

Géosciences de surface (Pédologie)
Systèmes sols ferrallitiques–podzols et genèse des kaolins

Célia Regina Montes^a, Yves Lucas^{b,*}, Adolpho José Melfi^c, Débora Ayumi Ishida^d

^a CENA, NUPEGEL, Av. Pádua Dias, 11, CP 9, Piracicaba, SP, CEP 13418–900, Brésil

^b PROTEE–université du Sud–Toulon–Var, BP 132, 83957 La Garde cedex, France

^c USP–ESALQ, NUPEGEL, Av. Pádua Dias, 11, CP 9, Piracicaba, SP, CEP 13418–900, Brésil

^d USP–IGc, NUPEGEL, Av. Pádua Dias, 11, CP 9, Piracicaba, SP, CEP 13418–900, Brésil

Reçu le 6 juin 2006 ; accepté après révision le 6 novembre 2006

Disponible sur Internet le 30 janvier 2007

Présenté par Georges Pédro

Résumé

Les relations entre kaolins supergènes et podzols sont éclairées par l'étude d'une toposéquence dans un système sols ferrallitiques–podzols, en Amazonie brésilienne. La genèse des kaolins déferrifiés dépend, d'une part, d'une altération intense classique, sur un temps suffisant pour permettre, en profondeur, la dissolution des quartz et, dans les horizons supérieurs, l'apparition de la podzolisation et, d'autre part, du transfert de matière organique en profondeur, puis de son oxydation en milieu confiné, permettant la réduction et la mobilisation du fer. Il en résulte la formation de kaolins déferrifiés et non aluminisés sous les formations podzoliques. *Pour citer cet article* : C.R. Montes et al., C. R. Geoscience 339 (2007).

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Ferralsols–podzols soil systems and kaolin genesis. A new insight into the relationships between supergene kaolin and podzols is given by the study of a ferralsol–podzol catena from Brazilian Amazonia. The genesis of a deferrified kaolin depended from (1) high weathering during a sufficiently long time period to allow, in depth, quartz dissolution and, in the upper horizons, appearance of podzolization, and (2) in-depth transport of organic matter followed by its oxidation in a confined medium, which permitted reduction and mobilization of iron. These processes allowed kaolin deferrification under the podzols. *To cite this article*: C.R. Montes et al., C. R. Geoscience 339 (2007).

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Kaolin ; Podzolisation ; Amazonie

Keywords : Kaolin; Podzolization; Amazonia

Abridged English version

Introduction: Amazonian kaolin and podzolization

The genesis of the Amazonian kaolin is still object of controversy between sedimentary or in situ weathering processes, or both [4,5,8,12,13,18–22]. In all hypotheses,

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : lucas@univ-tln.fr (Y. Lucas).

massive kaolinization and deferrification occurred in depth on most of old Amazonian weathering covers, including podzol–ferralsol soil systems [18,23]. Moreover, some studies [9] and recent observations from the authors show that the deferrification of the kaolin horizons is further achieved under podzols than under ferralsols, which brings up the question of the role of the podzolic processes in the genesis of kaolins. The water tables observed in depth in eluviated podzolic horizons are rich in dissolved organic matter (DOM) having a high complexing capacity with regard to Fe and thus able to participate to iron lixiviation out of the soil system. Such DOM, however, is unable to percolate through clayey horizons, due to the surface properties of the clay minerals. Therefore, how can podzolisation favour the deferrification of the kaolin horizons? An answer to this question is suggested by a soil catena situated on the high Negro River area, Brazil.

Description of the soil catena

The studied soil catena is situated near the São Gabriel da Cachoeira city, at 0°6'21" S and 66°54'22" W, on the edge of a plateau where podzols developed from the centre, at the expense of the ferralsols, as described elsewhere [9,18,23]. The annual rainfall is around 3000 mm, without a marked dry season; the geological substratum is composed of crystalline rocks having a composition varying between monzogranitic, sienogranitic and quartzomonzonitic. Horizons are sketched in Fig. 1.

Podzolic horizons were observed on the upper part of the catena: O, Es and Bhfe horizons. Es are the well-known white sands; Bhfe is located everywhere there is a transition from Es to horizons having a perceptible content of clay or oxides s.l. Going downslope, podzolic horizons give place to oxic horizons coloured by Fe^{III} oxides: A horizon on the upper part of the profiles; B1 horizon, which progressively changes from sandy to sandy-clay in the downslope direction; B2 sandy-clay horizon; and downslope B3 horizon having water-logging features. Below the B1 horizon, a sandy, pale yellow horizon (Ef) was observed, which indicates a perched water table and which is associated with small micro-valleys, whose bottom is at the same altitude than the Ef horizons. Thick kaolin horizons were observed below the podzolic and oxic horizons. Upslope, Bk1 is a white, pure, soft kaolin; Bk2 has some pale yellow spots at the upper part of the kaolin corpus; downslope Bk3 has some remaining quartz grains and some red and yellow nodules and Bk4 has unweathered muscovites and at its upper part Fe nodules. Gibbsite nodules are located at the downslope half of the catena, as indicated in the figure.

In-depth C1 and C2 horizons are saprolitic horizons and have much muscovite and weathered feldspar. At the lower part of the catena, the water table had the typical odour of sulphurs.

Dynamics of the soil cover

The macroscopic features of the catena permitted, when compared to the knowledge already obtained on such systems from previous studies [3,9,10,17], the understanding of most of its hydrology and biogeochemistry.

Progressive leaching by hyperacid solutions

The sandy-clay oxic horizons (B2, B1) and the deep saprolites were formed from progressive desilication during long periods of intense weathering [17]. The sandy B1 and Ef horizons appeared when the percolating solutions turned hyperacid (pH around 4) because of a negative alkalinity due to high lixiviation and high efficiency of the root cycling of basic cations [10]. Hyperacidity allowed dissolution of oxides and kaolinite, so that the horizons turned progressively sandier up to allow podzolisation.

Podzolization

The sandy O and Es horizons are typical of podzolic processes, where low exchange surfaces of the minerals allow the mobility of organo-Al, Fe complexes down to the BhFe, which forms as soon as the percolating DOM reaches materials having higher exchange surfaces. The geometry of the BhFe horizon is typical of an in situ geochemical evolution [3,9].

The presently described catena gave new insight into the soil forming processes in those systems.

Genesis of deferrificated kaolin

The complete iron leaching of the Bk1 white clay indicates that the percolating solutions were able to transport iron when at equilibrium with kaolinite. Before percolating the Bk1 horizons, those solutions allowed the precipitation of iron oxides in the Bhfe horizons, being thus potentially at saturation with iron. As the precipitation of organic acids in the Bhfe would be inconsistent with a diminution of the pH, it is necessary to consider a diminution of the pe of the percolating solutions to explain the solubilization of iron through reduction. A fast turnover of organic matter of the Bhfe in such systems is attested by ¹⁴C ages giving values between 500 and 2000 yr [1,2] and indicates both immobilization and mineralization of organic matter in the deep Bhfe horizons. Organic

matter bacterial mineralization implies the consuming of available O_2 , then, depending on availability, NO_3^- , Mn^{IV} (both scarce in such soils), and Fe^{III} . The result is, anyway, a diminution of the pe of the percolating solutions.

Downslope gibbsite and Fe oxides precipitation

The soil solutions percolating towards downslope in depth progressively reach horizons richer in base cations due to the presence, at a lower depth, of non-weathered minerals, such as muscovites. As a result, alkalinity and pH increase and gibbsite precipitates, giving Al-nodules. Iron precipitation is depending on a pe shift that can occur in horizons close enough to the surface and where percolating solutions can exchange with an oxic soil atmosphere. In Fig. 2, the percolating solutions are located in a pe –pH diagram.

Conclusion: genesis of the Alto Rio Negro kaolin

The Alto Rio Negro kaolin genesis depended on two main processes:

- a ferrallitic weathering during a period sufficiently long to permit quartz dissolution and a sufficiently confined saprolite to avoid gibbsitic weathering. A consequence of such an evolution is the high cation leaching of the surficial horizons, the formation of hyperacid solutions, clay leaching then podzolization beginning where DOM is able to migrate;
- an in-depth transport of organic matter followed by its oxidation, diminishing the pe sufficiently to reduce Fe^{III} and dissolve iron oxides.

These processes result in the genesis of iron- and gibbsite-free kaolin under the podzol and kaolin with gibbsite and a few iron oxides downslope.

1. Introduction : les kaolins d'Amazonie et la podzolisation

Les kaolins sont des formations constituées presque exclusivement d'argile de type kaolinite $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$. Ils présentent des conditions de genèse variées, hydrothermales, sédimentaires ou d'altération supergène [12]. La genèse des kaolins d'Amazonie brésilienne procède des deux dernières catégories, mais fait encore l'objet de controverses : genèse sédimentaire [5,13], altération in situ [8,14,18] ou genèse mixte [4,19–22]). Les gisements les plus connus (du Jari, du rio Capim) correspondent à l'ensemble inférieur de formations ferrallitiques, éventuellement associées à

des bauxites. Ces gisements sont attribués à une altération intense et prolongée de formations sédimentaires (Alter do Chão ou Itapecuru) [18], complétée localement par des remaniements en milieu continental ou côtier [4,21]. Par ailleurs, les études sur la genèse et la dynamique des systèmes sols ferrallitiques–podzols d'Amazonie ont également montré la présence, en profondeur, d'horizons d'altération kaolinitiques de type kaolin, plus ou moins déferrifiés, aussi bien sur roches sédimentaires [16] que sur roches du socle cristallophyllien [23]. Kaolinisation massive et déferrification apparaissent donc généralisées dans ces formations anciennes d'Amazonie. Enfin, une étude extensive des systèmes de sols du haut rio Negro [9], ainsi que plusieurs observations récentes des auteurs, montrent que la déferrification des kaolins profonds est plus intense sous les podzols que sous les sols ferrallitiques. Se pose ainsi la question des relations entre processus podzoliques et genèse de kaolins déferrifiés.

Les nappes observées dans les horizons éluviés des podzols sont chargées en matière organique dissoute (MOD) à forte capacité complexante, susceptible d'exporter fer et aluminium sous forme de complexes organométalliques [15]. La MOD ne peut, cependant, percoler à travers des matériaux contenant plus de quelques pour cent de minéraux argileux ou d'oxydes s.l., qui ont une grande capacité d'adsorption de la MOD, en raison de leurs fortes surfaces spécifiques et de leurs propriétés de surface. La MOD des nappes circulant dans les horizons éluviés des podzols s'immobilise donc dès qu'elle rencontre un matériau contenant argile ou oxydes s.l., formant un horizon Bh d'accumulation de matière organique. Comment la podzolisation peut-elle dès lors favoriser la déferrification d'horizons très argileux, tels que les kaolins ?

Des propositions de réponse à cette question sont apportées par l'étude d'une toposéquence d'un système sols ferrallitiques–podzols de la région amazonienne du haut rio Negro.

2. Description de la toposéquence étudiée

La toposéquence présentée est située dans la région du haut rio Negro, à proximité de la ville de São Gabriel da Cachoeira, à $0^\circ 6' 21''$ S et $66^\circ 54' 22''$ W. Elle recoupe un épi du bord d'un plateau de faible altitude, occupé par un système sols ferrallitiques–podzols, dans lequel les podzols progressent aux dépens des sols ferrallitiques, de manière centrifuge, à partir du centre du plateau. Il s'agit d'un système du type de ceux déjà décrits en Guyane française [16,23] et dans le haut Rio

Negro [9]. La pluviosité annuelle est autour de 3000 mm, sans saison sèche marquée ; le substratum rocheux est composé de roches cristallines du corps granitique de São Gabriel da Cachoeira [6,7], dont la composition varie entre les types monzogranitique, syénogranitique et quartzomonzonitique. La disposition des horizons est schématisée sur la Fig. 1.

Les horizons à caractères podzoliques sont observés en sommet de séquence, sur le plateau. Il s'agit d'horizons éluviés, O gris foncé, sableux à débris végétaux en cours d'humification et Es, sableux blanc, ainsi que d'horizons BhFe, plus ou moins indurés, bruns à brun rougeâtre, correspondant à des accumulations de matière organique et de fer. Les BhFe s'observent sur l'ensemble des transitions entre horizons éluviés podzoliques et horizons présentant une teneur perceptible (texture, couleur) en argile et/ou oxydes s.l.

Latéralement et vers l'aval, les horizons podzoliques font place à des horizons à caractères ferrallitiques, c'est-à-dire des horizons à argile kaolinique colorés par des oxydes s.l. de fer : l'horizon A, à la partie supérieure des profils, est coloré par la matière organique ; l'horizon B1 passe progressivement, de l'amont vers l'aval, d'un matériau sableux jaune très clair au matériau argilo-sableux brun vif caractérisant l'horizon B2 ; en bas de versant, l'horizon B3 voit le développement progressif, vers l'aval, de caractères hydromorphes. Sous l'horizon B1 est observé un

horizon Ef sableux à sable très grossier et graviers de quartz, de couleur jaune pâle, caractéristique d'un magasin de nappe perchée. Il est associé à un microrelief de microvallées à fond plat (3–4 m de large, 1–1,5 m de profondeur), dont le plancher correspond à l'altitude de l'horizon.

Sur l'ensemble de la séquence, d'épais horizons à caractère de kaolin gisent sous les ensembles podzoliques ou ferrallitiques. À l'amont, la succession verticale Bk2/Bk1 correspond à des matériaux blancs très argileux, sans quartz perceptible au toucher, Bk2 présentant des volumes centimétriques jaune pâle diminuant en profondeur, mais augmentant vers l'aval, et Bk1 une couleur blanche homogène. Sur la moitié inférieure du versant, l'horizon Bk3 présente quelques quartz perceptibles, ainsi que des volumes centimétriques rouges à jaunes, parfois légèrement indurés. Sur la partie basse de la séquence, l'horizon Bk4 possède des caractéristiques proches de celle de Bk3, mais montre des muscovites dont l'abondance augmente en profondeur et, à sa partie supérieure amont, des nodules ferrugineux indurés. Des nodules gibbsitiques de taille centimétrique sont observés sur la moitié aval de la séquence, depuis la fin de l'horizon Ef et jusqu'aux sols à hydromorphie marquée, dans les horizons Bk et à la partie inférieure de l'horizon B2. On notera que les horizons Bk, malgré leur caractère très argileux, conservent une porosité tubulaire significative et sont,

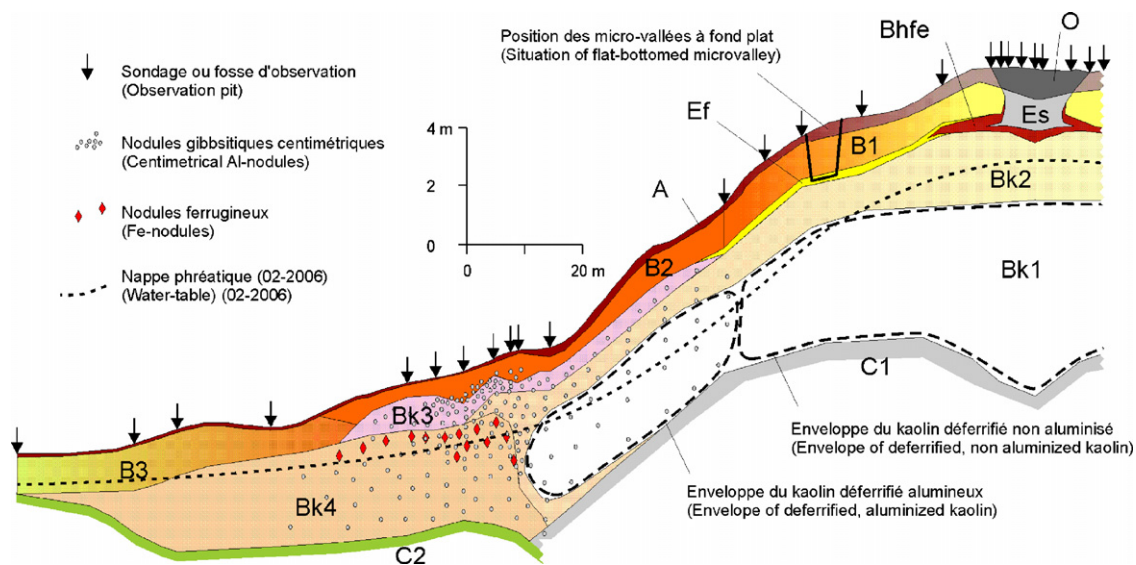


Fig. 1. Schéma de la toposéquence. Les lettres majuscules se rapportent aux nomenclatures FAO. B1, horizons ferrallitiques passant de sableux à l'amont à argilo-sableux à l'aval ; B2, horizons ferrallitiques argilo-sableux ; B3, horizons ferrallitiques à caractères hydromorphes ; Bk, horizons de kaolin ; Ef, horizon éluvié non podzolique.

Fig. 1. Sketch of the soil catena. Capital letters refer to the FAO terminology. B1, oxic B horizons varying from sandy upslope to sandy-clayey downslope; B2, oxic sandy clay B horizons; B3, pseudogley B horizons; Bk, kaolin B horizons; Ef, non-podzolic leached horizon.

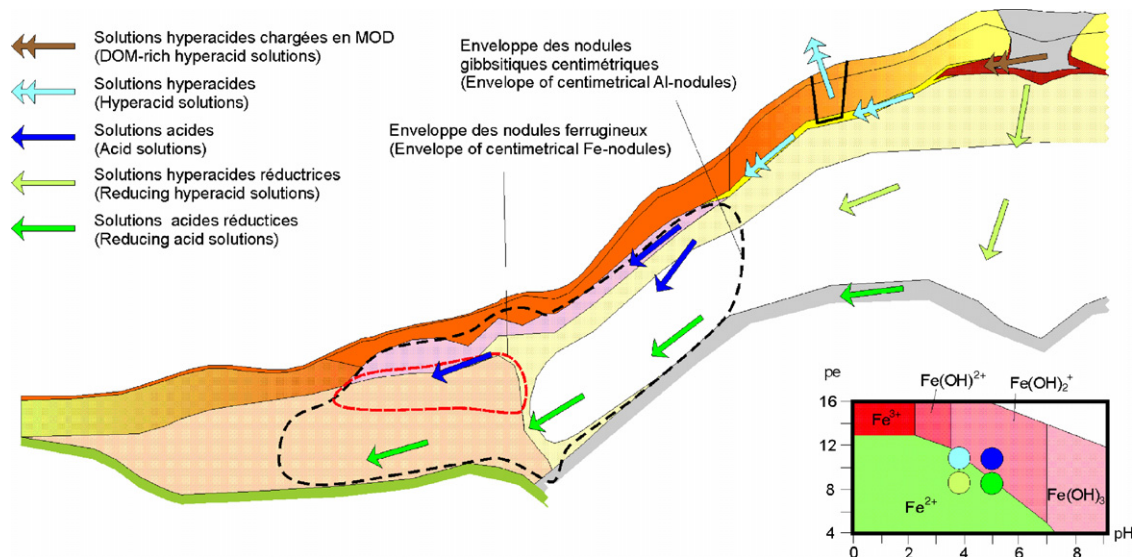


Fig. 2. Écoulement et nature des solutions percolantes, déduits des caractéristiques de la couverture de sol. Les flèches doubles et simples correspondent à des écoulements respectivement rapides et lents. La position présumée des solutions dans un diagramme pe–pH est présentée en encart.

Fig. 2. Circulation and nature of percolating solutions deduced from the soil cover characteristics. Double and simple arrows refer to, respectively, fast and slow circulation. Presumed position of the solutions in a pe–pH diagram is given in the bottom right corner.

jusqu'à plus de 4 m de profondeur, pénétrés par des racines fines.

Les horizons Bk font place en profondeur à des horizons à caractère altéritique marqué : horizons C1 blanc à volumes jaune clair et muscovites abondantes ; C2 verdâtre à muscovites abondantes et feldspaths altérés. La nappe observée à faible profondeur à l'aval de la séquence présente une odeur caractéristique de la présence de sulfure.

3. Fonctionnement de la couverture de sol

Les connaissances déjà acquises sur la morphologie, la minéralogie, le fonctionnement biogéochimique et la dynamique de ce type de système [3,9,10,17] permettent d'identifier, à partir de la description de la séquence, plusieurs caractéristiques de son fonctionnement hydrologique et biogéochimique.

3.1. Appauvrissement progressif par solutions hyperacides

Les horizons ferrallitiques argilo-sableux de type B2 et B3, ainsi que les altérations profondes kaolinitiques, sont formés par désilicification progressive de la roche mère au cours de longues périodes de pédogenèse en conditions ferrallitisantes [15]. Les horizons à caractères ferrallitiques sablo-argileux à sableux B1 et Ef, observés à la partie supérieure des versants, sont

caractéristiques d'un appauvrissement en argile en profondeur, qui s'explique par une hyperacidité des solutions percolantes (pH autour de 4). Celle-ci résulte d'une réserve alcaline négative, due aux effets conjoints d'une extrême lixiviation du sol et de l'efficacité du recyclage racinaire des cations nutritifs [10]. L'hyperacidité des solutions augmente la solubilité de Fe^{III} et surtout d'Al sous forme d'espèces monomères en solution (acidolyse) : à pH 4,5, la solubilité de Fe^{III} à l'équilibre avec la goethite de l'ordre de 10^{-4} M et celle de Al à l'équilibre avec la gibbsite est de l'ordre de 10^{-6} M (valeurs calculées à partir du jeu de données thermodynamiques de la référence [11]). Ceci permet la dissolution progressive de la kaolinite et des oxydes s.l. de Fe et d'Al. Les horizons sableux Ef sont des magasins de nappes perchées dont l'écoulement latéral rapide permet l'exportation des métaux dissous vers, d'une part, les microvallées, puis le réseau hydrographique, et, d'autre part, les sols de bas de versant [16,23]. Le résultat de ces processus est la formation d'horizons de plus en plus sableux, jusqu'à permettre le déclenchement de la podzolisation qui commence au centre des plateaux.

3.2. Podzolisation

Les horizons sableux O et Es sont caractéristiques d'un fonctionnement de type podzolique, leurs faibles surfaces d'échange permettant le transfert d'une MOD

qui participe à l'acidité des solutions et complexe Al et Fe (acido-complexolyse). La couleur de ces horizons témoigne de la disparition des oxydes s.l. de Fe^{III}. La MOD transportée s'insolubilise dès qu'elle rencontre des surfaces d'échange, formant les Bhfe. La géométrie des transitions à Bhfe est caractéristique de transformations géochimiques in situ [3,16].

La séquence observée apporte des éléments nouveaux par rapport aux processus décrits ci-avant.

3.3. Genèse de kaolins déferrifiés

La déferrification complète de l'horizon argileux blanc Bk1 montre que les solutions qui le percolent ont la capacité de transporter le fer, tout en étant à l'équilibre avec la kaolinite. Ces solutions proviennent des formations podzoliques et ont participé à la précipitation d'oxydes de fer s.l. dans les Bhfe, donc sont a priori à saturation avec ceux-ci. Par ailleurs, la précipitation des acides organiques dans les Bhfe va à l'encontre d'une diminution du pH des solutions percolantes. Il faut donc envisager une diminution du pe de celles-ci pour expliquer la mise en solution du fer par réduction. Quels sont les processus possibles ? Les datations de la matière organique des Bhfe profonds des podzols de ce type de système montrent des âges moyens variant de 500 à 2000 ans [1,2]. De tels âges moyens, particulièrement jeunes par rapport à l'âge des systèmes de sol, montrent qu'il existe un renouvellement rapide de la matière organique, qui subit donc une minéralisation dans les horizons Bhfe profonds. Celle-ci se faisant en milieu éloigné de l'atmosphère et des échanges gazeux, les couplages bactériens épuisent l'oxygène dissous disponible, puis utilisent successivement NO₃⁻ et Mn^{IV}, tous deux très peu abondants dans ce type de sols, puis Fe^{III}. La minéralisation de la matière organique transférée depuis la surface dans les BhFe apparaît ainsi comme le facteur probable du caractère réducteur des solutions circulant dans les kaolins déferrifiés.

3.4. Précipitation de gibbsite et d'oxydes de fer s.l. en bas de versant

Les solutions circulant vers le bas de versant rencontrent progressivement des milieux plus riches en alcalins et en alcalino-terreux, en raison de la profondeur moindre d'horizons d'altération contenant encore des minéraux non altérés tels que les muscovites : il en résulte une remontée de la réserve alcaline. Si les milieux traversés possèdent une phase gazeuse, l'équilibre avec le CO₂ de celle-ci entraîne une

remontée du pH et la précipitation conséquente de gibbsite formant des nodules de grande taille. La précipitation d'oxydes s.l. de Fe en nodules dépend également, puisqu'il s'agit de solutions de profondeur à caractère réducteur, d'une remontée du pe due au contact avec l'atmosphère du sol dans des horizons moins profonds. Le diagramme pe-pH présenté sur l'encart de la Fig. 2 montre la position présumée des divers types de solutions circulant dans le système.

4. Conclusion : genèse des kaolins supergènes du haut Rio Negro

La genèse des kaolins supergènes du haut Rio Negro apparaît ainsi dépendante de deux grandes catégories de processus :

- une altération monosiallisante classique, sur un temps suffisamment long pour permettre la dissolution des quartz, et en milieu suffisamment confiné pour éviter la formation d'altérites gibbsitiques ; une telle évolution a également pour conséquence la lixiviation extrême des horizons de surfaces, l'apparition de solutions hyperacides, l'appauvrissement progressif en argile, puis l'apparition de la podzolisation ;
- le transfert de matière organique en profondeur par les nappes podzoliques, puis l'oxydation de celle-ci en milieu confiné, permettant un abaissement du pe suffisant pour provoquer la réduction des oxydes de fer.

Là où ces processus sont actifs, il en résulte la formation de kaolins déferrifiés et non aluminisés sous les formations podzoliques, moins bien déferrifiés et aluminisés à l'aval des versants.

L'extrapolation de ces conclusions aux autres gisements de kaolin des milieux amazoniens doit tenir compte du fait que ces processus ont agi sur de très longues échelles de temps et ont ainsi pu être, localement, momentanément interrompus par des épisodes générateurs de remaniements à courte ou moyenne distance [21].

Remerciements

Les auteurs remercient le soutien des programmes de coopérations bilatérales Capes–Cofecub et Espaca.

Références

- [1] S. Bravard, D. Righi, Characteristics of clays in an oxisol-spodosol toposequence in Amazonia (Brazil), *Clay Miner.* 23 (1988) 279–289.

- [2] S. Bravard, Podzolisation en Amazonie brésilienne. Étude d'une séquence sols ferrallitiques - podzols de la région du nord de Manaus, thèse, université de Poitiers, 1988 (n° 187).
- [3] A. Chauvel, Y. Lucas, R. Boulet, On the genesis of the soil mantle in the region of Manaus, Central Amazonia, *Experientia* 43 (1987) 285–299.
- [4] M.L. Costa, E.L. Moraes, Mineralogy, geochemistry and genesis of kaolins from the Amazon region, *Mineral. Deposita* 33 (1998) 283–297.
- [5] F. Coura, E.N. Moeri, R.S. Kern, Geologia do caulim do Jari, Anais XXXIV Cong. Bras. Geologia SBG Brasil, (1986), pp. 2248–2258.
- [6] R. Dall'Agnol, A.S. Abreu, Características petrográficas e petrológicas do Complexo Guianense na Folha NA. Pico da Neblina, Congresso Brasileiro de Geologia, 29, Ouro Preto, vol. 2, (1976), pp. 321–350.
- [7] R. Dall'Agnol, M.J.B. Macambira, Titanita-biotita granitos do baixo Rio Uaupés, Província Rio Negro, Amazonas. Parte 1: Geologia, petrografia e geocronologia, *Rev. Bras. Geocienc.* 22 (1992) 3–14.
- [8] A.L.S. Duarte, B. Kotschoubey, Cobertura caolínica da região do baixo rio Jari, Proposta de evolução, *Simp. Geol. Amazônia*, 4, Belém, Boi, resumos expandidos, SBG, Brasil, (1994), pp. 79–82.
- [9] D. Dubroeuq, B. Volkoff, From oxisols to spodosols and histosols: evolution of the soil mantles in the Rio Negro Basin (Amazonia), *Catena* 32 (1998) 245–280.
- [10] C. Grimaldi, G. Pedro, Importance de l'hydrolyse acide dans les systèmes pédologiques des régions tropicales humides. Rôle de la forêt et conséquences sur la genèse des sables blancs tropicaux, *C. R. Acad. Sci. Paris* 323 (Ser. IIA) (1996) 483–492.
- [11] CDTF Database. <http://ctdp.ensmp.fr> CTFD version 1.0.0, 2004.
- [12] W.D. Keller, Kaolin – A most diverse rock in genesis, texture, physical properties, and uses, *Geol. Soc. Am. Bull.* 93 (1982) 27–36.
- [13] G. Klammer, Über Plio-Pleistozäne Terrassen und ihre Sedimente im Unteren Amazonasgebiet, *Z. Geomorph.* 15 (1971) 62–106.
- [14] B. Kotschoubey, A.L.S. Duarte, W. Truckenbrodt, Cobertura bauxítica e origem do caulim do Morro do Felipe, Baixo Rio Jari, Estado do Amapá, *Rev. Bras. Geocienc.* 3 (1999) 331–338.
- [15] Y. Lucas, The role of the plants in controlling rates and products of weathering: importance of the biological pumping, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 29 (2001) 135–163.
- [16] Y. Lucas, R. Boulet, L. Veillon, Systèmes sols ferrallitiques–podzols en région amazonienne, in : D. Righi, A. Chauvel (Eds.), *Podzols et Podzolisation*, Afes (Plaisir)–Inra, (Paris), 1987, pp. 53–65.
- [17] Y. Lucas, D. Nahon, S. Cornu, F. Eyrolle, Genèse et fonctionnement des sols en milieu équatorial, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 322 (1996) 1–16.
- [18] C.R. Montes, A.J. Melfi, A. Carvalho, A.C. Vieira-Coelho, M.L.L. Formoso, Genesis, mineralogy and geochemistry of kaolin deposits of the Jarí River, Amapá State, Brazil, *Clays Clay Miner.* 50 (2002) 494–503.
- [19] H.H. Murray, Kaolin Minerals: Their Genesis and Occurrences, Hydrous Phyllosilicates, in : S.W. Bailey (Ed.), *Reviews in Mineralogy*, vol.19, Mineralogical Society of America, 1989 pp. 67–89.
- [20] C. Pandolfo, Bauxita, caulins e arguas na Amazônia, *Ceramica* 25 (1979) 1–15.
- [21] D.F. Rossetti Jr., A.E.d.A. dos Santos, Analysing the origin of the Upper Cretaceous–? Lower Tertiary Rio Capim semi flint (Para State, Brazil) under a sedimentologic perspective, *Sediment. Geol.* 186 (2006) 133–144.
- [22] E.F. Suszczynski, Os recursos minerais e potenciais do Brasil e sua metalogenia, *Interciências*, Rio de Janeiro, Brasil, 1975.
- [23] L. Veillon, Sols ferrallitiques et podzols en Guyane septentrionale. Relations entre systèmes de transformations pédologiques et évolution historique d'un milieu tropical humide et forestier, thèse, université Paris-6, 1990.