

Pédologie/Pedology
(Géochimie/Geochemistry)

Mise en évidence de transferts d'aluminium dans les sols de la zone tropicale humide (cas d'une couverture ferrallitique de l'Amazonie brésilienne)

Yves LUCAS, René BOULET et Armand CHAUVEL

Résumé — L'étude détaillée d'une couverture de sols ferrallitiques épais d'Amazonie brésilienne montre que des structures argileuses en coin se développent sur place, en profondeur, au milieu de matériaux plus sableux. La genèse de ces structures implique nécessairement l'existence d'importants apports absolus d'aluminium par les solutions d'altération, ce qui conduit à une reconsidération des phénomènes géochimiques de la ferrallitisation.

Aluminium mobility in soils from the humid tropics. Demonstrative example from a lateritic cover in Brazilian Amazonia

Abstract — In thick kaolinitic lateritic soil covers from Brazilian Amazonia, wedge-shaped clay horizons develop in place in depth, amidst sandier material. The genesis of these horizons involves strong aluminium absolute input from the circulating water, which leads to a reconsideration of the geochemical processes of ferrallitization.

Abridged English Version — In the humid tropics, great areas are covered by thick lateritic soils which are formed *in situ* ([1] to [5]). Genesis of these soils is sketched in Figure 1: they develop by geochemical descent of the profile in the protolith, each horizon being derived from material similar to that now underlying it by the downward advance of a transformation front ([6] to [10]). In the given example, the result of this evolution is the accumulation of aluminium and iron in an intermediate level with regard to the lower weathering level, and the accumulation of silica in an upper level with regard to the intermediate level. This type of profile is widely distributed in the climatic area, and its geochemical modeling raises the problem of the origin of the aluminium which accumulates in the intermediate level, below more silicated horizons. Is this accumulation only relative, due to the leaching of other elements, or does transformation of aluminium from the upper horizons exist? Demonstrative features from Amazonian soils give evidence of absolute accumulation of aluminium in depth.

The studied area is located 50 km north of Manaus, Brazil. The landscape consists of low plateaux. The soil cover overlies a Cretaceous poorly consolidated sediment which consists of alternated clayey and sandy layers [13]. Soils range from thick kaolinitic ferrallitic soils on the plateaux to sandy ferrallitic soils associated with giant podzols on the slopes. Previous studies ([11], [12]) have established that the soil cover were developed in place by weathering of the underlying sediment. Plateaux soils (*Fig. 1*) form by progressive desilication of the sediment. Loss of the sediment structure progressively occurs upwardly in the intermediate level, by dissolution of quartz grains, generation of kaolinite and gibbsite, and formation of gibbsitic and hematitic nodules. The upper level is characterized by a homogeneous loose kaolinitic material. On the upper part of the slopes, strongly colored wedge-shaped horizons occur in depth at the limit between the lower and the intermediate level (*Fig. 2*). These horizons are characterized by a clayey kaolinitic material without any preserved sedimentary structure. The underlying and overlying horizons are sandier (*Table*),

Note présentée par Georges PÉDRØ.

and in the material which directly overlies the wedge-shaped horizon are preserved relics of the horizontal sedimentary stratification. The upper and lower limits of a wedge-shaped horizon are deeply serrated, characteristic of geochemical transformation fronts [10]: this horizon develops in place, at the expense of the surrounding horizons. Its genesis is probably initiated by horizontal focusing of the percolating water in the sandiest sediment layers. The focused water flows out laterally in deep slope horizons, and it results locally in a faster weathering of the quartz grains and a more intense generation of kaolinite. The low hydraulic conductivity of the newly formed material induces the self-development of the system, which gives the characteristic shape of the horizon.

There is neither gap nor a bending in the lateral transition between the horizontal sediment layers and their relics over the wedge-shaped horizon. This attests to a weak bulk change of the soil material during the formation of the wedge-shaped horizon. Nevertheless, this formation involves a strong Al-enrichment with regard to the surrounding horizons, as seen from the mineralogical data (Table). In the hypothesis that the Al-enrichment would be only relative, due to the leaching of the quartz silica, bulk change during the transformation can be calculated from the bulk density of the materials and from the relative volume occupied by quartz grains (Table). Results give a 20 to 37% bulk decrease when forming the clay material from the overlying or the underlying materials. The weak bulk variation is demonstrated from descriptive data, it hence may be concluded that absolute input of aluminium is required during the genesis of the wedge-shaped clay horizon. In the hypothesis of a negligible bulk variation during the transformation, it can be calculated that the necessary Al-input represents 20 to 30 % of the clay material weight.

I. INTRODUCTION. — Dans les zones équatoriales, de très importantes surfaces présentent des sols ferrallitiques épais formés strictement en place ([1] à [5]). La genèse de ces sols implique une lixiviation importante de matière, essentiellement silice et bases, par rapport à la roche-mère; ils doivent ainsi être interprétés en tenant compte de la descente du sol dans la roche-mère au cours de la pédogenèse ([6] à [9]). Cette descente peut être schématisée par la progression vers le bas de fronts de transformation [10], selon l'exemple de la figure 1. Les transformations minéralogiques intervenant à chaque front de transformation impliquent des transferts de matière, desquels résultent des accumulations de certains éléments. Dans l'exemple considéré, qui constitue un modèle répandu dans les zones équatoriales, l'ensemble médian correspond à une accumulation de fer et d'aluminium par rapport à l'ensemble inférieur, et l'ensemble supérieur à une accumulation de silice par rapport à l'ensemble médian.

La modélisation géochimique de ce type de profil pose le problème de l'origine de l'aluminium qui s'accumule dans l'ensemble médian, sous les horizons de l'ensemble supérieur dans lesquels la kaolinite est stable. S'agit-il d'une accumulation uniquement relative, liée à la lixiviation préférentielle de l'ensemble des autres éléments, ou existe-t-il un transfert de l'aluminium depuis la partie supérieure du profil vers l'ensemble médian? Des structures démonstratives observées dans les couvertures de sols d'Amazonie brésilienne apportent des éléments de réponse.

II. DESCRIPTION DES SOLS. — Les sols décrits sont situés dans la partie centrale de l'Amazonie brésilienne à 50 km au nord de Manaus. Le climat actuel est de type tropical humide (pluviosité moyenne 2 1000 mm, saison sèche peu marquée). Le paysage est constitué de bas-plateaux aux sols ferrallitiques épais très argileux, des sols ferrallitiques

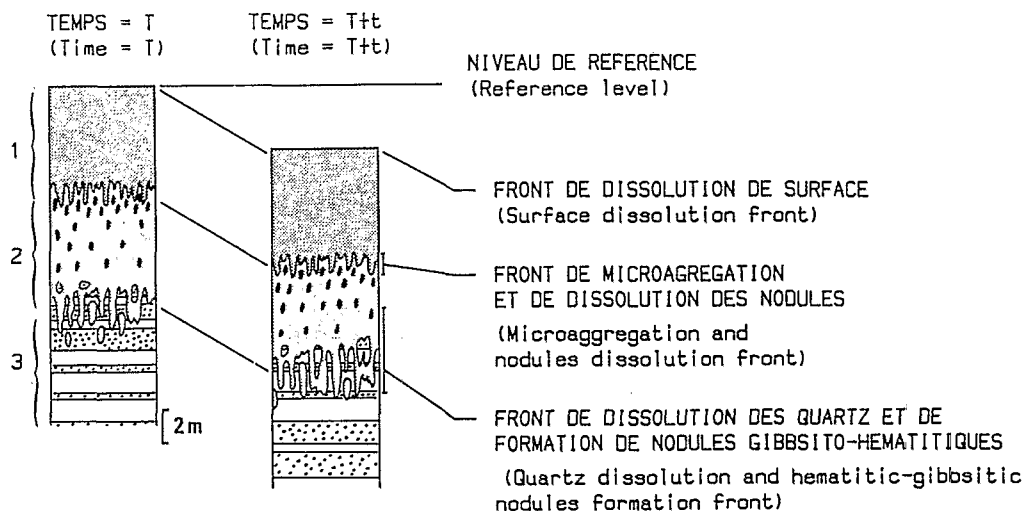


Fig. 1. — Descente du sol dans la roche-mère au cours de la pédogenèse. Exemple de sols ferrallitiques d'Amazonie. 1, ensemble supérieur kaolinitique; 2, ensemble médian gibbsito-kaolinitique; 3, ensemble inférieur d'altération kaolinitique.

Fig. 1. — Subsidence of the soil in the protolith during pedogenesis. Example of ferrallitic soils from Amazonia. 1, kaolinitic upper level; 2, gibbsitic-kaolinitic intermediate level; 3, kaolinitic weathering lower level.

plus sableux associés à des podzols occupent les versants. Des études précédentes ([11], [12]) ont montré que l'ensemble de la couverture de sol est développée *in situ* par altération du sédiment sous-jacent. Celui-ci est quartzo-kaolinitique, constitué de strates sub-horizontales alternées argileuses à sableuses. Il appartient au groupe d'âge Crétacé Alter-do-Chão [13].

A la partie supérieure des versants, sur le bord des plateaux, des coupes de route ont permis l'observation de la structure profonde des sols. Une de ces coupes est représentée sur la figure 2.

1. *Caractères macroscopiques.* — A l'amont de la coupe, les sols des plateaux sont tels qu'il a été schématisé sur la figure 1. Ils ont été décrits en détail antérieurement [13]. L'ensemble inférieur quartzo-kaolinitique, de couleur blanche, correspond au sédiment altéré. La transition entre l'ensemble inférieur et l'ensemble médian est très progressive,

TABLEAU

Composition minéralogique des horizons en % pondéral, densité apparente (D.app.) et volume relatif occupé par le quartz dans l'échantillon (Vr. Q), les sites analysés sont repérés sur la figure 2.

Mineralogical composition of the horizons in % weight, bulk density (D. app.) and relative volume hold by the quartz grains in the sample (Vr.Q). Samples location is given on Figure 2.

Type de faciès	Composition minéralogique				D. app.	Vr. Q. (%)
	Quartz	Kaolinite	Gibbsite	Autres		
Ensemble médian.	41	56	0	3	1,5	23
Horizon sableux rose.	71	26	0	3	1,4	40
Horizon en coin très argileux.	5	81	8	5	1,4	3
Matériau de l'ensemble inférieur (moyenne).	66	33	0	1	1,6	40

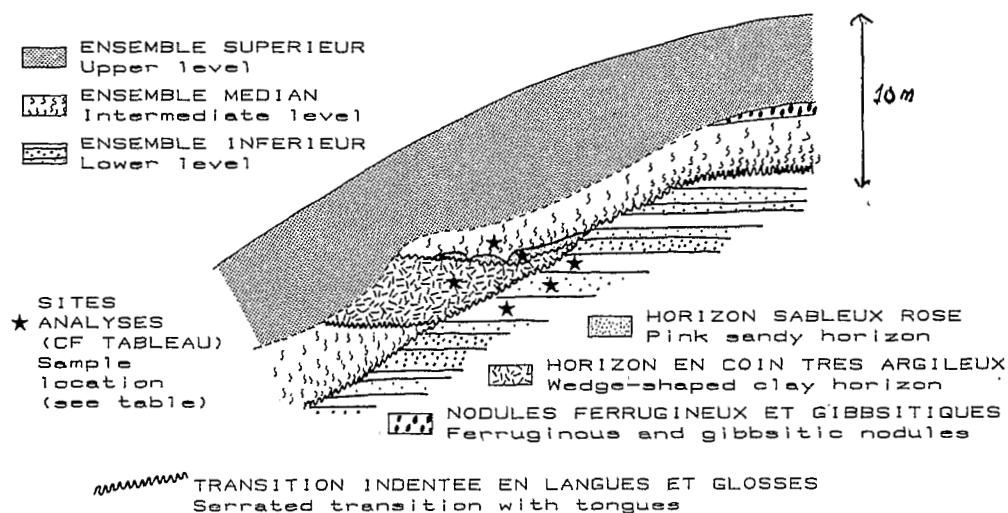


Fig. 2. — Coupe de la partie supérieure d'un versant.

Fig. 2. — Cross-section of the upper part of a slope.

constituée d'une juxtaposition de colonnettes blanches conservant la structure sub-horizontale du sédiment, et de tubules jaune-rougeâtre pédoplasquées. La structure du sédiment est progressivement effacée vers le haut, parallèlement à la formation de nodules hématitiques et gibbsitiques. L'ensemble supérieur, kaolinitique, de couleur jaune-rougeâtre, est caractérisé par la disparition des nodules et l'acquisition d'une structure pédoturbée à phase microagrégée.

Sur le versant, de l'amont vers l'aval (*fig. 2*) les formes nodulaires disparaissent et l'ensemble médian s'amincit progressivement. La transition avec l'ensemble inférieur devient peu épaisse (15 cm), mais reste une transition en langues et glosses recoupant les structures sédimentaires. A la base de l'ensemble médian apparaît un horizon en coin, très argileux, de couleur vive, à agrégats polyédriques fins. Il est constitué d'une juxtaposition millimétrique de domaines rouge-jaunâtre, et de domaines jaunes dans lesquels des faces structurales ont une coloration ocre. Les transitions vers les horizons sus et sous-jacents se font en 20-30 cm par des glosses recoupant nettement les structures de ces horizons. Latéralement, vers l'aval, la transition vers l'ensemble supérieur est très progressive. Cet horizon en coin est coiffé, sur sa partie amont, par un mince horizon sableux rose, discontinu, plus sableux que le matériau sus-jacent de l'ensemble médian, et à la base duquel on observe des stries ferrugineuses rouges horizontales. Dans les horizons à tubules et colonnettes situés au-dessus de la structure en coin, des microstrates sub-horizontales recoupées par les tubules jaune-rougeâtres sont dans le prolongement des microstrates du sédiment, et constituent ainsi des caractères lithorelictuels strictement en place. Plusieurs structures en coin de ce type (jusqu'à trois) ont été observées sur un même versant, se succédant à des intervalles de 10 à 20 m.

2. *Organisation microscopique et composition minéralogique.* — L'étude microscopique des transitions entre horizons confirme les relations entre faciès établies lors de l'étude macroscopique : aux limites supérieures et inférieures de l'horizon en coin très argileux, les glosses du faciès argileux recoupent les structures des horizons encadrants. La composition des différents horizons observés est résumée dans le tableau.

III. DISCUSSION. — Les structures macroscopiques et microscopiques des transitions entre les différents horizons observés, ainsi que la présence de caractères lithorelictuels au-dessus des structures en coin, attestent le caractère *in situ* de la différenciation. Les limites inférieures et supérieures des coins très argileux sont des fronts transformants, qui progressent aux dépens des matériaux respectivement sous- et sus-jacents. L'hétérogénéité de couleur et les faces structurales ocres dans l'horizon très argileux en coin indiquent une hydromorphie modérée, et les stries ferrugineuses de la base de l'horizon sableux rose sont l'indice de micronappes perchées temporaires. Les structures en coin sont donc le siège d'une dynamique de l'eau particulière [14]. Les discontinuités texturales sub-horizontales entre strates au sein de l'ensemble inférieur focalisent probablement des flux hydriques latéraux, débouchant dans les horizons pédoplasés du versant où ils entraînent localement le développement plus rapide de l'altération des quartz et de la plasmogenèse kaolinitique associée. La diminution conséquente de la conductivité hydrique dans le matériau argileux permet ainsi l'auto-développement du système, et l'acquisition des formes en coin caractéristiques.

Quelle que soit la dynamique de la transformation, celle-ci correspond à une aluminisation importante des matériaux, comme le montrent les compositions minéralogiques de part et d'autre des fronts. Si cet enrichissement en Al était uniquement relatif, dû au départ de la silice des quartz, la variation volumique au cours de la transformation serait de l'ordre de 20 à 37 % d'après les volumes relatifs occupés par le quartz dans les différents matériaux reportés sur le tableau. Or, la continuité latérale sub-horizontale entre les structures lithorelictuelles situées immédiatement au-dessus du coin argileux et les strates du sédiment signifie que les variations volumiques qui accompagnent la formation des coins argileux sont minimales. Ceci démontre l'existence de transferts absolus d'aluminium par les solutions d'altération. Dans l'hypothèse d'une variation volumique nulle au cours de la transformation, ces transferts d'Al correspondent à 10-15 % pondéral du matériau très argileux formé.

IV. CONCLUSION. — Dans une couverture de sols ferrallitiques épais, sous climat équatorial, des structures argileuses en coin se développent *in situ*, en profondeur, sur la partie haute des versants, au milieu de matériaux plus sableux. La présence de ces structures implique d'importants apports absolus d'aluminium par les solutions d'altération, donc la mise en œuvre de manière intensive de phénomènes jusqu'ici peu envisagés dans l'étude de la dynamique de la ferrallitisation, et qu'il conviendra désormais de prendre en compte.

Ce travail, mené dans le cadre de l'ORSTOM (accord C.N.Pq-C.N.R.S.) et de l'U.R.A. n° 132, C.N.R.S., (Marseille), a bénéficié de l'appui de l'INPA, (Manaus, Brésil) et de l'A.T.P. Latérites du C.N.R.S.

Note remise le 2 avril 1990, acceptée le 23 avril 1990.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] R. BOULET, E. FRITSCH et F. X. HUMBEL, *Les sols des terres hautes et de la plaine côtière ancienne en Guyane Française*, ORSTOM, Cayenne, P 182, 170 p.
- [2] K. FURCH, *Monographiae Biologicae*, 56, 1984, p. 167-199.
- [3] Y. LUCAS, A. CHAUVEL et J. P. AMBROSI, *Proc. 1^o Int. Symp. on Geoch. of the Earth Surface*, Granada, Spain, 1986, p. 288-299.
- [4] P. LECOMTE, *J. Geochem. Expl.*, 30, 1988, p. 35-61.
- [5] F. COLIN, A. EDOU-MINKO et D. NAHON, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 309, série II, 1989, p. 553-560.

- [6] C. R. M. BUTT, In *Geophysical Prospecting in Deeply Weathered Terrains*, Doyle, Glover & Groves, Geol. Dept. Extension Serv. Publ., 6, Univ. West Australia, 1981, p. 11-29.
- [7] C. J. J. ALEVA, *Geol. Mijnbouw*, 62, 1983, p. 383-388.
- [8] G. MILLOT, In *Lateritisation Processes, Proc. II Int. Sém.*, A. MELFI et A. CARVALHO éd., São-Paulo, 1983, p. 53-63.
- [9] Y. LUCAS, R. BOULET et A. CHAUVEL, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 306, série II, 1988, p. 1395-1400.
- [10] Y. LUCAS et A. CHAUVEL, In *Handbook of exploration geochemistry, Soil, laterite and saprolite geochemistry in mineral exploration of tropically weathered terrains*, C. R. M. BUTT et H. ZEEGERS éd, Elsevier (sous presse).
- [11] Y. LUCAS, A. CHAUVEL, R. BOULET, G. RANZANI et F. SCATOLINI, *R. Bras. Ci. Solo*, B, 1984, p. 325-335.
- [12] Y. LUCAS, R. BOULET et L. VEILLON, In *Podzols et Podzolisation*, D. RIGHI et A. CHAUVEL éd., A.F.E.S.-I.N.R.A., Paris, 1987, p. 53-65.
- [13] H. PUTZER, *Monographiae Biologicae*, 56, 1984, p. 15-46.
- [14] G. BOCQUIER, *Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation géodynamique*, mém. ORSTOM, Paris, 1973, 350 p.

Y. L., R. B. et A. C. : ORSTOM, Unité de recherche 1 G :
Analyse structurale et géochimique des Formations supergènes;

Y. L. et R. B. : U.S.P., Instituto de Geociências, CP 20.899, CEP 01498, São Paulo (SP), Brasil;

A. C. : Laboratorio de Ecologia, CP 478, CEP 69060, Manaus (AM), Brésil.