forest, in order to determine the kinetics of dissolution-precipitation reactions. After 6 months in soil, all the minerals had been weathered, and newly generated iron and titanium oxy-hydroxides had been formed. The conclusion is that, in the studied soil, secondary mineral reactions to environmental conditions progress in a short time compared with pedological times.

Keywords: Test minerals, Weathering, Ferralsols, Equatorial forest, Amazonia, Kaolinite.

**Abridged
English
Version**

FERRALSOLS are considered as deeply weathered soils. Their formation time, under moist tropical climate, is often long and with an intensive leaching (Millot, 1983; Pedro and Melfi, 1983). The secondary formed minerals are the last of the stability series of silicate and Fe-Al oxy-hydroxide minerals. Many ferralsols are characterized by kaolinite horizons overlying more gibbsitic horizons (Lucas, 1989). The classical soil formation models give no explanation of such a profile, which has often been considered as a sedimentary succession.

Recent studies of a ferralsol situated in the Manaus area, Amazonia, show that the kaolinite-over-gibbsite profile was formed *in situ* (Giral, 1994; Lucas, 1989; Lucas *et al.*, 1986), and that the soil can be considered as a dynamic equilibrium (Boulet, 1978). The stability of the kaolinite in the upper part of the profile is likely due to biological activity. The forest recycles a significant amount of chemical elements, particularly Si and Al, which control mineral-solution equilibria (Lucas *et al.*, 1993; Rose *et al.*, 1993). Callot *et al.* (1992) observe mineral formation in root cells of an Amazonian palm tree.

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

N° : 43157

Cote : Bex 1.

Note

présentée par
Georges Pedro.

remise le 20 février 1995,
acceptée après révision
le 2 mai 1995.

ORSTOM Documentation



010003895

It is thus recognized that soil minerals depend on environmental conditions, but the kinetics of *in situ* dissolution and new generation of secondary minerals are still poorly known. To study this problem, bags of test minerals (Ranger *et al.*, 1986) were introduced in the topsoil horizons (under the litter, at 5, 10 and 20 cm deep) of a ferralsol developed on a quartzo-kaolinitic sediment (Alter do Chão, Bezerra, 1989), where the biological activity is the greater (Chauvel *et al.*, 1984; Luizão *et al.*, 1992; Toutain, 1984). The bags are made with Durapore material filters, they contain one gram of two kinds of kaolinite, a synthetic gibbsite, a silicagel. This material is hydrophilic, not biodegradable, with a 0.22 μm porosity. The bags were removed after 6 months in the soil during a whole dry season and the beginning of the rainy season (June 1993 to January 1994).

No modification of the bag minerals appears through the X-ray diffraction analysis. This result suggests that modifications, if they exist, are lower than 5%. TEM observations and microanalyses show, however, some modifications.

– Round dark well crystallized Ti minerals (photo. G), that look like Anatase, are present in all the bags.

– Groups of crystallized Fe sticks are probably goethite (photo. H).

– Most of the kaolinites preserve their original form (photo. A), but there appear some irregular forms, blunted angles, cracked sides (photo. B), and some silicagel.

– The gibbsite partially lose their polyhedral form (photo. C) for irregular one (photo. D).

– At the beginning of the experiment, the silicagel formed big dark irregular particles without any special form (photo. E). After 6 months in the soil, it becomes more or less translucent to electron beam. There is disintegration of the silicagel particles (photo. F).

After six months in topsoil horizons, all the minerals were weathered, and newly generated iron oxy-hydroxides and titanium oxides formed. Ambrosi *et al.* (1986) have shown petrographic evidence of iron oxides and oxy-hydroxides formation associated with kaolinite dissolution. The conclusion is that, in the studied soil, secondary mineral reactions to the environmental conditions are rapid with regard to pedological times.

INTRODUCTION GÈNESE ET STABILITÉ DES SOLS FERRALLITIQUES

Les sols ferrallitiques couvrent une grande partie des régions tropicales ; leur importance est donc considérable tant du point de vue des phénomènes naturels, qu'économiquement et humainement. Ces sols sont en grande partie recouverts de forêt tropicale humide.

Ils sont généralement considérés comme un terme avancé de l'altération géochimique (Millot, 1983 ; Pedro et Melfi, 1983). Dans les milieux tropicaux chauds et humides au sein desquels ils se forment, les temps d'évolution ont souvent été longs et les phénomènes de lixiviation intenses. Les minéraux formés sont donc les derniers dans la

séquence de stabilité des silicates et des oxyhydroxydes d'aluminium et de fer.

De nombreux sols ferrallitiques présentent en sommet de profil des horizons kaolinitiques et en profondeur des horizons plus gibbsitiques (Lucas, 1989). Les modèles géochimiques et thermodynamiques classiques ne permettent pas d'expliquer la formation d'une telle séquence verticale. Celle-ci a longtemps été considérée comme la résultante d'apports de kaolinite allochtone, postérieurs à la formation des niveaux gibbsitiques.

Cependant, Lucas (1989) lors de l'étude d'un tel profil d'altération situé près de Manaus (Amazonie Centrale) observe une continuité morphologique et micromorphologique des séquences d'altération. Il en conclut que ce profil est issu de la progres-

sion verticale de plusieurs fronts d'altération successifs, avec peu ou pas d'apports extérieurs. D'autres arguments viennent renforcer cette thèse. Les caractères des argiles étudiées par diffraction des rayons X et par spectroscopie infrarouge varient très progressivement du bas vers le haut du profil (Lucas *et al.*, 1986). Giral (1994) montre que les rapports isotopiques des oxygènes des kaolinites de l'ensemble de ce profil sont en équilibre avec ceux des eaux météoriques actuelles. Toutes ces observations permettent de conclure que le profil est en équilibre dynamique (Boulet, 1978), ce qui signifie qu'à chaque niveau les minéraux sont soumis à des phénomènes de dissolution-précipitation déterminés par les conditions de milieu (Lucas *et al.*, 1986).

Lucas *et al.* (1993) mettent en évidence l'importance de la forêt dans le recyclage annuel du silicium. Rose *et al.* (1993) montrent, par ailleurs, que ce recyclage concerne également le fer et l'aluminium, et peut avoir joué un rôle important lors de la formation des sols tropicaux anciens. Enfin Callot *et al.* (1992) observent, au microscope électronique à balayage, sur des coupes de racines de palmier à huile poussant sur sol ferrallitique, des concentrations de kaolinite à l'intérieur des cellules en décomposition. La mise en jeu de l'activité biologique a ainsi été avancée comme explication de la succession des différents horizons du profil, et doit être prise en compte dans les modèles de fonctionnement géochimique des sols.

Si l'existence d'équilibres dynamiques des minéraux au sein des profils apparaît actuellement certaine, peu d'études ont porté sur les cinétiques de dissolution et de néoformation *in situ*. Or, selon cette cinétique, les hypothèses qui peuvent être déduites de la minéralogie des horizons sont radicalement différentes. Si les minéraux réagissent rapidement vis-à-vis des conditions de milieu par rapport au pas de temps des grands changements climatiques, ils auront eu, pour l'essentiel, le temps de s'équilibrer avec les conditions actuelles. Si au contraire les cinétiques sont lentes, une grande partie des minéraux observés dans le profil seront

des reliques des conditions climatiques passées. Dans le cas du profil de Manaus, il y a correspondance entre la composition isotopique de l'oxygène des kaolinites et celle des eaux de pluies actuelles. Cela peut être dû, soit à une stabilité du climat pendant le temps de formation des profils, soit à un rééquilibrage rapide des kaolinites avec les conditions bioclimatiques actuelles.

Pour répondre à ces questions, une expérience visant à estimer les vitesses de réaction et le sens des transformations minérales a été réalisée grâce à l'implantation de minéraux test en sommet de profil, selon une technique initialement développée par Ranger *et al.* (1986). C'est en effet dans les horizons de surface que les phénomènes biologiques sont les plus intenses, en particulier en milieu forestier tropical (Toutain, 1984).

CONDITIONS DE L'EXPÉRIENCE

Les sols ferrallitiques de la région de Manaus (Amazonie centrale) présentent un ensemble d'horizons supérieurs constitués essentiellement d'une matrice kaolinitique (77 %), gibbsitique (9 %) et goéthitique (3 %), et de quartz résiduel (9 %) issus de l'altération de la roche mère sous-jacente (sédiment Alter do Chão ; Bezerra, 1989). Les minéraux susceptibles d'être soumis à des processus rapides de dissolution-recristallisation sont la kaolinite, la gibbsite et la goéthite, le quartz étant de toute évidence hérité.

Des sachets de minéraux test contenant un gramme d'une phase minérale pure ont été introduits dans le sol, sous la litière, à 5, 10 et 20 cm de profondeur, niveaux dans lesquels on observe le maximum de racines et de matière organique (Chauvel *et al.*, 1987 ; Luizão *et al.*, 1992). Les sachets ont été confectionnés dans des filtres de porosité 0,22 µm, de 9,5 cm de diamètre, en toile Durapore, matériel thermo-soudable, hydrophile et non biodégradable. Ces filtres ont été pliés diamétralement. Quatre types de minéraux ont ainsi été introduits dans le sol :

– deux kaolinites bien cristallisées, l'une d'origine hydrothermale, l'autre provenant

Kaolinite

A : à l'état initial ;
B : après 6 mois dans le sol.

Gibbsite

C : à l'état initial ;
D : après 6 mois dans le sol.

Verre silicieux

E : à l'état initial ;
F : après 6 mois dans le sol.

Minéraux néoformés dans les sachets

G : Minéraux titanés ;

H : minéraux ferrifères.

Kaolinite

A: before experiment

B: after 6 months in soil.

Gibbsite

C: before experiment;

D: after 6 months in soil.

Silica gel

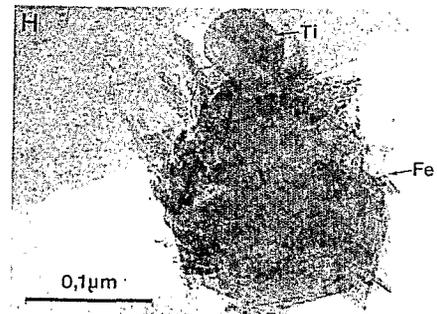
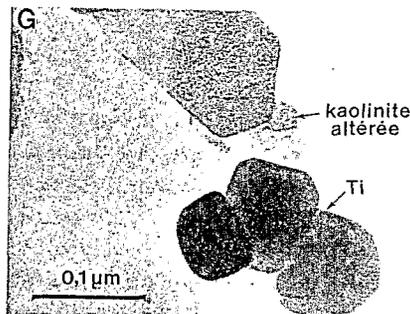
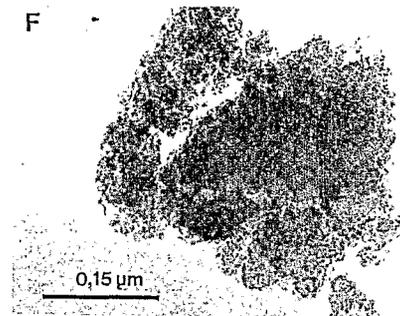
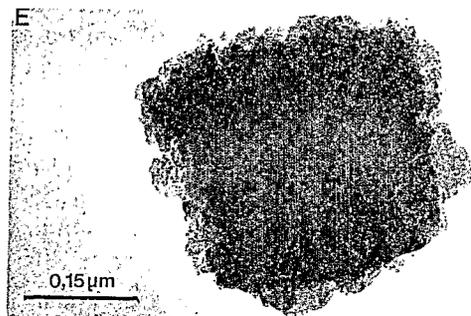
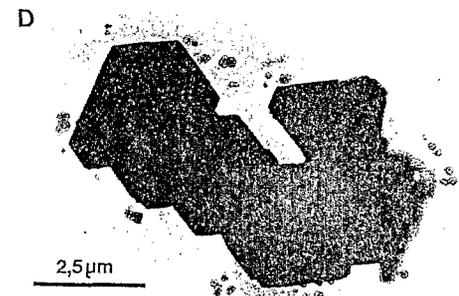
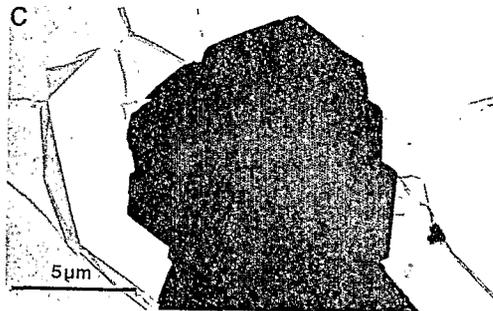
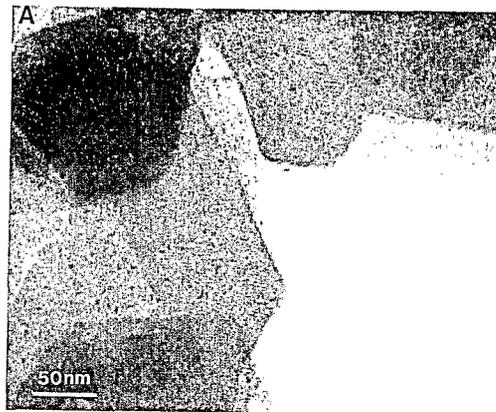
E: before experiment;

F: after 6 months in soil.

Newly generated minerals in bags

G: Ti, minerals;

H: Fe, minerals.



du sédiment Alter do Chão. Ces kaolinites aux formes anguleuses se différencient nettement de celles, arrondies, des horizons supérieurs du profil ;

- un verre de silice (silice pour colonne chromatographique, Merck) ;

- une gibbsite synthétique (fournie par Péchiney).

Pour éviter la destruction des sachets par les termites, ceux-ci sont entourés par groupe de 8 (2 sachets par type de minéral) par un grillage Nylon de 21 × 30 cm à maille

0,5 mm. Certains sachets ont cependant été perforés au bout de 6 mois par des racines, et d'autres entièrement découpés au bout d'un an. Afin de minimiser les perturbations induites par l'implantation des sachets, le sol a été retiré par couches de 5 cm, puis remis en place. Les sachets ont été implantés en début de saison sèche (juin 1993). Certains sachets ont été laissés 6 mois dans le sol, et retirés en saison des pluies (janvier 1994), d'autres sont restés un an et un an et demi. On notera que, dans ce milieu, la saison sèche correspond à une diminution des pluies, il n'y a jamais dessèchement des horizons supérieurs du sol.

RÉSULTATS

LES TRANSFORMATIONS SUBIES PAR LES MINÉRAUX TEST

Au bout de 6 mois, les minéraux ont pris une coloration jaune pâle, qui tourne à l'ocre clair au bout d'un an, couleur suggérant la présence de goethite. Aucune modification minéralogique n'est cependant visible sur les diffractogrammes de rayons X des minéraux restés 6 mois dans le sol. Les modifications, si elles existent, concernent donc statistiquement moins de 5 % des échantillons.

L'observation au microscope électronique à transmission associée à des microanalyses met en évidence d'importants changements par rapport aux échantillons témoins.

- Il y a présence dans tous les sachets d'éléments globuleux de 0,1 à 0,4 μm de diamètre, sombres, isolés ou en groupes, titanés, bien cristallisés (photo. G). Il s'agit probablement d'anatase.

- Il y a présence fréquente de baguettes d'environ 0,1 μm de long, groupées en agrégats de taille variable, pouvant atteindre 0,3 μm . Ce sont des éléments cristallins, ferugineux, vraisemblablement de la goethite. Ils sont souvent associés aux particules titanées décrites ci-dessus (photo. H).

- Kaolinites : une grande partie de celles-ci a conservé les formes originelles (photo. A), bien anguleuses, et aux bords rectilignes, mais de nombreux cristaux pré-

sentent des angles émoussés, des formes irrégulières, des bords et surfaces d'aspect cloqué (photo. B). On observe également fréquemment des gels non cristallins, sous forme de traînée de dimension variable, et de composition siliceuse.

- Gibbsites : elles perdent partiellement leur forme polyédrique (photo. C), bien anguleuse et de grande taille, pour des formes présentant des bords diffus, irréguliers, des angles arrondis (photo. D). Il apparaît de nombreux éléments cristallins hexagonaux, de petite taille, qui sont de petits cristallites de gibbsite désolidarisés.

- Verre siliceux : à l'état initial, il ne présente aucune forme particulière (photo. E). Il est formé de grosses particules, opaques, à bords très irréguliers et rugueux. Après 6 mois d'exposition dans le sol, l'aspect devient grumeleux, dentelé, plus ou moins translucide ; il y a désagrégation en sphères de petite taille (photo. F).

A ce stade, aucune néoformation de gibbsite ou de kaolinite n'a pu être mise en évidence.

CONCLUSION

RAPIDITÉ DE L'ALTÉRATION DANS LES HORIZONS DE SURFACE

Au bout de 6 mois dans le sol, une altération nette de tous les types de minéraux testés a été observée. Les minéraux test utilisés sont mieux cristallisés et de plus grande taille que ceux des horizons dans lesquels ils ont été placés ; ils sont donc *a priori* susceptibles d'être plus résistants aux processus de solubilisation. Les transformations minéralogiques, dissolution de kaolinite et de gibbsite, et précipitation de goethite et d'anatase, nous permettent donc de conclure que les vitesses de réaction des minéraux aux conditions de milieu sont rapides dans les horizons supérieurs du sol. Ces résultats concernent la fraction fine, largement dominante dans le profil étudié. Ambrosi *et al.* (1986) ont, par ailleurs, mis en évidence dans ces sols une liaison entre dissolution des kaolinites et précipitation d'oxydes ou d'oxyhydroxydes de fer.

Ces résultats préliminaires montrent que la plupart des minéraux secondaires (kaolinite, gibbsite, goéthite, anatase) sont, dans les horizons de surface, très probablement en équilibre avec les conditions de milieu actuelles. Les résultats des études cristallographiques citées ci-dessus (infra-rouge, isotopie) incitent à extrapoler cette conclusion à l'ensemble du profil. Certains

minéraux ou organisations minérales peuvent cependant échapper à ces équilibres. Il existe, par exemple, en profondeur, des nodules hématitiques dont la structure est héritée de conditions anciennes (Lucas, 1989). Ces organisations sont cependant très peu abondantes par rapport à l'ensemble des minéraux secondaires du profil étudié.

Cette recherche a été financée par le programme national PEGI et entre dans le cadre d'un programme de coopération CNPq-ORSTOM.

Remerciements : Nous tenons à remercier l'INPA de Manaus pour l'aide apportée lors de la réalisation du travail terrain, ainsi que M. Escartefigue, C. Dominici, R. Dassule et J.J. Motte pour leur aide.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMBROSI, J. P., NAHON, D. et HERBILLON, A. J., 1986. The epigenetic replacement of kaolinite by hematite in laterite. Petrographic evidence and the mechanisms involved, *Geoderma*, 37, p. 283-294.
- BEZERRA, P. E. L., 1989. Geologia. In *Geografia do Brasil. 3. Region Norte*, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE, Rio de Janeiro, p. 27-46.
- BOULET, R., 1978. Toposéquences des sols tropicaux en Haute-Volta. Équilibres dynamiques et bioclimatiques, *Mém. ORSTOM*, 85, 272 p.
- CALLOT, G., CHAUVEL, A., CHAMAYOU, J. C. et H., 1992. Mise en évidence de kaolinite et de silice dans les structures cellulaires de l'épiderme et du cortex de racines de palmier, en forêt d'Amazonie, *Bull. Soc. Bot. Fr.* 139, (Actual Bot. 1), p. 7-14.
- CHAUVEL, A., GUILLAUMET, J. L. et SCHUBART, H. O. R., 1987. Importance et distribution des racines et des êtres vivants dans un « latosol » argileux sous forêt amazonienne, *Rev. Ecol. Biol. Sol.*, 24 (1), p. 19-48.
- GIRAL, S., 1984. Variations des rapports isotopiques 180/160 des kaolinites de deux profils latéritiques amazoniens : signification pour la pédologie et la paléoclimatologie, *Thèse*, Université d'Aix-Marseille-III, 199 p.
- LUCAS, Y., 1989. Systèmes pédologiques en Amazonie Brésilienne. Équilibres, déséquilibres et transformations, *Thèse*, Université de Poitiers, 157 p.
- LUCAS, Y., LUIZÃO, F. J., CHAUVEL, A., ROUILLER, J. et NAHON, D., 1993. The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soils, *Science*, 260, p. 521-523.
- LUCAS, Y., CHAUVEL, A. et AMBROSI, J. P., 1986. Processes of aluminium and iron accumulation in latosols developed on quartz-rich sediments from central Amazonia (Manaus, Brazil). In *Geochemistry and mineral formation in the earth surface*, RODRIGUEZ-CLEMENTE, R. et TARDY, Y., éd., p. 289-299.
- LUIZÃO, F. J., LUIZÃO, R. C. C. et CHAUVEL, A., 1992. Premiers résultats sur la dynamique des biomasses racinaires et microbiennes dans un latosol d'Amazonie centrale (Brésil) sous forêt et sous pâturage, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XXVII, 1, p. 69-79.
- MILLOT, G., 1983. The planation of continents by intertropical weathering and pedogenetic processes. In: *Proc. II Int. Lateritisation Processes*, São Paulo, July 4-12 1982, MELFI, A. J. et CARVALHO, A., éd., USP, São Paulo, Brasil, p. 53-63.
- PEDRO, G. et MELFI, A. J., 1983. The superficial alteration in tropical region and the lateritisation phenomena. In: *Proc. II Int. Sem. Lateritisation Processes*, São Paulo, July 4-12 1982, MELFI, A. J. et CARVALHO, A., éd., USP, São Paulo, Brasil, p. 3-13.
- RANGER, J., ROBERT, M., BERTHELIN, J. et NYS, C., 1986. Utilisation de la méthode des minéraux-test pour la connaissance des sols forestiers, *Sci. Sol.*, 2, p. 183-199.
- ROSE, A. W., KATO, T. et MACHESKY, M. L., 1993. The significance of biogenic element cycling in ancient tropical soils, *Chemical Geology*, 107, p. 401-403.
- TOUTAIN, F., 1984. Les phénomènes de biodégradation et d'humidification dans les écosystèmes forestier tropicaux. Rôle et conséquences de la diversité spécifique, *Biology International*, 6, p. 19-29.