



ORSTOM

EUROLAT'95

summer school
école d'été

*Interactions milieu vivant - milieu minéral
dans les systèmes pédologiques
de la région de Manaus, Amazonie*

Yves LUCAS

Laboratoire des Echanges Particulaires aux Interfaces (LEPI) - Université de Toulon et du Var

INTRODUCTION

Les systèmes de sol de la région de Manaus, en Amazonie Brésilienne, constituent un exemple particulièrement intéressant de la pédogenèse et du fonctionnement des sols en milieu équatorial. Les sols vont d'un pôle ferrallitique, à sols très kaolinitiques dans lesquels la presque totalité des minéraux primaires a disparu, à un pôle podzologique, à sols constitués presque exclusivement de quartz primaire relictuel. L'ensemble est développé à partir d'une même roche-mère. Ces systèmes soulèvent des questions fondamentales, en particulier les suivantes.

- Pourquoi les sols ferrallitiques présentent-ils des horizons supérieurs kaolinitiques, surmontant des horizons plus gibbsitiques, allant localement jusqu'à des bauxites? Sur ces formations très anciennes, on s'attendrait plutôt à trouver en sommet de profil des horizons constitués en majorité de gibbsite, le minéral le moins soluble dans le système Si-Al, soit de gibbsite.
- Quels sont les facteurs d'une différenciation de sols aussi contrastés, allant de podzols très sableux à des sols ferrallitiques très argileux, alors que la roche-mère est la même?

De nombreuses études ont été menées sur ces systèmes au cours des dix dernières années. Les résultats permettent d'expliquer la stabilité de la kaolinite dans les horizons supérieurs des sols, donnent une hypothèse explicative de la genèse et du fonctionnement de ces systèmes, et montrent l'importance des interactions milieu vivant - milieu minéral en milieu forestier équatorial.

LE SYSTEME SOLS FERRALLITIQUES - PODZOLS

La région étudiée est située à une cinquantaine de kilomètres au nord de la ville de Manaus. Le climat actuel est du type Amazonien avec une pluviosité annuelle de l'ordre de 2100 mm et une saison sèche peu marquée. La région est constituée de plateaux supportant des sols ferrallitiques, et de versants supportant des sols devenant progressivement plus sableux vers l'aval. L'ensemble est développé sur un sédiment continental d'âge Crétacé (Putzer, 1984), formé d'une alternance destrates sub-horizontales de matériaux argilo-sableux à sableux constitués de quartz, de kaolinite et d'une petite quantité d'hématite et d'anatase.

Les sols ferrallitiques de plateaux sont des sols très argileux, constitués dans les horizons du mètre supérieur par environ 82% de kaolinite, 8% de gibbsite, 5% de quartz, 3% de goéthite et 2% d'anatase. Ces sols ont une vingtaine de mètres de profondeur. Vers le milieu du profil, entre 5 et 12 mètres de profondeur, on observe des horizons plus gibbsitiques et plus ferrugineux. La gibbsite est présente de manière diffuse dans les plasmas argileux, ainsi que dans une phase indurée, le plus souvent des nodules. Localement, la phase gibbsitique indurée peut être très abondante, allant jusqu'à la formation de bauxites.

Les sols des versants deviennent très progressivement plus sableux quand on descend vers l'aval. A l'aval des versants les plus longs, les sols sont uniquement constitués de sable quartzueux résiduel: il s'agit alors de podzols géants. Les horizons éluviés peuvent atteindre plus de 10 mètres de profondeur.

Ces formations forment un système de sol appelé système sols ferrallitiques-podzols, représentatif d'importantes surfaces en Amazonie centrale.

LES ÉTUDES MENÉES

Études pétrographiques et cristallographiques

Le système de sol a été étudié de manière très détaillée à l'échelle des unités de relief (Lucas et al., 1984, 1986, 1987; Chauvel, 1986; Lucas, 1989). Ces études ont montré que l'ensemble des sols sont développés in situ, à partir de la même roche-mère, et qu'il s'agit d'un système de transformation, dans

lequel les podzols se développent progressivement aux dépens des sols ferrallitiques, au fur et à mesure du recul des versants. Parmi les nombreux résultats, on retiendra plus particulièrement les résultats suivants.

L'étude cristallographique des kaolinites des sols de plateaux montrent leurs caractéristiques (taille, forme, cristallinité, substitution en fer) varient très progressivement de la base vers le haut des profils. La spectrométrie infra-rouge (Lucas et al., 1986) montre par exemple une disparition très progressive du pic à 3670 cm⁻¹. Ces résultats confirment l'absence de discontinuités d'ordre sédimentaire dans le profil: celui-ci est bien formé in situ. Par ailleurs, ils montrent que les kaolinites sont différentes à chaque niveau du profil: elle ne peuvent donc pas être considérées comme des reliques de processus plus profonds, amenées plus près de la surface au cours de l'enfoncement géochimique du profil. Au contraire, il faut considérer qu'au fur et à mesure de l'enfoncement géochimique du profil, il y a une constante dissolution-recristallisation des kaolinites, aboutissant à des minéraux caractéristiques de chaque niveau. L'étude de la composition isotopique de ces kaolinites (Giral et al., 1992) montre une composition isotopique variable sur l'ensemble du profil, mais toujours en équilibre avec la composition des eaux météoriques actuelles. Ceci confirme qu'à chaque niveau, les minéraux sont soumis à des phénomènes de dissolution-précipitation en relation avec les conditions de milieu. Cela signifie également soit une stabilité du climat pendant le temps de formation des profils, soit un rééquilibrage rapide des kaolinites avec les conditions bioclimatiques actuelles.

L'ensemble de ces conclusions pose de manière précise la problématique de la stabilité des kaolinites dans les horizons de surface: pourquoi les kaolinites y apparaissent-elles stables, alors que les modélisations basées sur les stabilités thermodynamiques des minéraux laissent attendre de la gibbsite?

Etudes de la dynamique de l'eau

La circulation de l'eau est essentiellement verticale dans les sols de plateau. A la base des versants, il existe également une composante latérale, une partie des solutions percolantes est exportée vers l'aval par des circulations latérales se situant vers 1 à 3 mètres de profondeur.

Dans les sols ferrallitiques de plateau, la dynamique de l'eau est entièrement régulée par la végétation dans le mètre supérieur des profils (Grimaldi et al., 1989). Les deux tiers de l'eau de pluie arrivant en sommet de profil sont absorbés par les racines et évapotranspirés. Au delà de 50 à 60 cm de profondeur, l'eau percole verticalement, lentement et régulièrement. Des traçages isotopiques (Rozanski et al., 1991) montrent que la vitesse moyenne d'infiltration de l'eau est de l'ordre de 2 mètres par ans. Ces résultats permettent d'écarter deux hypothèses avancées pour expliquer la stabilité de la gibbsite dans les horizons de surface: l'une (Kronberg et al., 1982) est que l'eau percolerait très rapidement à travers les horizons de surface, sans atteindre l'équilibre avec la kaolinite, l'autre (Tardy et Novikoff, 1985) est que les variations d'activité de l'eau dans les horizons de surface seraient suffisamment importantes pour expliquer les variations minéralogiques observées.

Etudes du cycle des éléments

Le cycle des éléments a été approché par l'étude des solutions percolantes dans le premier mètre du sol, prélevées par des lysimètres, par l'étude des eaux de sources, représentative des solutions sortant des systèmes, et par l'étude du recyclage des éléments par la litière forestière.

Rôle de la litière

Des pièges installés sous forêt (Luizao, 1989) ont permis le prélèvement de la litière qui arrive annuellement en sommet de profil. Celle-ci comporte des éléments dits nutritifs (Ca, Mg, K, P...) dont

le cycle est relativement bien connu en forêt équatoriale, elle comporte également des éléments constitutifs des minéraux secondaires des sols ferrallitiques: Si, Al, Fe, Ti. Ces éléments, dont les concentrations règlent les interactions minéraux-solutions, sont donc injectés dans la solution du sol en sommet de profil par la minéralisation de la litière liée à l'activité microbiologique. Le bilan réalisé sur les sols ferrallitiques de plateau montre que la quantité de silicium recyclé par la litière (environ 40 kg/ha/an) est très importante par rapport aux quantités exportées annuellement dans les rivières qui drainent la zone étudiée (Lucas et al., 1993) (environ 11 kg/ha/an). Cela signifie que la forêt permet le maintien d'un stock de silicium en sommet de profil. Si l'on dissout la quantité de Si et Al apporté annuellement par la litière par l'eau percolant annuellement à travers le profil, on obtient une solution à l'équilibre avec la kaolinite au pH entre 5 et 6. La conclusion est que la kaolinite, dans les sols de plateau, correspond à un état stationnaire entretenu par la végétation.

L'étude géochimique des solutions qui percolent les premiers centimètres, actuellement réalisée par S. Cornu et C. Grimaldi, apporte des précisions sur ce processus: la teneur totale en Si et Al de la solution en sommet de profil est en majeure partie contrôlée par les apports provenant de la litière, et le pH est contrôlé par l'activité microbiologique, en particulier l'activité nitrifiante et sulfatante. Ces paramètres déterminent la position des solutions dans le diagramme d'équilibre thermodynamique Si-Al.

Exportation des éléments

Les solutions qui drainent le système ont été prélevées au niveau des sources, à l'issue de petits bassins versant constitués exclusivement soit de sols ferrallitiques, soit de podzols. Les fractions colloïdales ont été séparées par ultrafiltration tangentielle, et chaque fraction a été analysée et son pouvoir complexant par rapport à la matière organique déterminé par polarographie (Eyrolles, 1994). Ceci permet de séparer phase dissoute (< 5kDalton), phase colloïdale et phase particulaire (> 0.45µm). Les résultats montrent que l'eau provenant des sols ferrallitiques a les concentrations les plus basses en matière organique, Fe et Al, et les concentrations les plus élevées en Si. La plupart des éléments sont transportés dans la phase dissoute, sauf 10 de Si dans la phase particulaire, probablement sous forme de quartz, et 50% de Al dans la phase colloïdale, probablement sous forme d'hydroxyde. L'eau qui provient des podzols a des teneurs très élevées en matière organique, Fe, Al et de faibles teneurs en Si. Le fer est transporté sous forme de complexes organo-métalliques dans la phase colloïdale. La fraction particulaire est importante, composée probablement de quartz, gibbsite, kaolinite.

CONCLUSIONS

Le fonctionnement général des systèmes peut être décrit de la manière suivante.

L'activité biologique dans les horizons supérieurs du sol minéralise la litière et produit des composés organiques agressifs dissolvant localement les minéraux présents. Si, Al et Fe sont ainsi relâchés dans la solution du sol.

Dans les sols ferrallitiques, cette solution migre lentement en profondeur. Le pH, très variable dans les horizons organiques de surface, est tamponné, et la solution percolante est à l'équilibre avec la kaolinite. En profondeur, le prélèvement racinaire diminue progressivement la teneur en Si, produisant la précipitation de gibbsite, puis la teneur en Si augmente à nouveau sous l'effet de la lente dissolution des quartz. Les matières organiques complexantes restent bloquées par les surfaces argileuses en sommet de profil, et sont condensées ou minéralisées. Le bilan est que la majeure partie de Al et Fe, et une partie de Si restent immobilisés dans le profil sous forme de kaolinite, gibbsite et goéthite. Les eaux de source sont ainsi pauvres en matière organique, Fe, Al et riches en Si. A chaque niveau du profil, il y a équilibre entre les solutions percolantes et les minéraux néoformés, l'ensemble correspondant à un état stationnaire.

Dans les podzols, la matière organique produite dans les horizons de surfaces peut migrer rapidement en raison de la haute perméabilité et des faibles surfaces d'échange des horizons sableux. La complexation du fer par la matière organique favorise la dissolution de la goethite, ce qui déstabilise les agrégats argileux et favorise leur dissolution. Ces processus agissent aux frontières des horizons sableux, permettant leur progression latérale. Les solutions sont exportées rapidement hors du système par les circulations latérales, avant immobilisation de Al et Fe sous forme de minéraux néoformés, ce qui explique les teneurs élevées en Al et Fe. Les temps de résidence de l'eau sont faibles, ce qui explique les faibles teneurs en Si.

L'ensemble de ces résultats montre que la plupart des processus pédologiques qui agissent en milieu équatorial ont une forte composante biologique, qui n'était pas toujours prise en compte dans les modèles et les théories explicatives. Le recyclage végétal contrôle les flux d'éléments, en particulier de Si, donc la composition chimique et minérale des sols. Le type de matière organique détermine par ailleurs la structure du sol et sa stabilité, dont dépend la dynamique de l'eau. Les transferts d'éléments hors des systèmes de sol et la stabilité des minéraux argileux dépendent en grande partie de la formation et de la migration de complexes organo-métalliques, donc des conditions d'activité microbiologique qui leur ont donné naissance.

Un grands nombres des études décrites ont été supportées par des financements ORSTOM - TOA UR 12 ET PEGI.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAUVEL, A., Y. LUCAS, AND R. BOULET. 1986. On the genesis of the soil mantle in the region of Manaus, Central Amazonia. *Experientia* 43, 3:285-299.

EYROLLE F., 1994, La fraction colloïdale organique dans les processus de transport des métaux dans les eaux de surface: application aux systèmes d'altération en milieu tropical (Brésil), thèse de l'Université d'Aix-Marseille III, 334p.

EYROLLE F., FEVRIER D. and BENAÏM J.Y.. 1993, Etude par DPASV de l'aptitude de la matière organique colloïdale à fixer et à transporter les métaux: exemples de bassins versants en zone tropicale, *Environmental Technology*, 14, 701-717.

GIRAL, S., NAHON, D., GIRARD, J.P., & SAVIN, S. 1992. Variation in $^{18}O/^{16}O$ ratios of kaolinites within a lateritic profile: their significance for laterite genesis and isotopes paleoclimatology. *GSA Abstract*, 24, 7, A70

GRIMALDI, M., SARRAZIN, M., NUNES, N., & CHAUVEL, A., 1989. Caracterizao hydrica e porosimétrica de um latossol da Amazonia sob floresta e cultivo. *Comm. XXII Cong. Bras. Ci. Solo*, 23-31/07/89, Recife. (un pub)

KRONBERG, B. I., W. S. FYFE, B. J. MCKINNON, J. F. COUSTON, F. B. STILIANIDI, AND R. A. NASH. 1982. Model for Bauxite formation: Paragominas (Brazil). *Chemical Geology* 35:311-320.

LUCAS Y., 1989. Systèmes pédologiques en Amazonie brésilienne. Equilibres, déséquilibres et transformations. Thesis n°211.

LUCAS, Y., A. CHAUVEL, R. BOULET, G. RANZANI, AND F. SCATOLINI. 1984. Transição latossolos-podzols sobre a formação Barreiras na região de Manaus, Amazônia. *Revista Brasileira de Ciencia de Solo* 8:325-335.

LUCAS, Y., A. CHAUVEL, AND J. P. AMBROSI. 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: proceedings of the International Meeting Geochemistry of the Earth Surface and Process of Mineral Formation held in Granada, Spain, 16-22 march 1986. R. Rodriguez-Clemente and Y. Tardy.pp. 289-299. CSIC (Madrid) - CNRS (Paris):

LUCAS, Y., R. BOULET, AND L. VEILLON. 1987. "Systèmes sols ferrallitiques - podzols en région amazonienne," in Podzols et Podzolisation. D. Righi and A. Chauvel eds .pp. 53-65. AFES (Plaisir) - INRA (Paris).

LUCAS, Y., F. J. LUIZAO, A. CHAUVEL, J. ROUILLER, AND D. NAHON. 1993. The relation between biological activity of the rainforest and mineral composition of the soils. *Science* 260:521-523.

LUIZAO, F. J. 1989. Litter production and mineral element input to the forest floor in a central amazonian forest. *Geojournal* 19, 4:407-417.

PUTZER, H., 1984, *Monographiae Biologicae*, 56, p. 15-46.

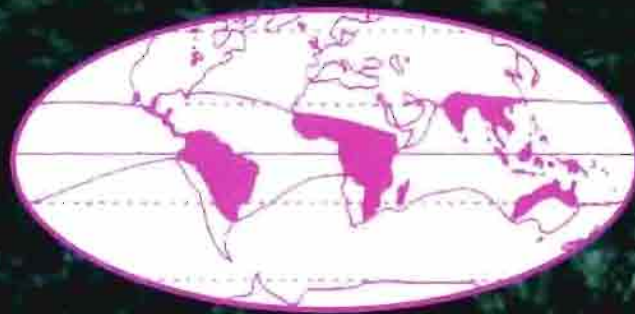
ROZANSKI, K., L. ARAGUAS-ARAGUAS, A. PLATA BEDMAR, W. FRANKEN, A. C. TANCREDI, AND A. TUNDIS VITAL. 1991. International Symposium on the use of Stable Isotopes in Plant Nutrition, Soil Fertility and Environmental Studies. IAEA-SM-313. (UnPub).

TARDY, Y. AND A. NOVIKOFF. 1988. Activité de l'eau et déplacement des équilibres gibbsite-kaolinite dans les profils latéritiques. *Comptes-Rendus de l'Académie de Sciences, Paris* 306, II:39-44.

EUROLAT '95

international summer school
école d'été

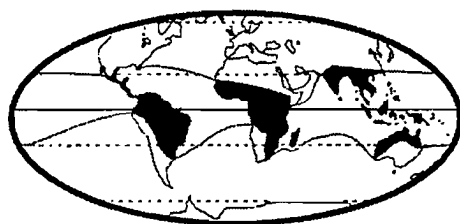
BONDY, FRANCE
6 - 7 July 1995



**European Network on Lateritic Weathering and Global Environment
(EUROLAT)**

EUROLAT'95

International Summer School



**6 - 7 July, 1995
Bondy, France**

organized by:

UR 12

Géosciences de l'Environnement Tropical

and

Laboratoire des Formations Superficielles

"Terre Océan Atmosphère" Department - ORSTOM

organizing Committee:

Dr. Francis SONDAG

Dr. Torsten SCHWARZ

Dr. François SOUBIÈS

Nicole ZERBIB

Danièle RAILLOT