

PROCESSUS D'ALTÉRATION ET D'ÉROSION EN MILIEU TROPICAL HUMIDE : DYNAMIQUE DES LATÉRITES DU BASSIN AMAZONIEN (DYLAT AMAZONIE)

Convention CNPq/IRD

IRD/UR058 – E. Fritsch

IAG/NUPEGEL-USP – A. J. Melfi

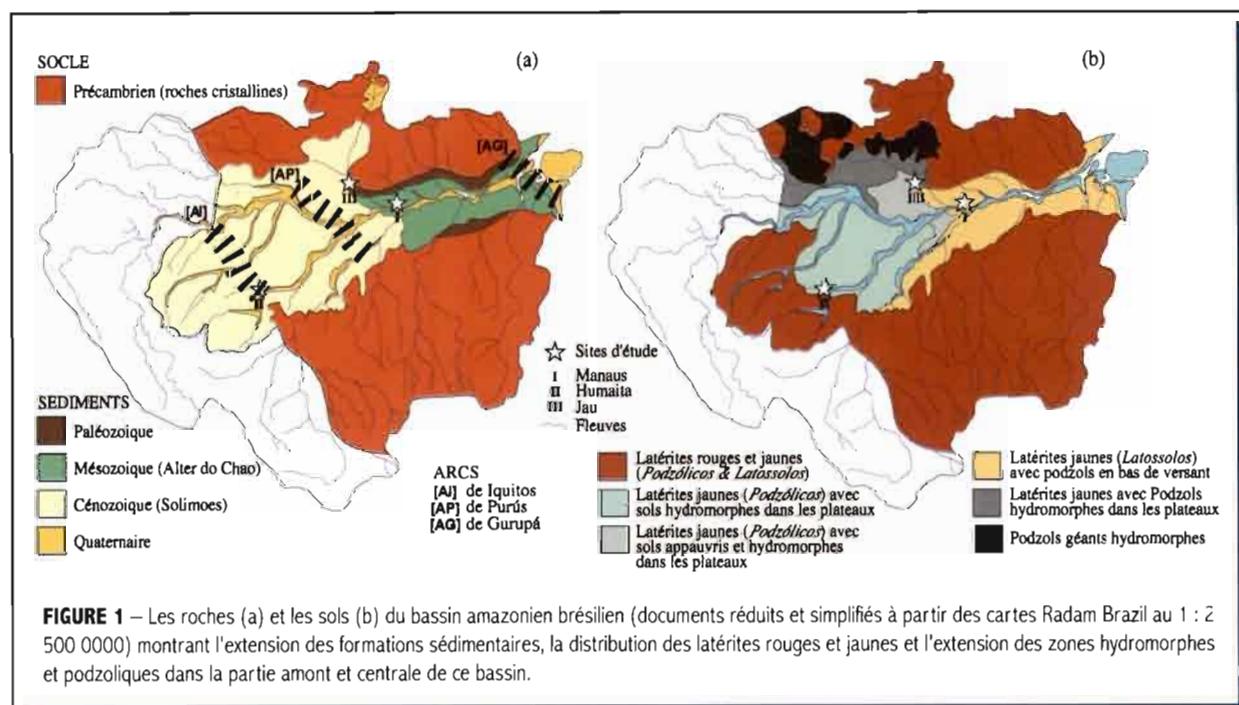
IRD : E. Balan, P. Magat.

IG/NUPEGEL-USP : C. R. Montes-Lauar

Autres partenaires : A.J. Herbillon, S. Stemmler (CNRS), N. R. Nascimento (UNESP), G. Taitson Bueno (PUC).

Le bassin amazonien a focalisé et continue à focaliser l'attention de la communauté scientifique brésilienne et internationale par la diversité des processus hydro-biogéochimiques mis en jeu et des facteurs qui ont pu contrôler leur dynamique. Ces facteurs sont étroitement associés à la géodynamique de la plaque sud américaine et les processus à l'altération, l'érosion et la déformation (flexure et fracture) de cette plaque. La formation du graben amazonien a, entre autres, été propice à l'érosion des socles brésilien et guyanais et à une sédimentation massive dans la partie centrale et amont du bassin (Figure 1a). La subduction de la plaque de Nazca a

amorcé au Tertiaire, la formation de la chaîne montagneuse des Andes sur la bordure Ouest du bassin et progressivement obturé les écoulements vers l'océan Pacifique. La surrection de cette chaîne, toujours actuelle, a joué un rôle déterminant sur le climat, l'érosion, la sédimentation et changé de façon irréversible le sens des écoulements des eaux dans le bassin. Ces changements expliquent la présence d'immenses pénéplaines à faible gradient topographique, de chenaux fossiles et de vastes étendues ennoyées dans la partie amont du bassin, dans une région qui reste soumise à de forts gradients pluviométriques (1,5 à 6 m/an).



Le bassin amazonien couvre une superficie de $7 \cdot 10^6$ km². Son maintien dans la zone tropicale humide au cours des temps géologiques explique la présence de formations meubles, très altérées, souvent épaisses et anciennes (les latérites) qui supportent l'une des plus grandes réserves forestières de la planète. Son histoire a assuré le stockage d'immenses réserves d'eau douce dans sa partie sédimentaire amont et centrale, et son fleuve principal, l'Amazone, continue à exporter des quantités considérables d'eau (209 000 m³/s) et de matières (13,5 t/sec) à l'océan Atlantique. Si les matières exportées par l'Amazone à l'océan sont essentiellement attribuées à la surrection et érosion des Andes, nos études tendent à montrer que d'importantes quantités de matières ont pu également être remobilisées au sein des formations latéritiques de ce bassin et être exportées par érosion par le réseau hydrographique. La nature des processus mis en jeu et l'importance de cette érosion sont attribuées à des environnements hydriques et géochimiques contrastés entre milieu bien drainé et milieu engorgé, et plus particulièrement en milieu engorgé à la recharge et à la vidange des nappes. Ces environnements agissent sur les cycles des éléments majeurs (Si, Al, Fe) et en traces. Ils contrôlent de ce fait les exportations de matières dans les fleuves et les transformations minéralogiques et structurales dans les sols.

Les prospections entreprises dans le cadre du projet Radambrasil (1978) ont montré qu'il existait une distribution ordonnée des sols à l'échelle des paysages et également une distribution ordonnée de ces paysages à l'échelle du bassin amazonien (Figure 1b). Ces distributions et les connaissances plus ponctuelles que nous avons pu acquérir sur les structures et le fonctionnement de ces sols, plus particulièrement dans trois sites pilotes (Manaus, Humaita et Iau) de ce bassin (étoiles dans Figure 1b), nous ont permis de mieux caractériser les processus hydro-biogéochimiques majeurs de la zone tropicale humide : (i) la latéritisation, (ii) l'oxydo-réduction et (iii) la podzolisation. Ces études nous ont également amené à proposer un modèle géochimique global qui retrace, à l'échelle du bassin, les stades successifs de la formation puis de la transformation des formations latéritiques dans un environnement tropical où les apports pluviométriques et les excès d'eau dans les sols et les sédiments sont devenus localement très importants.

Les travaux ont fait appel à des approches pétrographiques, minéralogiques et géochimiques

permettant d'appréhender la nature et la distribution relative des composantes des couvertures d'altération depuis l'échelle d'unités de paysages représentatives des surfaces continentales de ce bassin jusqu'à celle de leurs constituants élémentaires. Sur certains sites, des études hydro-biogéochimiques ont été calées sur ces études structurales. L'originalité des travaux engagés réside de ce fait dans la complémentarité des démarches utilisées, elles mêmes adaptées à un emboîtement naturel de structures.

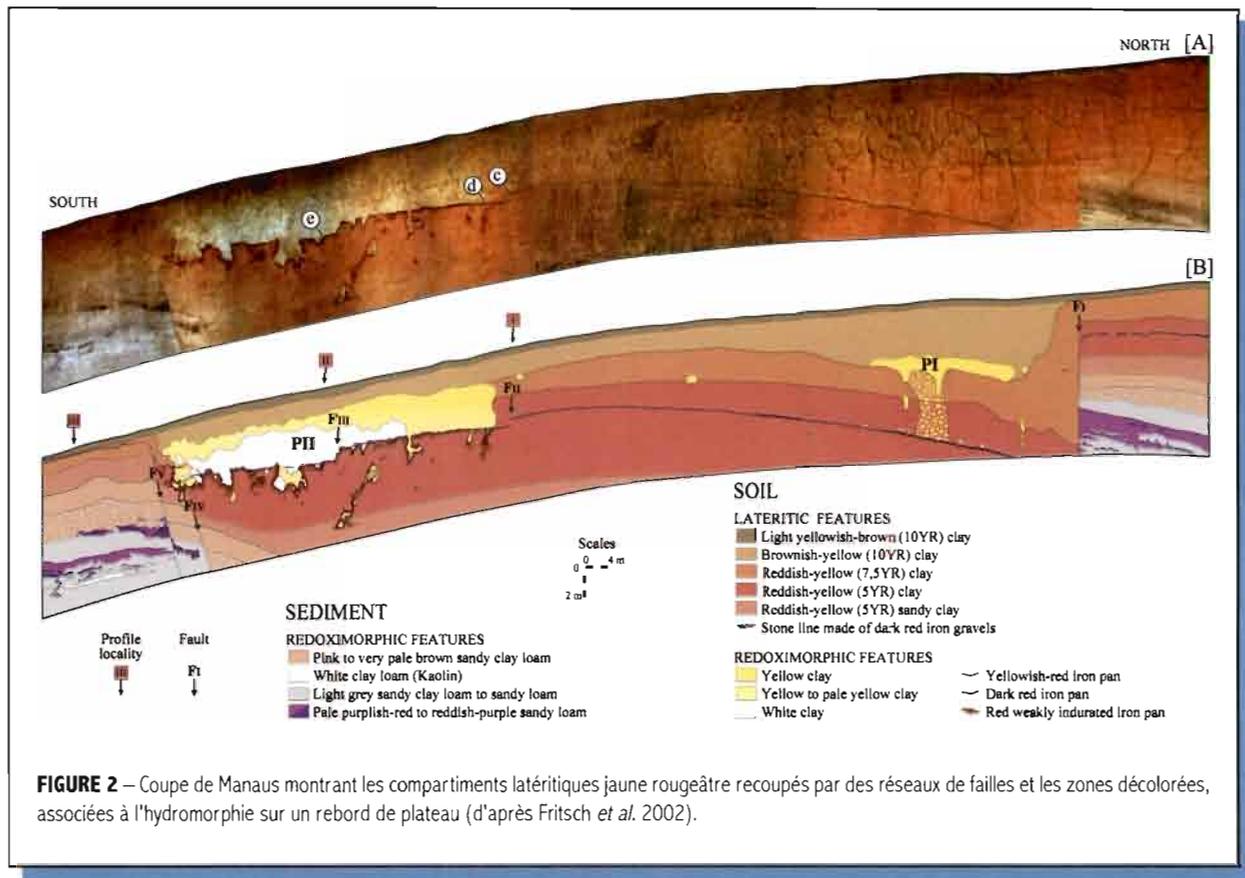
Les travaux ont été initiés en 1996 dans le cadre d'un accord de coopération CNPq/ORSTOM associant le *Núcleo de Pesquisa em Geoquímica e Geofísica da Litosfera* de l'Université de São Paulo et l'Unité de Recherche 12 «Géoscience de l'Environnement Tropical» du Département TOA de l'ORSTOM sur un projet de recherche intitulé "Organisation et fonctionnement hydro-biogéochimique des couvertures latéritiques d'Amazonie" (Dylat Amazonie). Ces travaux ont été soutenus financièrement par un projet thématique FAPESP (96) puis un programme PRONEX (97) d'appui à la création de centres d'excellence. Les travaux de terrain, interrompus en 2000, ont été suivis au Laboratoire de Minéralogie Cristallographie de Paris (LMCP) dans le cadre de la création de l'UR058 Géotrope de l'IRD (Processus d'altération et de pédogenèse et bilans de transferts dans la géosphère tropicale). À la lumière des résultats obtenus, des thématiques et travaux de terrain nouveaux ont été programmés en 2004 dans le cadre d'un accord CAPES-COFECUB s'appuyant sur un projet de recherche portant sur la "Podzolisation des latérites du haut bassin amazonien : Etudes des mécanismes et facteurs contrôlant la dynamique évolutive des podzols et les exportations de matières dans les têtes de rivières du bassin versant du Rio Negro". Ces thématiques ont été financées par un projet FAPESP et un programme ECCO.

Latéritisation

Ce processus est propice à une altération intense des minéraux des formations géologiques en climat chaud et humide. Il assure l'exportation quasi totale des bases (Ca, Mg, Na, K), partielle de la silice et une accumulation résiduelle du fer et de l'aluminium. Il agit essentiellement dans les positions hautes et bien

drainées des paysages. Nos travaux entrepris dans la région de Manaus (Figure 2) ont montré que ces accumulations résiduelles étaient associées à une dissolution ménagée des quartz et à des mécanismes de dissolution - recristallisation affectant les

principales phases minérales secondaires de ces latérites: la kaolinite et les oxydes de fer (sl). Ces transformations minéralogiques sont appréhendées sur le terrain par des variations progressives de texture et de couleur.



Les variations texturales traduisent une diminution progressive de la taille des particules de kaolinite de la base vers le sommet des profils latéritiques. Elles sont particulièrement marquées en profondeur à la transition entre le niveau d'altération et le sol. Des études spectroscopiques (IRTF, REP) ont relié la diminution de la taille de ces particules à un accroissement du désordre cristallin des populations de kaolinite. Le désordre cristallin a été attribué à des fautes d'empilement des feuillets de kaolinite (Balan *et al.* 1999). Les variations texturales observées résultent de ce fait de mécanismes de dissolution/recristallisation propices au remplacement d'anciennes populations de kaolinite de grande taille et dépourvu de fautes d'empilement par de nouvelles populations de kaolinite plus petites et fortement désordonnées.

Les variations colorimétriques traduisent un jaunissement progressif des profils latéritiques rouges. Elles apparaissent particulièrement marquées dans la partie supérieure de ces profils qui s'appauvrissent également en éléments fins. Ces changements se font sans perte des teneurs en fer. Ils ont été attribués à la dissolution d'oxydes de fer faiblement substitués en aluminium (hematite et goethite) suivie par la recristallisation de goethites fortement alumineuses (Fritsch *et al.* 2005). Lorsque l'accumulation d'aluminium dans les structures des goethites est achevée (maximum de 33%), des hydroxydes d'aluminium (gibbsite) sont alors produits. Ces transformations témoignent d'une activité en aluminium et en eau plus élevée dans la partie supérieure de ces profils et, à l'opposé, d'une activité en silice plus faible. Ces conditions d'altération qui

restent propices à la dissolution des kaolinites ne sont par contre plus favorables à leur recristallisation. Elles favorisent à l'opposé le transfert de l'aluminium et de la silice en profondeur et le piégeage de l'aluminium dans des phases minérales plus hydroxylées (goethite alumineuse puis gibbsite). Ces transformations minérales témoignent d'un début de mobilité de l'aluminium dans les profils latéritiques et marquent de ce fait le stade ultime de cette évolution géochimique en milieu aérobie.

De la base vers le sommet des profils latéritiques, les transformations minéralogiques affectant les kaolinites et les oxydes de fer apparaissent décalées dans l'espace, ce qui suggère des évolutions et des cinétiques de transformations différentes pour ces deux grands types de constituants. Ce décalage permet la ferrallitisation (accumulation simultanée du fer et de l'aluminium) puis l'allitisation (accumulation préférentielle d'aluminium) des profils latéritiques. La datation des populations de kaolinite (Balan *et al.* 2005) sont conformes avec nos interprétations minéralogiques dans la mesure où ces profils se rajeunissent de la profondeur vers la surface (de 35 à 5 MA) et où les dernières générations de kaolinite en sommet des latérites (5 MA) marqueraient le début de l'allitisation de ces sols. Ces évolutions géochimiques et minéralogiques présentent certaines analogies avec celles qui ont été établies en Afrique de l'Ouest dans les différentes surfaces d'aplanissement de ce continent (étalement de bauxites très anciennes puis de cuirasses ferrugineuses plus récentes). Contrairement à ces dernières, ces évolutions seraient continues dans le temps et toujours actuelles en Amazonie car affectant des matériaux meubles.

Oxydo-réduction

Ce processus assure une remobilisation massive du fer en milieu engorgé et réducteur. Il agit de ce fait dans des réservoirs de nappes soit en positions hautes (systèmes fermés) ou basses (systèmes ouverts au réseau hydrographique) des paysages. Dans ce type d'environnement, la dissolution des oxydes de fer devient alors prépondérante par rapport à leur recristallisation. La dissolution sélective des oxydes de fer les moins substitués en aluminium (essentiellement hématite) assure le jaunissement et l'éclaircissement des formations latéritiques puis la déstabilisation des goethites alumineuses les plus réfractaires à l'altération assure leur blanchiment. Le fer mobilisé par les nappes

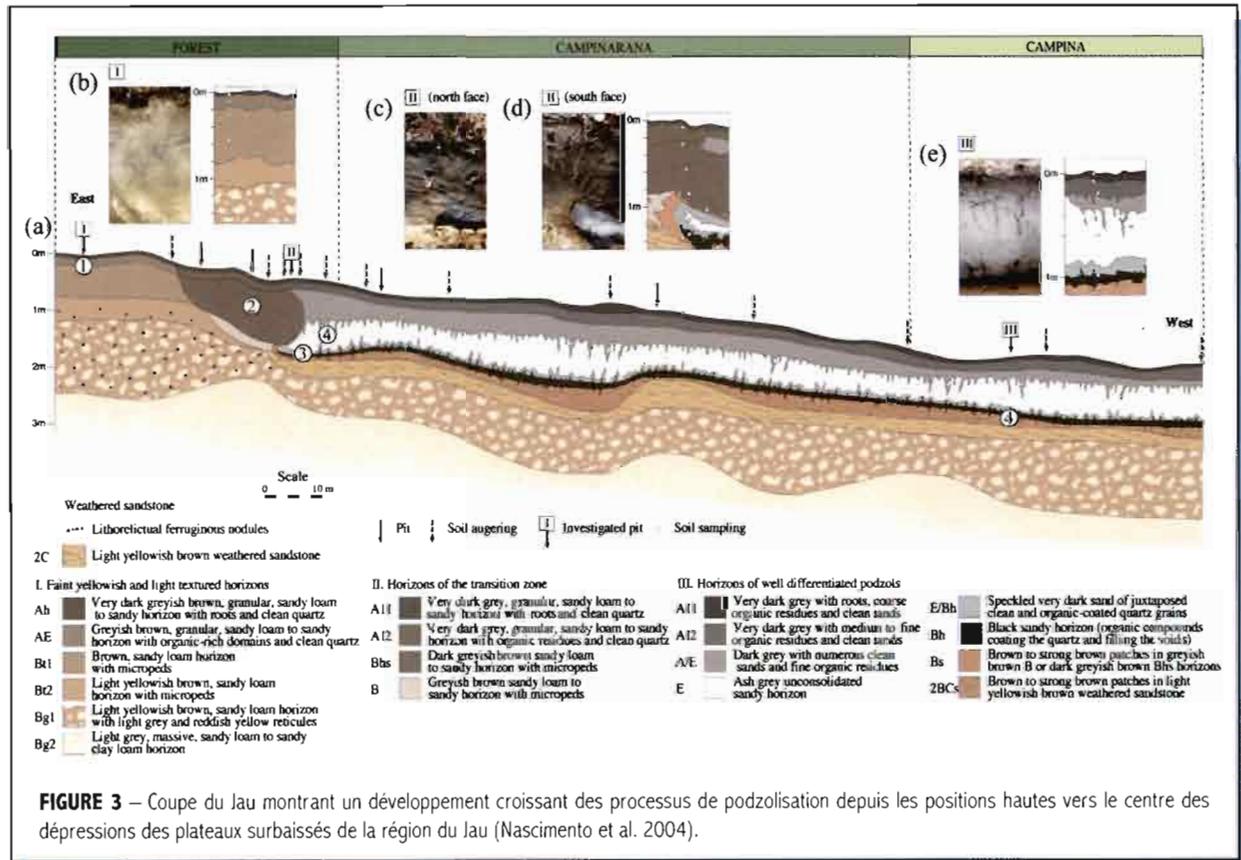
peut soit être exporté au réseau hydrographique soit encore reprécipiter dans les sols (systèmes partiellement ou complètement confinés) au voisinage de la surface dans les franges capillaires des nappes (Humaita) ou plus en profondeur sous forme de fines bandes ferrugineuses (Manaus). Ces mobilisations et exportations de matières favorisent de ce fait l'expansion des formations hydromorphes dans les formations latéritiques. Erosion et oxydo-réduction apparaissent étroitement couplées puisque la mise en place et l'expansion des réseaux hydrographiques dans les paysages peuvent être reliées au développement simultané de réservoirs de nappe.

Les mécanismes mis en jeu sont étroitement liés à l'activité bactérienne qui utilise en environnement anaérobie les composés organiques du sol comme source d'énergie et certains de leurs constituants minéraux (essentiellement nitrates et oxydes de fer) comme accepteurs d'électrons. En croisant expérimentations de terrain (hydro-géochimie des nappes) et de laboratoire (tests d'incubation d'échantillons de sol) sur le site d'Humaita, nous avons pu montrer que la mobilité du fer, sous le contrôle de l'activité bactérienne, était toujours actuelle et particulièrement active dans les fronts d'altération délimitant les formations latéritiques *sensu stricto* des formations hydromorphes. Elle est contrôlée par la nature et l'abondance des composés organiques et minéraux susceptibles d'être oxydés ou réduits et par la dynamique des nappes. Cette libération du fer est sporadique au niveau de ces fronts et n'a lieu qu'en saison pluvieuse lors du rabattement de ces nappes. La réduction des nitrates puis des oxydes de fer est couplée (i) à une production de carbone organique dissout (COD) susceptible de complexer les métaux (Fe et Al), (ii) à une minéralisation des composés organiques facilement biodégradables (COD) et humifiées, (iii) à la transformation d'oxydes bien cristallisés (essentiellement goethite alumineuse) en nano oxydes mal cristallisés (ferrihydrite). Cette dynamique évolutive a été localement perturbée par la tectonique récente, plus particulièrement dans la région de Manaus. Dans cette région proche de l'arc de Purus (Figure 2a), nous avons pu démontrer (Fritsch *et al.* 2005) que le blanchiment des sédiments, lui-même intimement associé à la formation des gisements de kaolin du bassin, était antérieur à la réactivation des failles du graben amazonien et que le blanchiment des sols était, à l'inverse, postérieur à cette tectonique et toujours actuel.

Podzolisation

La podzolisation assure la production massive de composés organiques acides dans les sols, la dissolution de leurs constituants argileux (oxydes de fer, d'aluminium et kaolinite) et la formation de complexes organo-métalliques (essentiellement Fe et Al). Ce processus, qui agit dans des formations

latéritiques préalablement appauvries en éléments fins, relaye l'oxydo-réduction II a été attribuée au développement de conditions réductrices et acides dans les systèmes de nappe. Nous l'avons étudié dans les plateaux surbaissés du parc national du Jau (Figure 3) (Nascimento *et al.* 2004), situé à la périphérie des zones fortement podzolisées du haut bassin amazonien (Figure 1b).



Les travaux réalisés ont permis de distinguer deux grandes étapes lors de la podzolisation des latérites. La première étape forme en milieu réducteur des podzols humifères très épais, faiblement argileux et fortement enrichis en complexes organométalliques (horizon Bhs). Cette étape est propice (i) à l'accumulation de matières organiques dans la partie supérieure des profils latéritiques préalablement éclaircis et appauvris en argile, (ii) à la migration verticale de composés organiques acides et de petite taille, et (iii) au couplage des mécanismes de dissolution des constituants argileux et de formations de complexes organométalliques. La dissolution sélective des constituants argileux (oxydes

de fer, d'aluminium puis kaolinite) permet d'abord la formation de complexes à base fer puis à base d'aluminium. La seconde étape assure la perte quasi totale en éléments fins et l'accumulation résiduelle de sables quartzeux. Cette étape est associée à la mise en place d'une nappe perchée acide (pH 3,5) dans des podzols à très forte différenciation verticale. Ces podzols comprennent alors des horizons supérieurs sableux très poreux (horizons organiques A et cendreaux E) et des horizons inférieurs d'accumulation de matières organiques moins perméables (horizons noirs Bh et brun foncé Bs). Les horizons sableux se forment au détriment de l'horizon Bhs amont riche en complexes organo-

métalliques. Ces complexes et ceux nouvellement formés (essentiellement alumineux) peuvent migrer en profondeur et s'accumuler lors de la vidange de la nappe dans des matériaux encaissants moins perméables (formation d'un horizon Bs). Le développement de conditions acides dans les eaux de la nappe permet la désorption progressive des métaux associés aux composés organiques. Enfin, le développement d'une macroporosité dans les horizons sableux des podzols permet (i) la migration verticale puis l'accumulation à la base de ces horizons de composés organiques noirs de plus grande taille et à plus faible charge métallique (formation d'un horizon Bh) et (ii) l'exportation de ces composés par la nappe (apparition et développement vertical d'un horizon cendreuse E). Les exportations par la nappe de matière dissoute, colloïdale et particulaire au réseau hydrographique, toujours actuelle (eaux noires), assure l'expansion latérale des podzols et la réduction des aires latéritiques dans les plateaux.

Le bassin amazonien : un exemple d'érosion géochimique en climat tropical humide

Les travaux entrepris dans le bassin amazonien nous amènent à proposer un modèle géochimique global qui retrace les stades successifs de la formation puis de la transformation des formations latéritiques dans un environnement tropical où les apports pluviométriques et les excès d'eau dans les sols et les sédiments sont localement très importants. Le modèle oppose un milieu bien drainé (formations latéritiques *sensu stricto*) prédominant à la périphérie de ce bassin à un milieu moins bien drainé, périodiquement ou constamment engorgé (formations hydromorphes) qui devient majoritaire dans la partie centrale et surtout amont et plus pluvieuse de ce bassin (Figure 1b).

Le modèle attribue la mise en place et l'épaississement des profils latéritiques au développement séquentiel de deux processus majeurs : la ferrallitisation et l'allitisation. A la base de ces profils, la ferrallitisation assurent l'accumulation résiduelle du fer, de l'aluminium et d'une partie de la silice dans des phases minérales métastables, très largement représentatives des environnements tropicaux (kaolinite et oxydes de fer). Si la mobilité du fer et de l'aluminium reste très limitée dans cette partie des profils

d'altération, des mécanismes de dissolution et de recristallisation agissent très lentement aux rythmes des saisons et des temps géologiques. Ces mécanismes diminuent la taille et accroissent la réactivité de surface des minéraux en augmentant le désordre cristallin des kaolinites et les taux de substitution des oxydes de fer (formation de matériaux à texture de sol). En l'absence d'érosion mécanique, l'allitisation de la partie supérieure de ces profils favorise la cristallisation de goethite alumineuse puis de gibbsite, et non plus de kaolinite. Ces transformations minérales entraînent alors un jaunissement et un appauvrissement des profils d'altération.

Le modèle relie enfin la dégradation naturelle des formations latéritiques du bassin amazonien à l'expansion dans l'espace et dans le temps des formations hydromorphes et des systèmes de nappe qui leur sont associés. L'apparition de conditions réductrices puis acides dans les systèmes de nappe ont permis le développement séquentiel de deux processus majeurs pour la zone tropicale humide : l'oxydoréduction et la podzolisation. Ces processus assurent la remobilisation massive du fer et de l'aluminium préalablement accumulés dans les formations latéritiques, couplée à une accumulation et redistribution des matières organiques. Ces redistributions de matières dans les sols puis exportations par les fleuves se font essentiellement sous forme dissoute (oxydoréduction) ou complexée à des substances organiques (podzolisation). Elles contribuent de ce fait à une véritable fonte géochimique des couvertures d'altération et à l'accumulation d'un résidu quartzéux dans un environnement qui s'acidifie et devient pratiquement stérile et inerte aux activités biologiques.

Les processus inventoriés dans le bassin amazonien caractérisent de ce fait des environnements très contrastés par la nature des écoulements qui leur sont généralement attribués (non saturé *versus* saturé) et par les conditions redox qui y règnent ou y ont régné et qui contrôlent en grande partie le cycle du carbone et du fer. Les problèmes environnementaux associés à la dégradation des latérites et à l'exportation de matières au réseau hydrographique sont majeurs au regard des superficies concernées. Cette dégradation joue un rôle essentiel dans le stockage du carbone organique et le piégeage transitoire des métaux. Elle fournit enfin dans les environnements podzoliques des conditions peu propices au développement de la vie.

POUR EN SAVOIR PLUS

Balan, E., Allard, T., Boizot, B., Morin, G., Muller, J.P. 1999. Structural Fe³⁺ in natural kaolinites: New insights from electron paramagnetic resonance spectra fitting at X and Q-band frequencies. *Clays and Clay Minerals*, 47, 605-616.

Fritsch E., Montes-Lauar C.R., Boulet R., Melfi A.J., Balan E., Magat Ph. 2002. Lateritic and redoximorphic features in a faulted landscape near Manaus, Brazil. *European Journal of Soil Science*, 53, 2, 203-218.

Nascimento (do) N.R., Bueno G. T., Fritsch E., Herbillon A.J., Allard Th., Melfi A.J., Astolfo R., Boucher H., Y. Li. 2004. Podzolisation as a deferrallitization process. A study of an Acrisol-Podzol sequence derived from Paleozoic sandstones in the northern upper Amazon Basin. *European Journal of Soil Science*, 55, 523-538.

Fritsch E., Morin G., Bedidi A., Bonnin D., Balan E., Caquineau S., Calas G. 2005. Transformation of haematite and Al-poor goethite to Al-rich goethite and associated yellowing in a ferrallitic clay soil profile of the middle Amazon basin (Manaus, Brazil). *European Journal of Soil Science*, (10.1111/j.1365-2389.2005.00693.x).

Balan E., Allard T., Fritsch E., Sélo M., Falguères C., Chabaux F., Pierret M.-C., Calas G. 2005. Formation and evolution of lateritic profiles in the middle Amazon basin: Insights from radiation-induced defects in kaolinite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* (in press).

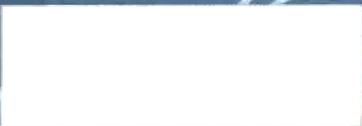
Stemmler S.J., Fritsch E., Herbillon A.J., Nascimento (do) N.R., Trollard F., Bourrie G., Grimaldi M., Berthelin J. 200X. Laboratory and field experiments on microbial-induced weathering of Fe-oxides from tropical profiles of the low elevated plateaux of the upper Amazon Basin. *Soil Science Society of America Journal* (submitted).



Recherches de

L'IRD

au **Brésil**
depuis 1998



IRD

Institut de recherche
pour le développement



Conception graphique
Fernando Brandão

Impression et reliure
Charbel Gráfica e Editora