

Les couvertures pédologiques à Podzols du Bassin du Haut Rio Negro (Amazonie)

D. Dubroeuq, B. Volkoff et P. Faure

IRD, Institut de Recherche pour le Développement, 32, avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy, France

RÉSUMÉ

Une carte des couvertures pédologiques du bassin du Haut Rio Negro a été réalisée à l'aide de données de terrain et d'une photo-interprétation d'images satellitaires et radar aéroporté. Elle concerne la partie du Bouclier Guyanais commune au Brésil, à la Colombie et au Venezuela, située entre 1° de latitude sud et 4° de latitude nord et soumise à un climat équatorial très humide (3000 à 4000 mm de précipitations annuelles). La carte met en évidence l'ampleur des domaines sableux différenciés au sein d'une surface d'aplanissement à sols ferrallitiques. L'ensemble de ces domaines constitue une plaine à podzols hydromorphes et à podzols géants. Ces sols se sont formés aux dépens des sols ferrallitiques qui couvrent aussi bien des collines basses que de larges surfaces planes. Des sols ferrallitiques argileux typiques (Typic Haploperox) et des sols ferrallitiques jaunes appauvris (Xanthic Acroperox et Acrudoxic Kandiuult) caractérisent les collines convexes. Ils sont considérés comme les restes d'une vieille couverture bauxitique car ils comportent fréquemment d'abondants éléments grossiers (« Clayey Skeletal » Typic Haploperox et Acrudoxic Kandiuult), nodules et blocs de cuirasses résiduels riches en gibbsite. Les sols ferrallitiques de la plaine sont pour la plupart jaunes et appauvris (Xanthic Acroperox et Acrudoxic Kandiuult). Des podzols prennent naissance à l'aval des collines et se développent vers l'amont des versants. Dans la plaine ferrallitique les podzols apparaissent au centre des interfluves puis s'étendent vers leur bordure. Les types de sol rencontrés dans la plaine sableuse sont étroitement dépendants de leur position sur ces interfluves. Des podzols de 1 à 3 m de profondeur (Ultic Alaquod) se trouvent au contact des sols ferrallitiques jaunes alors que des podzols géants (Typic Quartzipsamment) de 4 à 10 m de profondeur couvrent l'essentiel des zones sableuses. Des tourbes (Hydric Haplofibrist et Hemic Haplosaprist) sont aussi rencontrées au centre des étendues sableuses. Ces sols correspondent à différentes étapes d'une évolution secondaire des podzols contrôlée par une nappe phréatique peu profonde. Les mouvements tectoniques, enfoncements et soulèvements, qui affectent cette partie du bouclier seraient à l'origine de la distribution des sols que l'on observe actuellement.

Mots clés

Podzols, Rio Negro, carte pédologique, Amazonie

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: Bx19014 Ex: 1

SUMMARY

SOIL MANTLES WITH PODZOLS IN THE UPPER RIO NEGRO BASIN (AMAZONIA)

The map of the soil mantles of the Upper Rio Negro basin was produced from field observations and interpretations of Landsat and Radar-SLAR images. The mapped zone, which consists of the portion of the Guyana shield that is common to Brazil, Colombia and Venezuela is located between latitudes 1° S and 4° N. This region is submitted to a humid equatorial climate (3000 to 4 000 mm of annual precipitation). The map shows extensive sandy leveled domains of hydromorphic and giant podzols upon a smooth ferrallitic



landscape composed of low hills and wide planed areas. Podzols are formed at the expense of the ferrallitic cover of both hilly and planed areas. The soils of the hills are typical clayey ferrallitic soils (Typic Haploperox) and yellow clay-empoverished ferrallitic soils (Xanthic Acroperox and Acrudoxic Kandiuult). They are considered as remnants of an old bauxitic surface since most of them are gravelly soils (« Clayey Skeletal » Typic Haploperox and Acrudoxic Kandiuult) with gbsite-rich nodules and residual fragmented ferricretes. Most ferrallitic soils in planed areas are yellow and clay-empoverished (Xanthic Acroperox and Acrudoxic Kandiuult). In the hilly landscape Podzols may originate downslope and then develop upslope. In the planed areas, Podzols extend from the center to the edge of the interfluves. Soils types of the sandy plains are closely related to their position on the interfluves. Giant podzols (Typic Quartzipsamment), 4 to 10 meter deep, cover most of center parts of the sandy plain whereas 1 to 3 meter deep Podzols (Ultic Alaquod) are found in contact with ferrallitic soils. Peats (Hydric Haplofibrist and Hemic Haplosaprist) are also seen in the center of sandy plains. These soils correspond to different stages of a secondary evolution of podzols affected by shallow groundwater. The present soil distribution pattern in the Upper Rio Negro Basin is most probably the result of the action of tectonic movements such as uplifts and subsidence in the Guyana shield.

Key-words

Podzols, Rio Negro basin, soil map, Amazonia

RESUMEN

LAS CUBIERTAS DE SUELOS CON PODSOLES DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO NEGRO (AMAZONIA)

Un mapa de las cubiertas de suelos de la cuenca alta del Río Negro se realizó en base a datos de campo y de una interpretación de imágenes satelitarias y radar aerotransportado. Se refiere a la parte del escudo Guyanés, común a Brasil, Colombia y Venezuela, situada entre el 1° de latitud sur y el 4° de latitud norte con un clima ecuatorial muy húmedo (3.000 a 4.000 mm de lluvias anuales). El mapa resalta la amplitud de los dominios arenosos formados en una superficie de aplanamiento con suelos ferralíticos. El conjunto de los dominios constituye una llanura con podsoles hidromórficos y podsoles gigantes. Los suelos se formaron a partir de suelos ferralíticos que cubren tanto lomas bajas como extensas superficies planas. Suelos ferralíticos arcillosos típicos (Typic Haploperox) y suelos ferralíticos amarillos empobrecidos (Xanthic Acroperox y Acrudoxic Kandiuult) caracterizan las lomas convexas. Se consideran como restos de una vieja cobertura bauxítica pues comportan a menudo abundantes elementos gruesos ("Clayey Skeletal" Typic Haploperox y Acrudoxic Kandiuult), nódulos y bloques residuales de capa ferruginosa ricas en gibsita. Los suelos ferralíticos de la llanura son en su mayoría amarillos y empobrecidos (Xanthic Acroperox y Acrudoxic Kandiuult). Podsoles se inician aguas abajo de las lomas y se desarrollan aguas arriba de los vertientes. En la llanura ferralítica, los podsoles aparecen en el centro de los interfluvios y posteriormente se extienden hacia sus bordes. Los tipos de suelos encontrados en la llanura arenosa son estrechamente dependientes de su ubicación en los interfluvios. Podsoles de 1 a 3 m de profundidad (Ultic Alaquod) se encuentran en contacto de los suelos ferralíticos amarillos mientras podsoles gigantes (Typic Quartzipsamment) de 4 a 10 m de profundidad cubren la casi totalidad de las zonas arenosas. Turbas (Hydric Haplofibrist y Hemic Haplosaprist) se encuentran igualmente en el centro de las zonas arenosas. Estos suelos corresponden a diferentes etapas de una evolución secundaria de los podsoles controlados por una capa freática poco profunda. Los movimientos tectónicos, hundimientos y levantamiento que afectan esta parte del escudo estarían al origen de la distribución de los suelos observados actualmente.

Palabras claves

Podsoles, Río Negro, mapa de suelos, Amazonia

RESUMO

AS COBERTURAS DE SOLOS COM PODZOIS NA BACIA DO ALTO RIO NEGRO (AMAZÔNIA).

Um mapa de solos da bacia do Alto Rio Negro foi elaborado a partir de observações de campo e da interpretação de imagens Landsat e Radar-SLAR. Trata-se da parte do Escudo da Guiana comun ao Brasil, Colômbia et Venezuela entre as latitudes 1°S e 4°N. O clima é equatorial muito úmido : 3000-4000 mm de precipitação anual. O mapa mostra a grande extensão de áreas arenosas planas no meio de uma superfície baixa, de relevo em colinas, com áreas muito aplainadas, encoberta de solos ferralíticos. O conjunto das áreas arenosas forma uma planície com podzois hidromórficos e podzois gigantes. Os podzois se desenvolveram a partir dos solos ferralíticos das colinas baixas e das áreas muito aplainadas. Os solos das colinas são principalmente ferralítico argilosos típicos (Typic Haploperox) e ferralítico amarelos empobrecidos em argila (Xantic Acroperox e Acrudoxic Kandiuult). Esses solos são considerados como restos de uma antiga cobertura bauxítica por conterem frequentemente muito cascalho (« Clayey Skeletal » Typic Haploperox e

Acrudoxic Kandiodult) constituído de nódulos e fragmentos de crostas gibsíticas. Os solos ferralítico das áreas aplainadas são em sua maioria amarelos empobrecidos em argila (*Xantic Acroperox* e *Acrudoxic Kandiodult*). Os podzois aparecem na base das vertentes de certas colinas e se desenvolvem em direção da encosta. Nas áreas aplainadas os podzois se formam nos centros e se estendem em direção das bordas dos interflúes. O tipo de solo encontrado na planície arenosa varia de acordo com a posição no interflúe. Os podzois de 1 a 3 m de profundidade (*Ultic Alaquod*) se localizam na proximidade dos solos ferralíticos amarelos enquanto que os Podzois gigantes (*Typic Quartzipsamment*) ocupam as partes centrais das áreas arenosas. Turfas (*Hydric Haplofibrist* e *Hemic Haplosaprist*) são também encontradas no centro das áreas arenosas. Estes solos correspondem a uma evolução secundária dos podzois quando o lençol freático se torna subsuperficial. Movimentos tectônicos, subsidência e levantamentos, os quais marcaram esta parte do escudo, seriam a causa da distribuição dos solos hoje observada.

Palabras claves

Podzois, Bacia do Rio Negro, mapa de solos, Amazônia

Le Bouclier Guyanais présente, dans la majorité de son étendue et dans sa partie vénézuélienne et guyanaise, une succession de surfaces d'aplanissement étagées entre 2000 et 200 m (Choubert, 1957; Mc Connel, 1968; Gavaud *et al.*, 1986). Sur sa bordure Ouest, le long d'une limite qui suit approximativement les cours de l'Orénoque et du Rio Negro, les massifs montagneux disparaissent et font place à une vaste pénéplaine qui s'étend principalement sur le Brésil et la Colombie entre les cotes 70 et 200 m et qui constitue le bassin du haut Rio Negro. Cette région fait partie du domaine de la forêt amazonienne. Elle est extrêmement arrosée (3 à 4 m de précipitations annuelles), le réseau hydrographique est très souvent diffus et la coloration brune de la plupart des eaux serait due à l'existence de grandes surfaces couvertes de podzols.

Alors que les surfaces d'aplanissement les plus élevées sont caractérisées par une relative uniformité de leur manteau d'altération bauxitique à sols ferrallitiques argileux rouges (Projeto Radambrasil 1976; Aleva, 1981; Atlas del Inventario de Tierras del Territorio Federal Amazonas, 1987; Dubroeuq *et al.*, 1988), les surfaces inférieures présentent au contraire des sols nettement plus diversifiés avec des associations de sols ferrallitiques argileux et lessivés, de podzols et de sols hydromorphes (Klinge, 1965; Sombroek, 1966; Projeto Radambrasil 1976; Atlas del Inventario de Tierras del Territorio Federal Amazonas, 1987; Proyecto Radargramétrico del Amazonas, 1979).

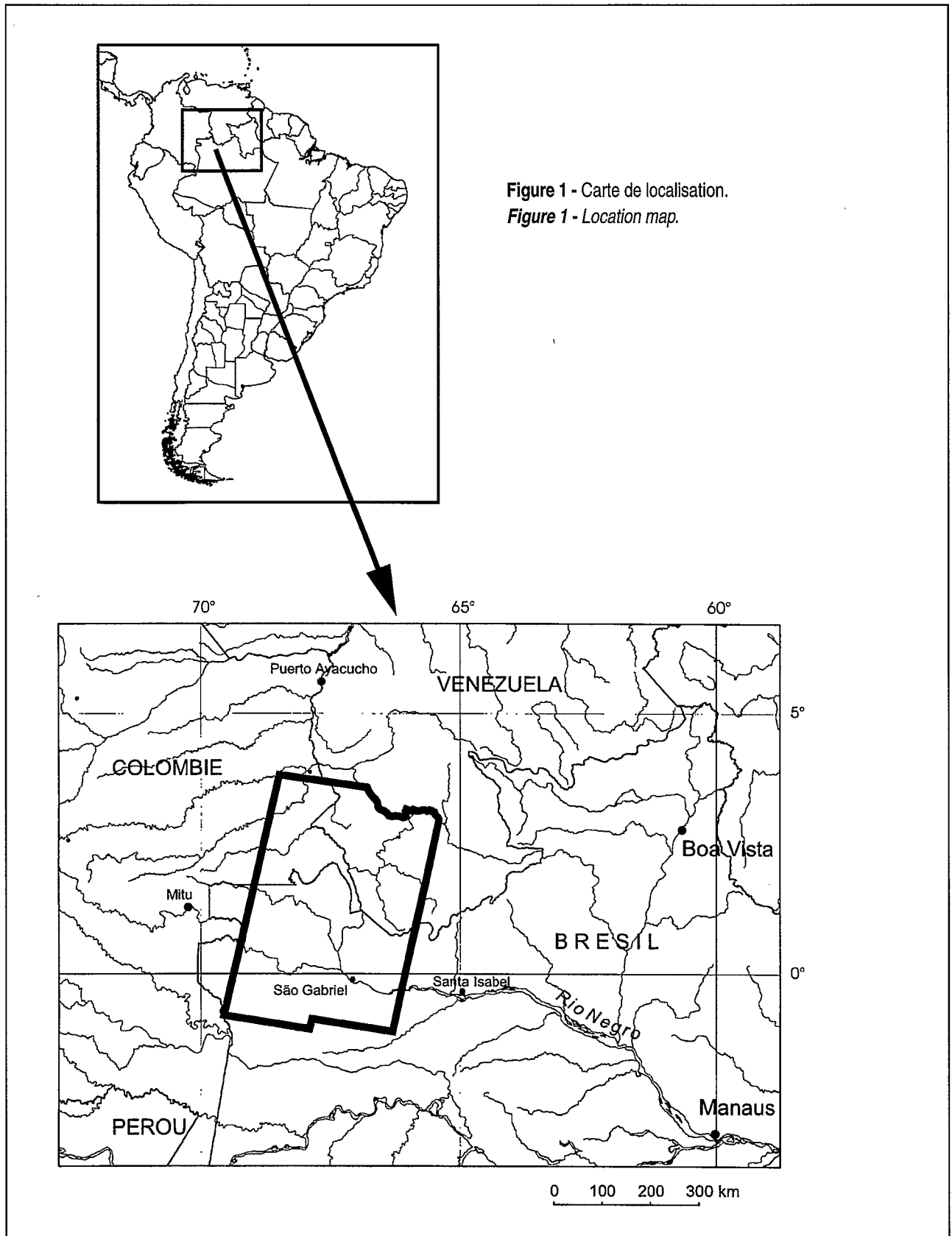
Dans les plaines équatoriales humides d'Amérique du Sud, sur roches sédimentaires, des sols initialement ferrallitiques peuvent évoluer et se transformer latéralement en podzols (Turenne, 1975; Boulet *et al.*, 1984; Veillon, 1988, 1990; Lucas *et al.*, 1984, 1987; Chauvel *et al.*, 1987). De telles transforma-

tions s'observent également sur les roches cristallines du bouclier guyanais (Fritsch, 1984; Fritsch *et al.*, 1986; Dubroeuq et Volkoff, 1998). Les podzols eux-mêmes peuvent évoluer en sols tourbeux faiblement argileux sous l'influence d'une végétation arborée (Dubroeuq et Volkoff, 1988).

Ces faits laissent à penser que les couvertures pédologiques des basses surfaces ont évolué dans le temps pour constituer la diversité des sols que l'on observe actuellement, contrairement aux couvertures des hautes surfaces du Bouclier Guyanais qui apparaissent comme fossilisées. On peut se demander alors quels sont les causes et les mécanismes d'évolution de ces couvertures.

La réponse à cette question n'apporte aucune perspective d'intérêt agronomique car tous les sols considérés sont de trop basse fertilité. Elle doit seulement nous permettre de mieux comprendre certains processus naturels fondamentaux tels que le façonnement du modelé, la redistribution des éléments majeurs et la formation des sables blancs, processus encore mal expliqués dans cette région. Avant d'entreprendre des recherches dans ce domaine, une première approche par une cartographie régionale montrant l'organisation spatiale et l'extension des différentes couvertures pédologiques s'avère nécessaire.

Le Haut Rio Negro draine trois pays, le Brésil, la Colombie et le Venezuela (*figure 1*). Des cartes pédologiques de reconnaissance, à 1/1 000 000 au Brésil (Projeto Radambrasil, 1976, 1977), à 1/500 000 en Colombie (Proyecto Radargramétrico del Amazonas, 1979) et à 1/250 000 au Venezuela (Atlas del Inventario de Tierras del Territorio Federal Amazonas, 1987), sont disponibles dans chacune des parties. Elles sont peu précises car elles sont basées sur l'interprétation d'images radar latéral aéroporté (SLAR), avec un nombre limité de vérifica-



tions au sol. La zone est en effet difficilement accessible, il n'y a pas de routes, et les voies navigables sont barrées par des rapides. De plus, chacune a utilisé une taxonomie et une approche paysagique différentes, rendant impossible leur réunion en un document unique.

On se propose ici d'établir une carte unifiée de la région.

S'appuyant sur une méthodologie d'analyse acquise par l'un d'entre nous (Atlas del Inventario de Tierras del Territorio Federal Amazonas, 1987), nous avons appliqué une même méthode pour couvrir toute la plaine sans nous attacher à établir les correspondances entre les diverses cartes nationales. Toutefois des corrélations entre celles-ci et notre carte pourraient être faites, même si les limites des unités cartographiques ne se superposent pas toujours, les clefs pour la compréhension des règles de distribution étant données par les résultats de l'analyse détaillée de quelques séquences de sols caractéristiques (Dubroeuq et Volkoff, 1998).

Ce sont les disponibilités en images radar et satellite qui ont imposé les limites du périmètre cartographié qui correspond à la quasi totalité du haut bassin du Rio Negro à l'amont de Santa Isabel do Rio Negro (figure 2).

CADRE GEOGRAPHIQUE

Le bassin du Rio Negro s'étend entre les latitudes 1° S et 4° N et les longitudes 70° W et 66° W. Son climat est uniformément équatorial pluvieux (Köppen = Af) avec des températures moyennes annuelles de 26 °C et une amplitude des moyennes mensuelles inférieure à 5 °C (isothermique). Les précipitations varient de 3000 à 4000 mm par an. Il n'y a pas de saison sèche marquée, on observe seulement un maximum de l'intensité des pluies en mai-juin. Ce maximum est surtout marqué dans les stations situées à l'Ouest et au Nord du bassin (Iauareté, San Carlos, Maroa). Les oscillations climatiques semblent avoir été peu importantes durant le Quaternaire (Colinvaux *et al.*, 1996), bien que des phases de climats très secs aient été signalées dans des régions proches (Tricart, 1985; Clapperton, 1993).

Le substratum géologique est un socle antécambrien appelé Complexe Guyanais (Choubert, 1974), composé de roches cristallines migmatisées et tectonisées, allant des embréchites et migmatites essentiellement feldspathiques aux gneiss mica-cés à faciès nettement pélitique, avec quelques inclusions granitiques. L'âge de ces formations s'échelonne entre 2300 et 2900 millions d'années (Cecilia Martin, 1976; Mendoza *et al.*, 1977). Discordants sur ce substrat cristallin on rencontre localement des sédiments arénacés tectonisés et métamorphisés d'âge Précambrien-C appelés Métasédiments (Mendoza *et al.*, 1977) ou Grupo Tunuí (Projeto Radambrasil, 1976), disposés en longues crêtes anticlinales très arquées ou en écailles synclinales asymétriques.

Cette région est une vaste pénéplaine encore appelée « pediplano Rio Branco-Rio Negro » (Projeto Radambrasil, 1976). Son niveau le plus bas (65 m) se situe au Venezuela au pied des contreforts du Roraima. Il se relève vers l'Ouest jusque 140 m à Iauareté et en Colombie. Sur ce vieux bouclier les reliefs se réduisent à des inselbergs granitiques, restes de surfaces plus hautes, et des crêtes quartzitiques de Métasédiments dominant des champs de collines convexes séparés par d'immenses zones planes. Les phénomènes de capture et les brusques changements de direction des cours d'eau sont autant de marques d'une tectonique récente mettant en jeu des structures faillées.

MATERIELS ET METHODES

Méthode de cartographie

Une carte des couvertures pédologiques du bassin du Rio Negro à 1/500 000 a été dressée par interprétation visuelle de mosaïques d'images Radar-SLAR à 1/250 000 (Projeto Radambrasil, 1976; Atlas del Inventario de Tierras del Territorio Federal Amazonas, 1987) et d'agrandissements photographiques d'images Landsat canal 7 à la même échelle (négatifs obtenus auprès de l'Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brésil). L'interprétation s'appuie sur les données de l'inventaire des terres réalisé au Venezuela et des études pédologiques plus localisées et plus détaillées réalisées à San Carlos de Rio Negro et à Maroa au Venezuela (Dubroeuq *et al.*, 1981; 1987) et des reconnaissances sur le terrain faites au Brésil dans la région du Uaupés et du Iauari et dans la région de São Gabriel de 1985 à 1986.

Les résultats de l'interprétation ont été digitalisés et traités par infographie (Faure et Bénizri, 1988).

Les unités cartographiques

Chaque unité cartographique correspond à l'association d'un type de modelé, identifiable sur les images radar, et d'une couverture pédologique caractérisée par un assemblage de sols. A chaque sol correspond généralement un type de végétation reconnu par une texture spécifique des images radar et/ou Landsat (voir le glossaire des types de végétation à la fin du texte).

Un exemple de profil est donné pour la plupart des sols de la région. Les horizons ont été nommés par ressemblance avec des horizons de référence observés et définis au cours de travaux antérieurs (Atlas del Inventario de Tierras, 1987). Une liste de ces horizons de référence avec leur brève description est donnée en fin de texte.

La nomenclature des sols qui figure entre parenthèses dans le texte et les profils en annexe est celle de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1998). Une correspondance avec le WRB

Figure 2 - Carte générale du bassin du Rio Negro.

Figure 2 - Map of the Rio Negro basin.

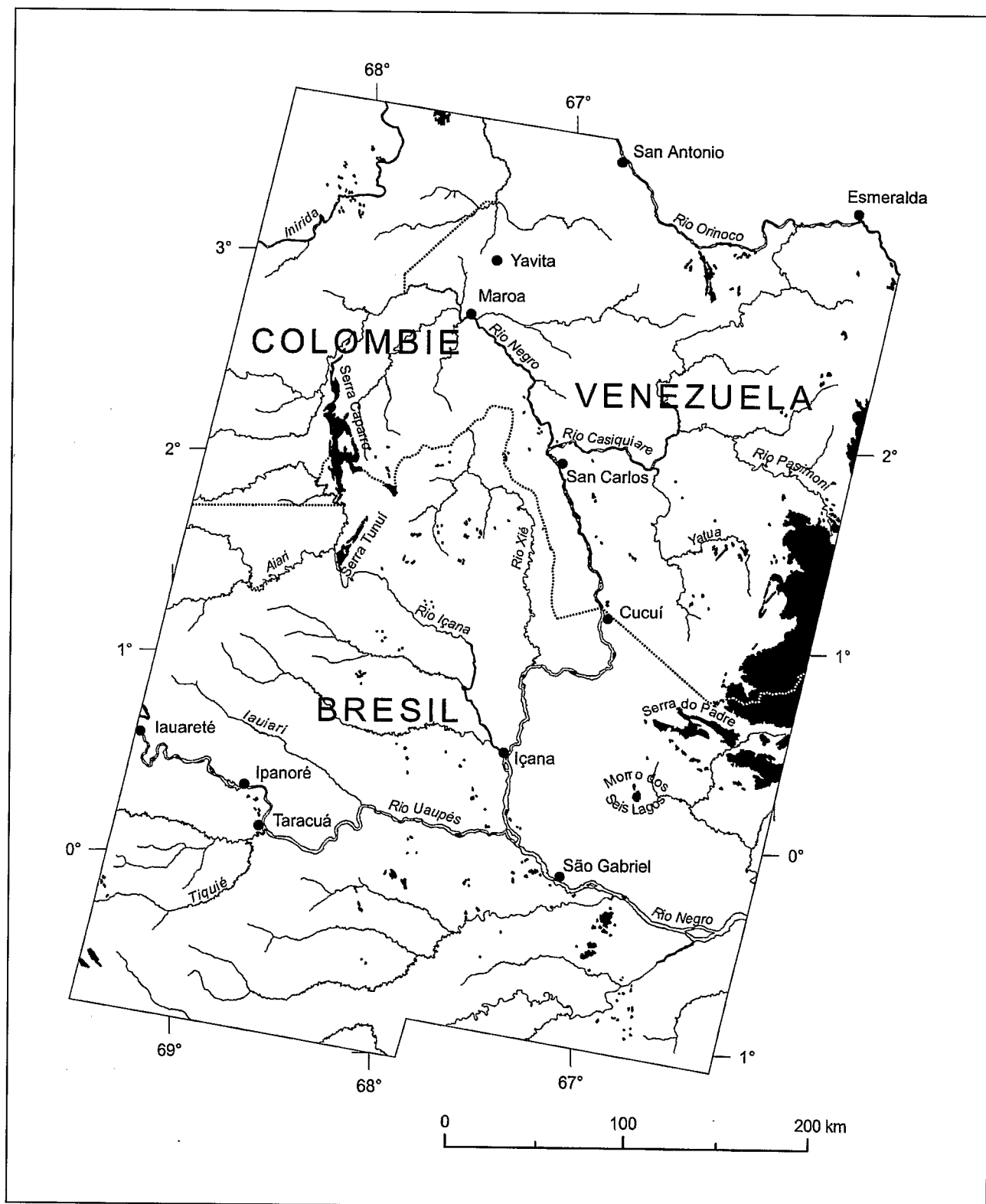
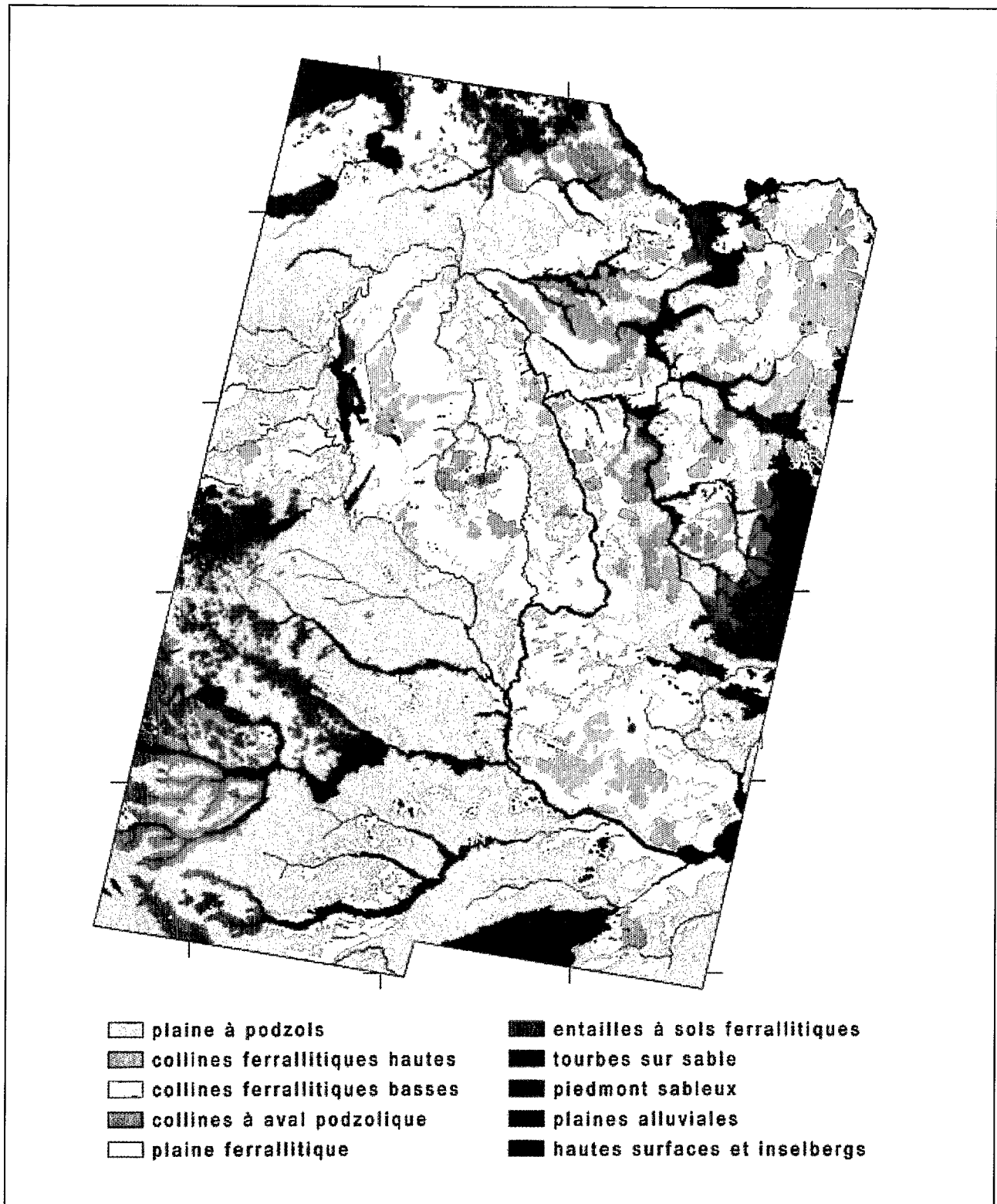


Figure 3 - Carte des couvertures pédologiques du bassin du Rio Negro.

Figure 3 - Soil and geomorphic map of the Rio Negro basin.



(ISSS-ISRIC-FAO, 1998) a également été faite (Tableau 1). Compte tenu du contexte dans lequel a été réalisée cette étude les correspondances ne peuvent être établies en toute rigueur. En ce qui concerne certains sols, les podzols notamment, les équivalences proposées entre les dénominations ne doivent donc être considérées que comme des approximations.

Les systèmes de sols sont décrits par des coupes topographiques en séquences de fosses et de sondages. Dans un cas (figure 5) la structure en coupe de la couverture pédologique est présentée par extrapolation de la limite des horizons d'un profil de sol à l'autre.

Les analyses au laboratoire

- Observation en microscopie optique de lames minces d'échantillons de sol non perturbé prélevés dans les fosses pédologiques.

- Analyse granulométrique de la fraction < 2 mm (dispersion hexamétophosphate, méthode pipette).

- Analyses chimiques conventionnelles :

pH eau 1/5, pH CaCl₂ 1/5 sur les profils du Venezuela; pH eau et pH KCl 1/2,5 sur les profils du Brésil;

capacité d'échange (CEC) : acétate d'ammonium 1N pH 7;

acidité d'échange : Chlorure de Ba 0,5N-triéthanolamine 0,05 N, titration par HCl 0,2N et KCl 1N;

Aluminium échangeable (Al éch.) : KCl 1N, titration HCl 0,1N;

Bases échangeables : acétate d'ammonium 1N pH 7, photométrie d'absorption (Ca Mg), photométrie de flamme (Na et K);

Carbone organique.

- Analyses minéralogiques par DRX sur la fraction < 20 µm et < 2 µm;

- Analyse totale des fractions < 2 mm par attaque triacide;

- Estimation semi-quantitative de certains minéraux à partir des analyses totales et des analyses minéralogiques;

- Extraction chimique des oxydes de Fe, Al et Si amorphes, complexés et libres (Mehra and Jackson, 1960; Jeanroy, 1983) et dosage par spectrométrie ICP;

- Séparation des fractions fines des horizons albiques de podzols par ultracentrifugation et observation au MET des dépôts sur grille.

RESULTATS

La plaine à podzols constitue l'ensemble le plus caractéristique de la région, par son étendue et par l'originalité de ses sols. Elle est dominée par des reliefs plus ou moins élevés comportant une couverture de sols ferrallitiques. Par endroit ces reliefs se fondent pour donner une plaine à sols ferrallitiques difficilement discernable topographiquement de la plaine à podzols (figure 3). Des niveaux les plus hauts vers les plus bas, on distingue 10 unités morpho-pédologiques dont les traits essentiels sont les suivants :

■ Les hautes surfaces et les inselbergs

Les hautes surfaces granitiques et quartzitiques (formation Roraima) constituent les reliefs de la bordure Est de la zone cartographiée. Leur altitude atteint 2000 m (elle culmine au Pico da Neblina à 3014 m). On y trouve des sols ferrallitiques et des bauxites (Dubroeuq *et al.* 1988).

Les Métasédiments Précambriens quartzitiques (Serra Caparro et Serra Tunuí) n'ont que des sols squelettiques, tout comme la multitude d'inselbergs disséminés sur l'ensemble de la plaine à podzols et de la plaine à sols ferrallitiques.

A signaler le Morro dos Seis Lagos, massif de carbonatite au Nord de São Gabriel da Cachoeira, totalement altéré, qui comporte une cuirasse ferrugineuse de 150 m d'épaisseur (Projeto Radambrasil, 1976).

■ Les piedmonts sableux

Ce sont de larges glacis sableux à très faible pente que l'on trouve au pied des reliefs quartzitiques des Métasédiments et des reliefs gréseux

Tableau 1 - Correspondants dans la World Référence Base (WRB) des termes de l'US Taxonomy utilisés dans le texte.

Table 1 - World Reference Base (WRB) equivalents of the US Taxonomy terms used in the text.

US TAXONOMY (Soil Survey Staff, 1998) WRB (ISSS-ISRIC-FAO, 1998)	
Typic Haploperox	Haplic Ferralsol
« Clayey Skeletal » Typic Haploperox	« Skeletic » Haplic Ferralsol
Xanthic Acroperox	Xanthic Ferralsol
Acrudoxic Kandiodult	Geric Acrisol
« Clayey Skeletal » Acrudoxic Kandiodult	« Skeletic » Geric Acrisol
Arenic Plinthic Kandiaquilt	Plinthic Acrisol
Typic Albaquilt	Albic Planosol
Grossarenic Alorthod	Haplic Podzol
Ultic Alaquod	Carbic Podzol
Histic Alaquod	Histic Podzol
Typic Quartzipsamment	Albic Arenosol
Hydric Haplofibrist	Fibrihistic Histosol
Hemic Haplosaprist	Sapric Histosol
Fluvaquentic Humaquept	Gleyic/Dystric Fluvisol

du Roraima. La végétation est un bush d'arbustes sclérophylles de type « caatinga amazônica ». Les sols sont des podzols humiques sans alios, développés dans les sables. Ils peuvent comporter, dans les zones où la végétation est la plus dense, une accumulation organique en surface, un horizon albique, un horizon spodique puis un horizon sablo-limoneux à faible profondeur (Histic Alaquod).

■ Les collines hautes à sols ferrallitiques

Cette unité est constituée de massifs de collines convexes juxtaposées, disposés sur les hauts de la pénéplaine. Elle fait partie d'un niveau d'aplanissement qui a déjà été répertorié comme « surface polyconvexe inférieure » (Gavaud *et al.*, 1986). L'altitude absolue de cette unité, prise au sommet des reliefs, s'échelonne de 95 m dans la région centrale du bassin, à 160 m vers l'Est lorsqu'on approche des escarpements qui marquent le pourtour des reliefs du massif guyanais. Des affleurements rocheux peuvent exister sur les reliefs culminants du massif de collines. On observe également souvent des affleurements de boulders rocheux en bordure des talwegs.

Une coupe dans une colline sur embréchite feldspathique à San Simon de Cocuy, Venezuela, est essentiellement constituée d'une épaisse saprolite argileuse blanche à taches micacées lithorélictuelles rouge vif. La roche saine n'est pas atteinte à 20 m de profondeur qui est le niveau du talweg intercollinaire (*Profil 1 en annexe*).

Lorsque la roche-mère est pauvre en feldspaths, comme dans le cas des gneiss, le manteau d'altération est une arène quartzo-micacée friable, riche en petits nodules gibbsitiques (*Profil 2 en annexe*).

En dépit des variations dues à la lithologie, qui apparaissent nettement dans les horizons d'altération, les profils conservent une morphologie et une minéralogie relativement constantes. Il s'agit de sols ferrallitiques fortement désaturés de couleur jaune-rouge (Typic Haploperox). Ce sont toujours des sols très profonds avec 3 à 5 m d'horizons meubles au-dessus du manteau d'altération régolithique ou saprolitique. La minéralogie du sol ferrallitique résulte de la disparition de presque tous les minéraux primaires excepté le quartz, la muscovite et quelques feldspaths, et de l'apparition de minéraux secondaires, essentiellement kaolinite, gibbsite et goéthite alumineuse. On trouve également de la vermiculite alumineuse dans les horizons de surface et de l'hématite dans les horizons rouges profonds. Les nodules gibbsitiques lithorélictuels sont extrêmement fréquents au sommet du manteau d'altération.

Sur une même colline convexe les différenciations de la couverture pédologique sont peu marquées. On note, en sommet, l'apparition de nodules ferro-alumineux dans les horizons rouges et, en bas du versant convexe, on observe un épaississement des horizons jaunes, la transformation de l'horizon tacheté (plinthite) en horizon à pseudogley et le blanchiment de

l'altérite. Le bas de pente est caractérisé par un sol jaune-gris à taches d'hydromorphie sur un horizon de saprolite blanche.

■ Les collines basses à sols ferrallitiques

Cette unité se compose d'une juxtaposition de collines aplanies de faible hauteur, inférieure à 30 m et le plus souvent de 10 à 15 m, souvent regroupées autour d'une colline rocheuse. Les plus hautes ont des formes proches des demi-oranges. Les plus basses sont très aplanies avec des contours très irréguliers. Les altitudes absolues varient de 80 m à 140 m. Les altitudes les plus basses se rencontrent aux abords des fleuves et les plus hautes à proximité des massifs de collines convexes.

Le sol du replat sommital est un sol ferrallitique fortement désaturé, appauvri, à horizon nodulaire et à blocs de cuirasses (« Clayey Skeletal » Acrudoxic Kandioduit). Le profil se schématise de haut en bas par la succession des horizons suivants :

- « Umbrique » brun foncé, à matière organique abondante ;
- « Eluvié » jaune pâle, sablo-argileux, à nodules gibbsitiques abondants ;
- « Oxique » jaune, sablo-argileux à nodules ;
- « Plinthite » argilo-sableux à taches brun-rouge ;
- « Saprolite » bigarrée, massive, argilo-sableuse.

L'horizon d'argile tachetée (plinthite) est souvent absent. Le contraste textural est marqué entre l'horizon oxique jaune nodulaire sablo-argileux et la saprolite massive argilo-sableuse. Les horizons meubles sont constitués de kaolinite et gibbsite, d'un peu de micas et de vermiculite et très peu goéthite alumineuse. Les éléments grossiers (nodules et blocs de cuirasse) sont constitués de gibbsite (gibbsite > 70 %), quartz, boémite et hématite.

Sur le versant, au-delà du replat sommital, la séquence est analogue à celle qui a été décrite sur embréchite à deux micas, plus au sud entre Manaus et Boa Vista (Dubroeuq et Volkoff, 1998) :

- en haut de pente un sol ferrallitique jaune-rouge à horizon nodulaire (« Clayey Skeleta » Typic Haploperox) ;
- à mi pente un sol ferrallitique rouge (Typic Haploperox) où les nodules deviennent rares ;
- en bas de pente un sol hydromorphe lessivé à pseudogley (Arenic Plinthic Kandiaquilt) ;
- en aval un sol hydromorphe lessivé à horizon blanchi (Typic Albaquilt).

Il n'y a pas de podzols entre ces collines.

■ La plaine à sols ferrallitiques

Cette unité, encore nommée « plaine d'altération » (Gavaud *et al.*, 1986), se distribue dans la partie centrale et orientale du bassin. Les massifs de collines ferrallitiques y apparaissent comme des inclusions (*figure 3*). Les altitudes générales de

cette plaine varient de 75 à 80 m aux abords du Rio Negro et du Casiquiare et se relèvent à 100 m à proximité des reliefs quartzitiques (Serra Caparro, Serra Tunui) et aux abords des hautes surfaces à l'est de la zone.

Les sols y sont développés sur un matériau d'altération sablo-argileux, riche en quartz grossiers et en feldspaths altérés, dans lequel flottent des boules de roche dure. Dans la région de Maroa, Venezuela, ce regolithe est composé de 77 % de sable (constitué de 60 % de quartz, 25 % de micas, 10 % de feldspaths altérés, et 5 % de ferromagnésiens et oxydes), 14 % de limons et 9 % d'argile constituée majoritairement de gibbsite, quartz fin, kaolinite, avec très peu d'illite et d'oxydes de fer probablement à l'état amorphe.

Le sol a 2 ou 3 m d'épaisseur et comporte en surface des horizons sablo-argileux épais et noirs (humique noir), puis gris-beige ou jaune (oxique), et enfin argileux, gris, à taches

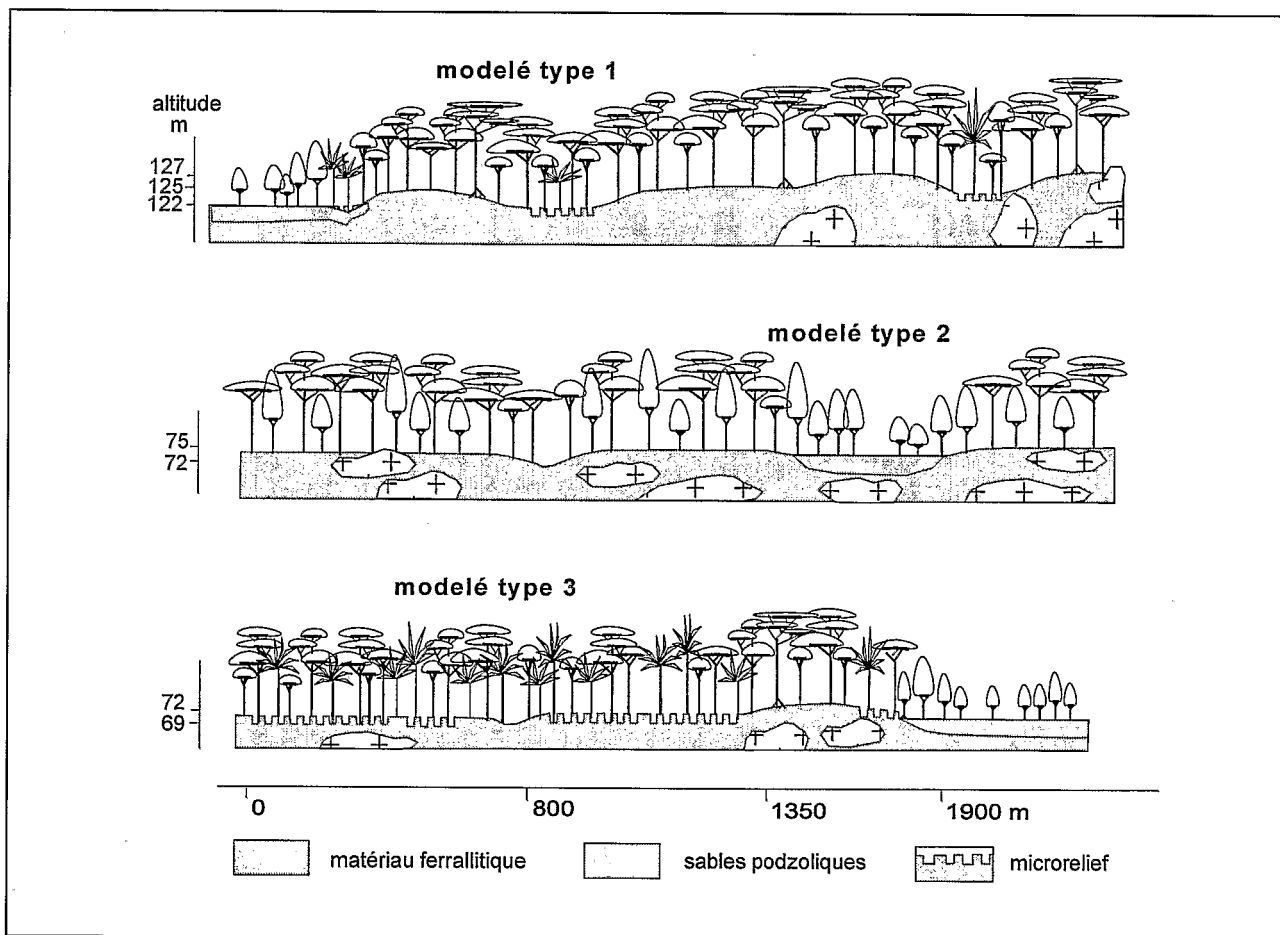
lithorélictuelles brunes (saprolite). Dans tout le profil les teneurs en gibbsite dans la fraction $< 2 \mu\text{m}$ sont élevées, souvent voisines de 50 %. Les horizons nodulaires sont absents.

La « plaine » ferrallitique présente, dans le détail, au moins trois types de modelés qui n'ont pas été cartographiés parce que les variations de la topographie et de l'aspect de la végétation sont peu discernables à l'échelle du document présenté. Ces trois types ont cependant été identifiés (figure 4). Ils traduisent trois stades d'abaissement de l'altitude générale et, corrélativement, du rapprochement des nappes vers la surface. Chacun comporte un sol modal différent.

Dans le premier type, on observe une succession de croupes très aplanies d'environ 5 m de dénivelée sous une végétation continue de forêt de terre ferme. Le pédon modal est un sol ferrallitique jaune (Xanthic Acroperox, Profil 3 en annexe).

Figure 4 - Les trois types de modelé de la plaine ferrallitique traduisent trois stades d'abaissement de la surface et, corrélativement, de la remontée des nappes.

Figure 4 - The three different landforms observed in the ferrallitic plain are three different stages of the land surface lowering and, consequently, of the uprise of the water-table.



Dans le deuxième type, le modelé est plat et les entailles des drains secondaires n'excèdent pas 2 m de profondeur. La végétation est une forêt haute sur sable (campinarana). Le sol dominant est un sol ferrallitique jaune lessivé (Acruodxic Kandudult, *Profil 4 en annexe*) qui se distingue du profil précédent par sa texture beaucoup moins argileuse, l'absence de plinthite et la diminution de l'épaisseur de la saprolite. Le plafond de la nappe apparaît vers 2 m de profondeur. Dans ces conditions de mauvais drainage l'horizon superficiel est épais et à matière organique noire, non liée à la matière minérale et à structure microagrégée (humique noir). On observe ni horizon blanchi ni horizon spodique.

Dans le troisième type, la végétation se rapproche de la forêt inondée par l'abondance des palmiers. La surface du sol, généralement des sols jaunes lessivés, est ciselée par des microreliefs en cuvettes le plus souvent anastomosées, appelées « zurros » au Venezuela et « zurrales » en Colombie. Ce sont des formes alvéolaires d'environ 1 m de profondeur et 3 m de diamètre, creusées dans le sol. Du sable grossier et des fragments d'altérite en tapissent le fond. Le remplissage de ces cuvettes est alimenté par la remontée de la nappe. Jusqu'à présent aucune coupe n'a pu donner une idée précise du fonctionnement et de la genèse de ce type de couverture.

Au milieu de la plaine ferrallitique des différenciations particulièrement tranchées peuvent apparaître sur de courtes distances, 50 m environ, et des dénivelées très faibles, de l'ordre du mètre. Ces différenciations sont toujours semblables et se manifestent quel que soit le faciès topographique de la plaine ferrallitique (type 1, 2 ou 3).

S'il s'agit de la plaine ferrallitique de type 1 (*figure 4*), elles conduisent à des séquences latérales développées sur une cinquantaine de m de distance et moins de 3 m de dénivelée et qui comportent (Dubroeuq et Volkoff, 1998) :

- en amont un sol ferrallitique jaune argileux (Xanthic Acroperox) ;
- à l'aval un podzol hydromorphe à alios (Ultic Alaquod, Profil 5 en annexe).

La coupe de cette séquence (*figure 5*) montre que les différences de végétation marquent parfaitement les limites entre les différents sols. Elle montre aussi que les horizons majeurs du sol ferrallitique (plinthite, oxiq et ochrique) s'amenuisent et finissent par disparaître pour donner un horizon albique entièrement sableux. Il s'agit non pas d'un contact mais d'une transformation latérale du sol ferrallitique. L'horizon albique qui pénètre dans le domaine ferrallitique a grossièrement l'aspect d'une langue bifide dont la branche supérieure est remontante et la branche inférieure plongeante. L'extrémité plongeante correspond au lieu de convergence des circulations internes des eaux de nappe qui remontent depuis les horizons profonds du sol ferrallitique vers l'horizon albique du podzol. En effet, la dis-

position des horizons très argileux de saprolite blanche hydromorphe est telle que la nappe des sols ferrallitiques se maintient en charge par rapport au niveau de la nappe dans les podzols. Les eaux excédentaires passent ensuite à la surface du podzol par l'intermédiaire des microreliefs en chenaux (Dubroeuq et Volkoff, 1998). L'horizon albique est donc un chenal pour les eaux du sol. La formation des podzols est dans ce cas directement induite par la circulation des eaux de la nappe.

S'il s'agit d'une plaine ferrallitique de type 2, la transition s'effectue sur une dizaine de m de distance et une dénivelée de 1 m et l'on passe d'un sol ferrallitique jaune lessivé à un podzol hydromorphe à alios. Dans celui-ci l'alios est à environ 1 m de profondeur, superposé à un horizon argilique gris-jaunâtre, très plastique, de 1 à 2 m d'épaisseur et dont la minéralogie est à kaolinite dominante, illite, gibbsite et quartz fin.

S'il s'agit d'une bordure de plaine ferrallitique de type 3, la transition latérale au podzol hydromorphe est encore plus courte.

■ Les collines à aval podzologique

Cette couverture mixte se compose de reliefs à sols ferrallitiques séparés par des zones sableuses à podzols. Du fait de la végétation de campina qui s'installe sur les podzols et de la forêt sur les collines, en vue aérienne les collines apparaissent sous forme de taches circulaires boisées nettement délimitées dont la distribution rappelle celle des collines convexes. Cette unité ne se rencontre que dans le quart nord-est de la carte (*figure 3*). Elle forme des ensembles isolés de forme arrondie au milieu de la plaine à podzols.

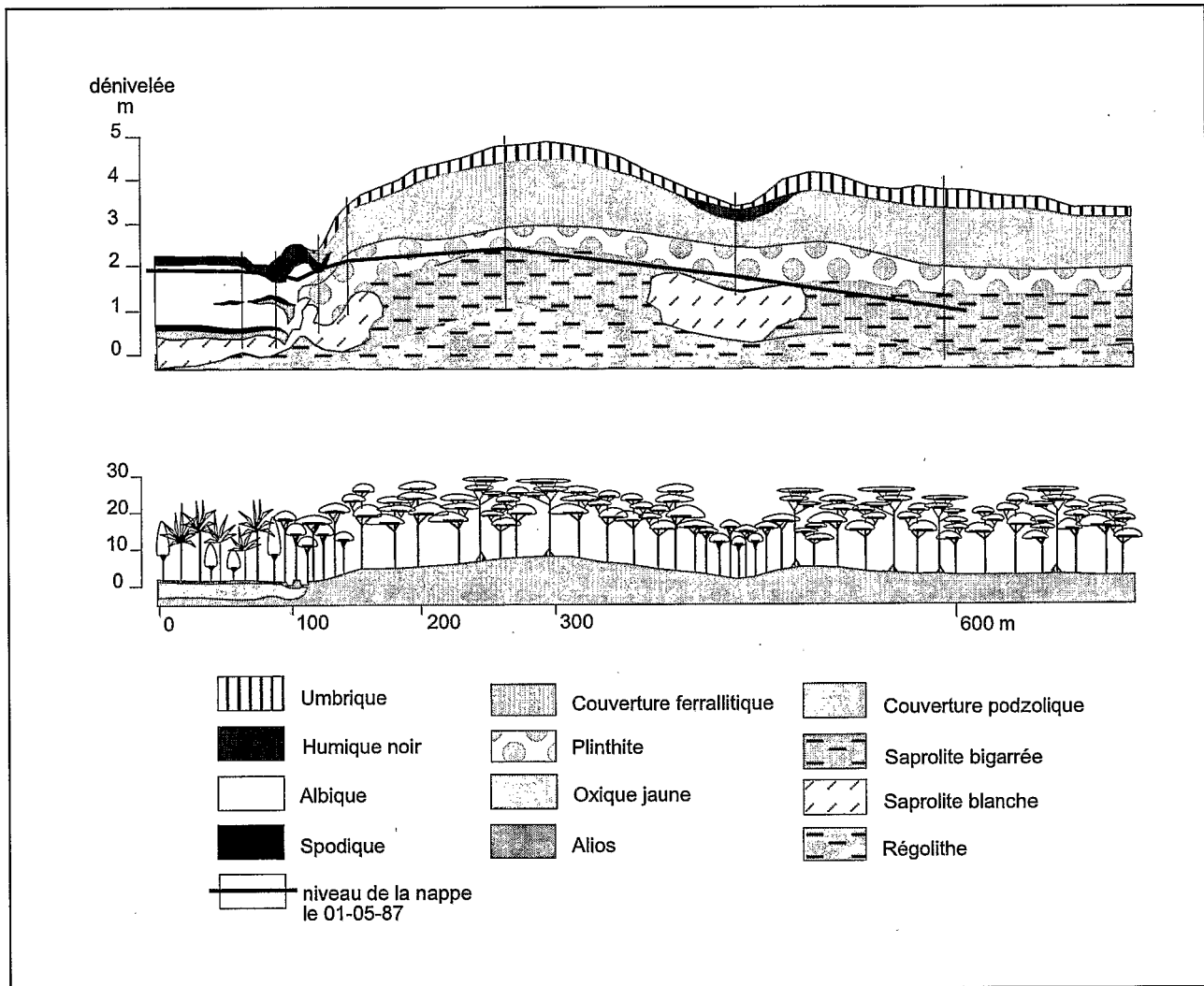
Sur le terrain ces collines se présentent toujours comme des reliefs très aplanis qui offrent tous les intergrades entre la colline de 10 à 15 m de haut au-dessus de la plaine sableuse et des élévations à peine marquées et entourées d'affleurements rocheux (*figure 6*). L'aval podzologique sableux est un plan horizontal qui cerne les reliefs ferrallitiques et qui en est séparé par une très légère dépression incisée par un microrelief de cuvettes et de chenaux.

Le sol ferrallitique du replat sommital de la colline est un sol à horizons éluviés sablo-argileux à nappes de nodules et de blocs ferro-alumineux analogues aux sols du replat sommital des collines basses. Il peut n'avoir qu'un mètre d'épaisseur sur une altérite tachetée. Il est alors dit « érodé ». Il peut présenter aussi un appauvrissement en argile plus marqué avec un horizon discontinu sableux gris ou beige qui apparaît en poches vers 40 cm de profondeur. Il est alors considéré comme « appauvri ». Ces caractéristiques sont lithodépendantes, les sols appauvris apparaissant sur des granites, les sols érodés plutôt sur des embréchites, moins riches en quartz.

Sur le versant, le passage du sol ferrallitique au podzol se fait sur une centaine de mètres avec une dénivelée d'une dizaine

Figure 5 - La coupe montre que les horizons majeurs du sol ferrallitique jaune s'amenuisent et finissent par disparaître pour donner un horizon albique. Il s'agit non pas d'un contact mais d'une transformation latérale du sol ferrallitique en podzol de nappe.

Figure 5 - The horizons of the yellow ferrallitic soil thin down into an albic horizon. This morphology depicts a lateral transformation rather than a contact between two different materials.



ne de mètres. Le podzol hydromorphe de l'aval comporte, sur 2 m de profondeur, un horizon albique, un horizon spodique (Bh) surmontant un alios (Bs) et un horizon de saprolite blanche en profondeur. L'horizon albique se développe de manière remontante le long du versant, aux dépens des horizons éluvies. Tandis que les horizons « oxiq. » du sol ferrallitique amont deviennent progressivement « éluvies » (Dubroeuq et Volkoff, 1998).

■ La plaine à podzols

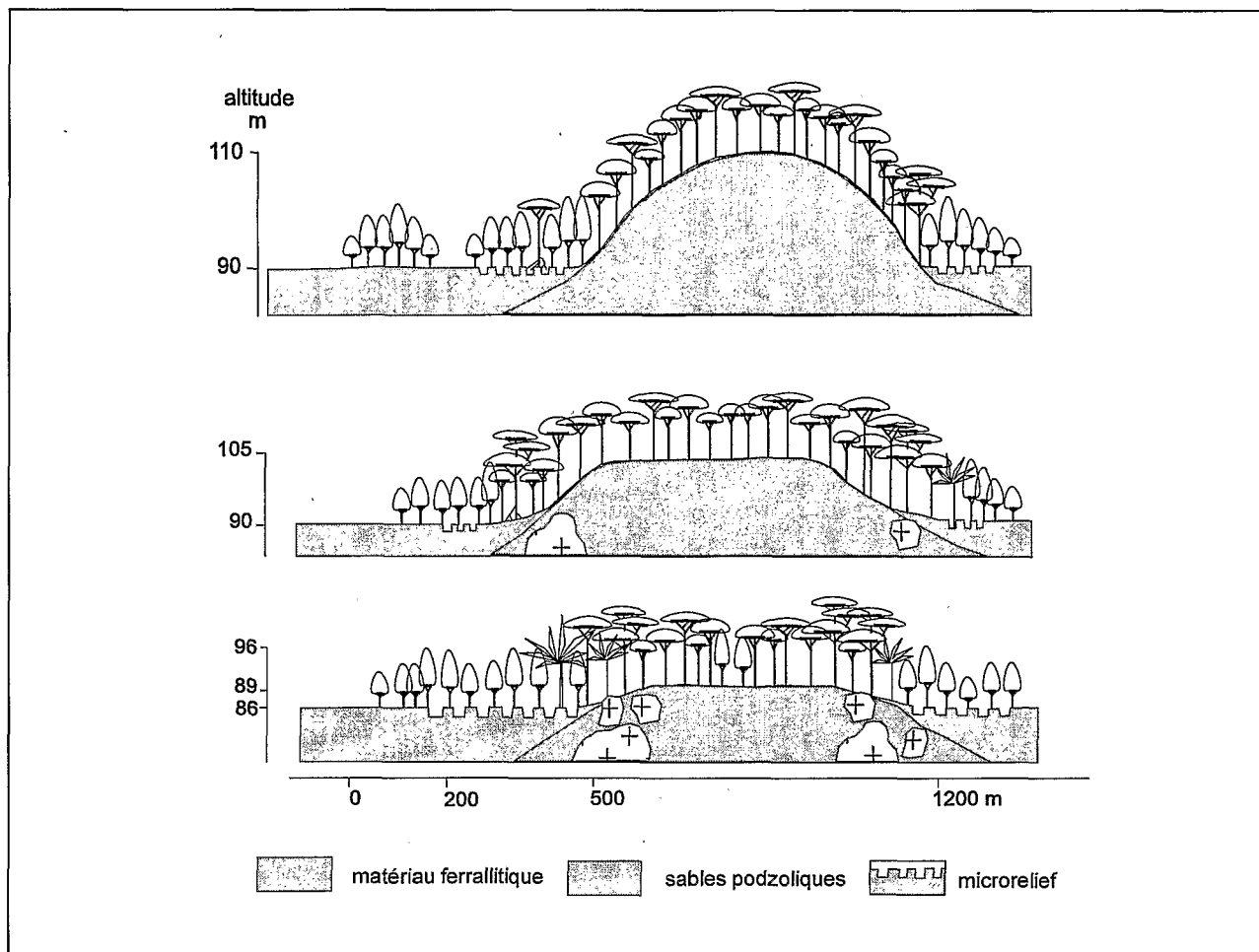
Il s'agit d'une surface très plate, encore nommée plaine d'érosion (Gavaud *et al.*, 1986), qui s'étend sur la majeure partie du

bassin. Elle est occupée par une végétation plus ou moins serrée d'arbustes sclérophylles, la « caatinga amazonica » laissant de larges plages de végétation très ouverte, la « campina » avec de petits secteurs de forêt haute sur sable (campinarana). Sa plus basse altitude se situe au centre du bassin (75 m à l'embouchure du rio Uaupés). Elle se relève vers l'ouest en un bas plateau (120 m à Ipanoré) qui atteint 140 m à la frontière colombienne. Au nord vers l'Orénoque (Maroa, San Antonio) l'altitude reste stable autour de 90 m.

Cette plaine est couverte de sables blancs non stratifiés qui correspondent à l'horizon albique de podzols dont les horizons spodiques se trouvent entre 2 et 10 m de profondeur.

Figure 6 - Les collines à aval podzolique montrent tous les stades intermédiaires entre la colline de 10 à 15 m de haut et une élévation à peine marquée au-dessus de la plaine sableuse. Ces stades résultent probablement d'une même évolution.

Figure 6 - The hills surrounded with white sand display all the intermediary stages between a convex hill 10 to 15 m high and a very flat mound. These stages are probably the result of a general evolution of the landscape.



Le modelé varie en fonction de l'altitude générale de la plaine à podzols. On distingue ainsi, pour des altitudes croissantes, 3 types de modelé : (1) une plaine inondable sans entailles, (2) un bas plateau peu entaillé avec des interfluves très amples, (3) un plateau profondément entaillé avec des interfluves courts de 1 000 à 1 500 m (figure 7).

Dans cet ensemble on rencontre deux types majeurs de podzol : soit un podzol hydromorphe à alios relativement peu profond (Ultic Alaquod), soit un podzol géant (Typic Quartzipsamment).

Le premier type (Ultic Alaquod, Profil 6 en annexe) porte généralement une végétation de « caatinga amazonica ». Il présente un alios à 1,50 m de profondeur et, immédiatement en-dessous jusque 3 m de profondeur environ, un horizon

« argilique » gris très massif. L'horizon albiq est exclusivement quartzueux avec moins de 3 % de fraction fine constituée de kaolinite et de micas. Dans l'horizon argilique on note une nette augmentation de la fraction limons fins (25 %) et argile (20 %). La minéralogie de la fraction < 20 µm indique qu'il s'agit de quartz fin et de kaolinite bien cristallisée associée à un peu d'illite et des traces de micas. En microscopie électronique l'argile apparaît en feuillets bien développés, pseudo-hexagonaux, de 1 à 1,5 µm de diamètre et attribués à des kaolinites néoformées.

Dans le podzol géant (Typic Quartzipsamment, Profil 7 en annexe) qui se trouve généralement sous une végétation de « campina » l'alios apparaît entre 4 et 6 m de profondeur, parfois plus. Il se compose de plusieurs niveaux indurés

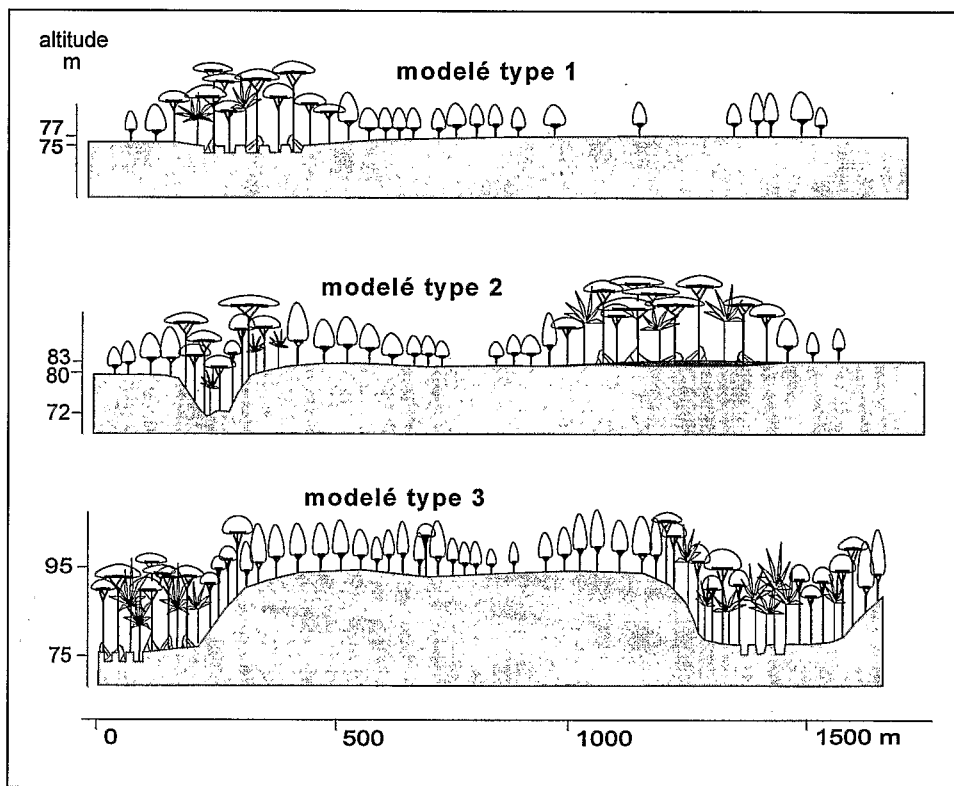


Figure 7 - On distingue trois types de modelé pour des altitudes croissantes de la plaine à podzols : une plaine inondable sans entailles (en haut), un bas plateau peu entaillé (au milieu), un plateau très entaillé avec des interfluves courts (en bas).

Figure 7 - With increasing elevations of the podzol plain three different landforms are observed : a flat, seasonally flooded plain (top), a low plateau (center), a plateau with deep river cuts and narrow interfluves (bottom).

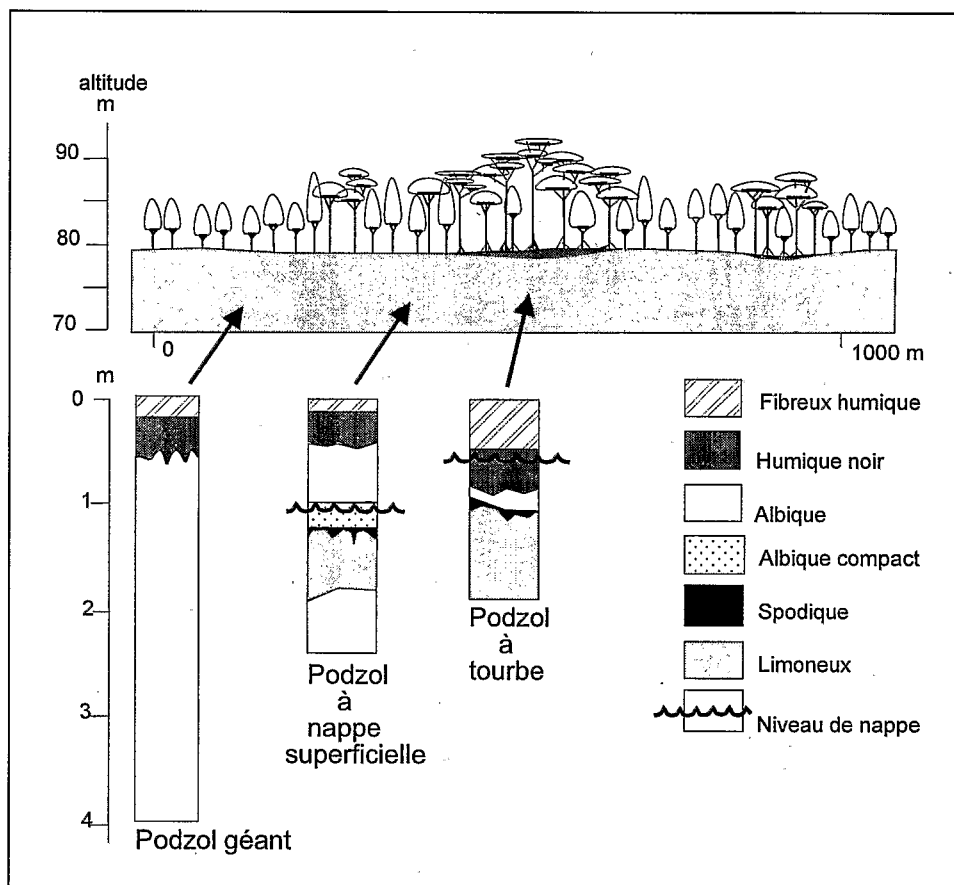


Figure 8 - Lorsqu'on passe du podzol géant au podzol à nappe superficielle, un horizon sablo-limoneux compact s'intercale dans la couche sableuse, au-dessus duquel se maintient la nappe.

Figure 8 - The horizons of the yellow ferralitic soil thin down into an albic horizon. This morphology depicts a lateral transformation rather than a contact between two different materials.

superposés, de couleur brun sombre, à sables grossiers. L'ensemble atteint 1 à 2 m d'épaisseur. L'analyse de la fraction $< 2 \mu\text{m}$ des horizons albiques de podzols géants de la région du Uaupés, Brésil, indique la présence de quartz ultrafins, de micas très fragmentés et de gels de silice partiellement condensés en particules sphériques de 10 à 15 nanomètres (Dubroeuq et Volkoff, 1988). On peut y trouver des restes de racines. Une entaille de berge du Uaupés dans les podzols montre 3 à 4 m de sables blancs au-dessus d'un horizon discontinu brun sombre de 1 à 2 m d'épaisseur, composé de bandes indurées constituées de sables grossiers dans un ciment brun. Dans les berges des fleuves (Uaupés, Tiquié) cet horizon a été décrit comme une arénite faiblement consolidée (Projeto Radambrasil, 1976).

Dans les zones à podzols géants, la nappe, tout en étant très fluctuante, paraît se maintenir à grande profondeur. Par endroits cependant elle reste superficielle. La végétation devient alors une forêt sur tourbe (*figure 8*). Le sol tourbeux en surface (Histic Alaquod, *Profil 8 en annexe*) comporte un horizon spodique et un horizon « limoneux » intercalés dans la couche sableuse. L'horizon spodique est formé de matière organique et de quartz ultrafins. Les faibles quantités d'argile de l'horizon limoneux proviennent de l'altération des micas résiduels en vermiculite (Dubroeuq et Volkoff, 1988).

On ne sait pas s'il y a des relations génétiques directes entre les podzols géants et les podzols hydromorphes à alios peu profond. On a pu simplement établir que le type de podzol est lié à un type de modelé. Les podzols géants les plus profonds se rencontrent sur les plateaux profondément entaillés avec des interfluves courts (*figure 7*), alors que les plaines inondables de faible altitude et sans entaille (*figure 7*) présen-

tent des podzols moins profonds. Dans tous les types de modelé le podzol hydromorphe à alios peu profond est caractéristique des bordures en contact avec des couvertures ferrallitiques, alors que les podzols géants occupent la partie centrale des plaines. Il y aurait donc probablement une augmentation de l'épaisseur des sables blancs depuis les bords vers le centre des plaines à podzols.

Les entailles à sols ferrallitiques

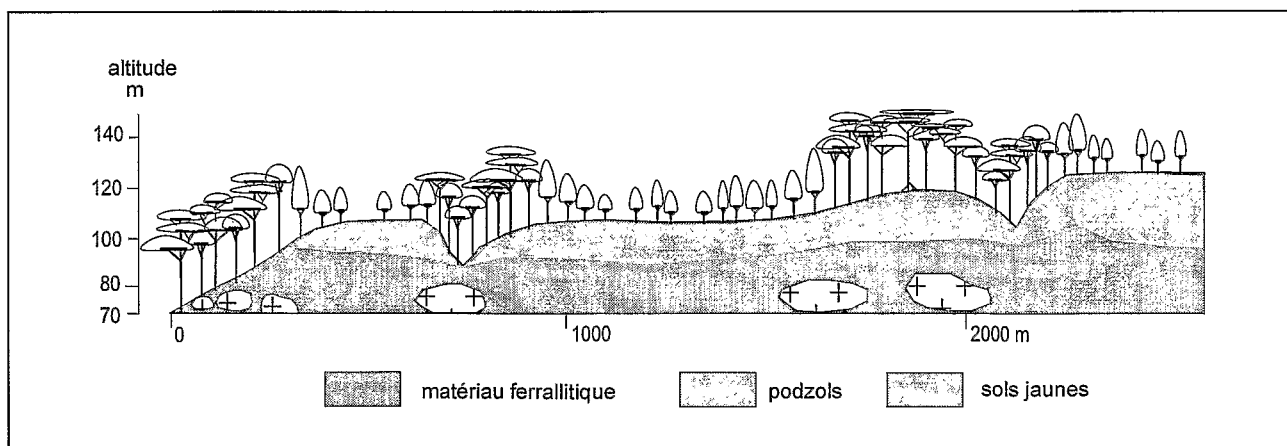
Cette unité désigne les versants des entailles qui recoupent le plateau à podzols, dans les secteurs où la surface podzolisée est la plus relevée comme à l'ouest du bassin en Colombie. Ces entailles se composent de reliefs étagés qui forment une surface de raccordement entre le talweg principal et le plateau couvert de podzols géants. Chaque relief présente un sommet arrondi, un replat faiblement incliné légèrement concave et des versants à forte pente, plus courts à l'amont qu'à l'aval (*figure 9*). Des podzols (Grossarenic Alorthod) couvrent les replats. Des sols ferrallitiques jaunes sablo-argileux (Xanthic Acrudox) couvrent la convexité sommitale et des sols ferrallitiques jaune-rouges et argileux les versants.

Les sols ferrallitiques des versants (Typic Haploperox, *Profil 9 en annexe*) sont peu profonds, avec l'altération saprolitique à moins de 2 m de profondeur. Des boules de roche altérée apparaissent en bas de pente, près des cours d'eau.

En remontant le versant, le passage au podzol du replat se fait sur une très courte distance de 5 m environ. A Ipanoré, Brésil, on observe d'abord un mince horizon brunâtre recouvrant la limite supérieure de l'altération saprolitique alors que disparaissent les horizons oxiqes argileux. Puis quelques mètres en amont, un horizon de sable blanc apparaît au-dessus de l'horizon brunâtre.

Figure 9 - Les entailles à sols ferrallitiques forment un glacis de raccordement polyconvexe entre le plateau à podzols géants et le lit de la rivière. Ce glacis aurait évolué ensuite sous l'effet d'une podzolisation récente.

Figure 9 - The valley side with ferrallitic soils is a gently sloping polyconvex surface joining the plateau covered with giant podzols to the river bed. This surface has then evolved under the effect of a later episode of podzolization.



Le podzol du replat (Grossarenic Alorthod) se caractérise par 2 à 3 m d'horizon albique quartzeux, par un horizon spodique mince en langues et en festons pénétrant dans un matériau régalithique. Il ne présente ni alios, ni horizon argilique. Ce type de podzol n'a été décrit que dans ces situations. On peut supposer que, du fait de la légère pente du replat sommital, il n'y a pas d'engorgement de nappe à faible profondeur comme dans les situations vues précédemment.

Le sol ferrallitique de la convexité sommitale est jaune, sablo-argileux (Xanthic Acroperox) et le passage au podzol du replat est plus progressif et fait intervenir un sol sableux jaune intermédiaire. Cette transition peut être rapprochée de celle qui a été décrite en détail le long d'un glacier de raccordement au pied des plateaux ferrallitiques sur formation Barreiras non loin de Manaus, Brésil, par Lucas *et al.*, (1984, 1987).

■ Les tourbes sur sable

Les tourbes se développent dans les sables podzoliques sous un type particulier de forêt et lorsque la nappe est proche de la surface. L'horizon « fibreux humique » est un horizon forestier spécifique de ce type de milieu. Il se compose d'un feutrage de racines vivantes retenant la litière en voie de décomposition et comportant de fins agrégats organiques. Il est acide mais contient cependant des quantités appréciables de P et de Mg et K échangeables. Cet horizon agit à la manière d'un filtre vivant qui retient les débris organiques et en concentre les éléments nutritifs (Klinge *et al.*, 1977; Herrera *et al.*, 1978; Jordan et Herrera, 1981). L'horizon « humique noir » directement sous-jacent est par contre plus acide (pH < 4), il ne comporte plus que de l'hydrogène et de l'aluminium échangeables (2 à 3 cmol(+)/kg de Al³⁺+ H⁺).

Des variations à l'échelle du microrelief permettent de distinguer trois types de modelé qui correspondent à trois phases du développement d'un réseau de drainage secondaire sur le plateau podzolisé sous l'effet de l'expansion de la couverture tourbeuse (*figure 10*).

Dans les zones tourbeuses de faible extension le pédon modal est la tourbe sur sable (Hydric Haplofibrist, *Profil 10 en annexe*). Sa morphologie, voisine de celle du podzol géant à nappe superficielle, n'en diffère que par l'épaisseur des épépédons organiques : 30 à 60 cm constitués de racines enchevêtrées (hz. fibreux humique) puis d'un moder sableux (hz. humique noir). Plus profondément on passe, après un mince horizon spodique, à un horizon massif sablo-limoneux. L'alios du podzol géant existe sous cet ensemble à une profondeur variant entre 3 et 6 m.

Dans certaines zones étendues de forêt sur tourbe comme au Nord et à l'Ouest du bassin, la surface de l'interfluve n'est plus plane mais nettement déprimée et couverte dans son ensemble par des microreliefs en cuvettes et en chenaux anastomosés (*figure 10*). La nappe est partout superficielle et le sol modal est un sol hydromorphe minéral à horizon blanchi

(Typic Albaquilt, *Profil 11 en annexe*). Sur ce type de sol les accumulations de matière organique se réduisent à 10 ou 20 cm d'horizon fibreux constitué de racines enchevêtrées et de débris végétaux. La végétation reste une forêt inondée avec des palmiers et des arbres de grande taille.

L'horizon argilique de ce type de sol hydromorphe correspond par sa minéralogie au plancher argileux des podzols hydromorphes à alios (essentiellement quartz, kaolinite et gibbsite, un peu d'illite, pas de vermiculite). La morphologie en poches et en chenaux des horizons éluviés blanchis semble due à une circulation latérale subsuperficielle intense des eaux de nappe.

Considérant les variations du microrelief et de la topographie des zones tourbeuses (*figure 10*), les différents types de situation peuvent être attribués à différentes étapes de l'expansion de la couverture tourbeuse dans la plaine à podzols. Une tourbe sur sable se forme d'abord au centre de la plaine, puis au fur et à mesure de son expansion, elle diminue en épaisseur et se recreuse de chenaux par effet du rapprochement des nappes vers la surface.

■ Les plaines alluviales

Ce sont des alternances de zones planes en terrasses emboîtées et de zones marécageuses. Les basses terrasses sont couvertes de microreliefs en rides et en chenaux saisonnièrement inondés. Les sols sont argileux à kaolinite et présentent des taches de réduction dans l'ensemble du profil (Fluvaquentic Humaquepts). Les zones marécageuses sont couvertes de forêt inondée et présentent des accumulations importantes de vase organique. Celle-ci provient de la sédimentation minérale et organique des eaux de crue qui semble être spécifiquement captée par la forêt inondée (Chauvel *et al.*, 1996).

Dans les bassins marécageux des rivières Pasimoni et Yatua au Venezuela, qui sont des régions semi-endoréiques de très basse altitude (65 m) au pied de massifs montagneux, les accumulations organiques atteignent une si grande épaisseur que le substrat n'est plus visible à deux mètres de profondeur. Ce sont des tourbes marécageuses (Hemic Haplosaprist). Sous l'horizon racinaire fibreux de surface (40 cm d'épaisseur environ) l'horizon tourbeux proprement dit apparaît sur plus de 1,50 m d'épaisseur. Il est noir, gras à consistance pâteuse, et très acide (pH 3,5). L'eau est partout présente dès la surface et la végétation est une forêt inondée avec des arbres élancés à fût large et à cime étroite pouvant atteindre plus de 30 m de haut, parmi lesquels dominent les genres *Ambelania* et *Malouetia* avec quelques palmiers du genre *Astrocaryum*. Des convergences de caractères comme l'acidité, l'hygroscopicité du matériau, l'odeur d'anhydride sulfureux, les rapprochent de certaines mangroves. Ce milieu est encore peu connu.

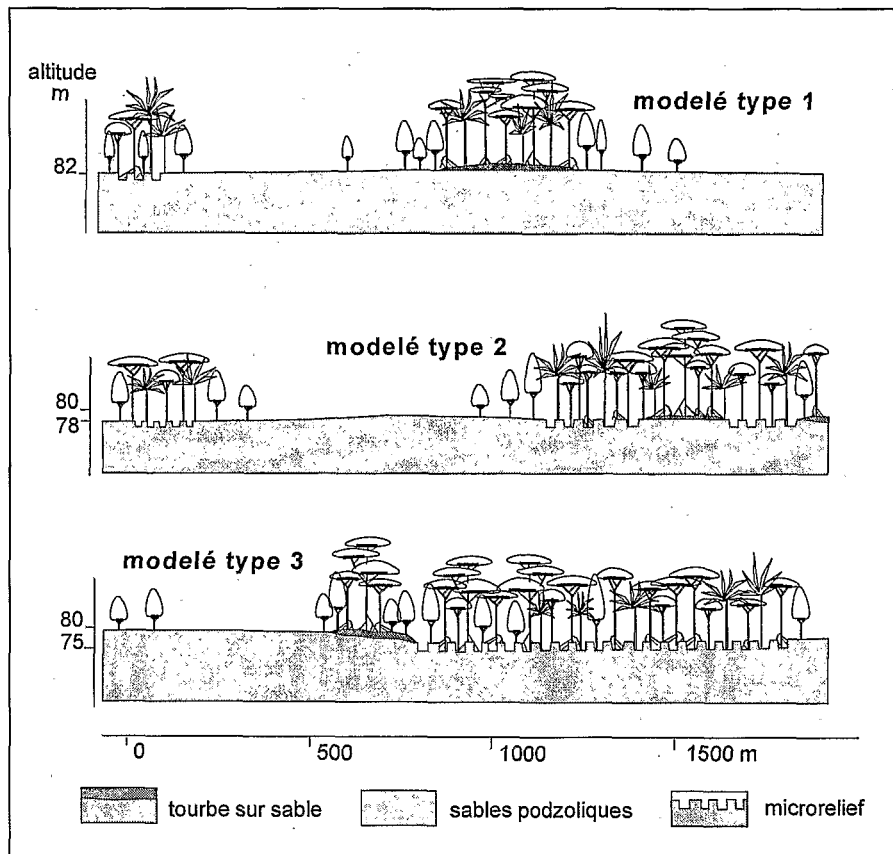


Figure 10 - Les trois types de modelé des zones tourbeuses correspondent à trois phases de développement d'une cuvette avec un réseau de chenaux superficiels sur le plateau à podzols.

Figure 10 - The three different types of peat zones correspond to the development of a depressed area in the middle of the low plateau covered with white sand.

DISCUSSION ET INTERPRETATIONS

Relations spatiales entre les couvertures

La plaine à podzols est l'unité principale de la zone cartographiée. Elle est présente dans tous les secteurs. Elle constitue un fond général d'où émergent les couvertures ferrallitiques. La plaine à sols ferrallitiques est la seconde unité la mieux représentée. Elle est toujours au contact de la plaine à podzols qu'elle domine de quelques mètres seulement. Les collines basses apparaissent comme des inclusions au milieu de la plaine à sols ferrallitiques et les collines ferrallitiques hautes sont des inclusions à l'intérieur des zones de collines ferrallitiques basses.

Les collines basses directement au contact de la plaine à podzols forment une unité particulière que nous avons appelé collines (basses) à aval podzolique. Elles sont localisées dans la partie Est de la carte où l'on rencontre les plus basses altitudes et une situation de graben le long de fractures parallèles suivies par le rio Negro et le rio Xié.

Les zones à tourbes sur sable se rencontrent dans des zones déprimées de la plaine à podzols et des lambeaux de sols ferrallitiques persistent sur les bords de la plaine à podzols le long des rivières.

Il y a donc une disposition séquentielle des couvertures pédologiques. Les séquences suivent une logique d'altitude. Cet arrangement spatial qui apparaît à l'observation de la carte est d'ailleurs confirmé par l'analyse géostatistique (Grezybyck et Dubroeuq, 1994). Cette disposition correspond également à une logique pédologique si l'on considère les sols de chacune des unités.

Caractères généraux des couvertures ferrallitiques

La plaine, les collines basses de transition et les reliefs convexes élevés, tous couverts de sols ferrallitiques, font penser à une évolution continue par enfoncement vertical par altération ou « etchplanation » (Thomas, 1994).

Il est probable que la couverture ferrallitique a été bauxitisée et cuirassée à un moment donné de son évolution. En effet les sols des collines convexes et en particulier ceux des collines basses contiennent des nodules ferro-alumineux, souvent aussi des blocs de cuirasse bauxitique à gibbsite et boehmite. On peut donc supposer que ce sont les restes des parties les plus indurée de l'ancienne couverture. Ces reliques seraient à rapprocher des couvertures bauxitiques voisines décrites sur les hautes surfaces guyanaises (Dubroeuq *et al.*, 1988). Mais,

curieusement, les nappes de nodules sont absentes dans les sols de la plaine ferrallitique. La plaine pourrait correspondre alors aux parties du paysage qui n'auraient été originellement que peu ou pas cuirassées.

L'enfoncement a été considérable comme le révèlent les inselbergs d'altitudes variables mais pouvant dépasser 200 m (Projeto Radambrasil, 1976) largement disséminés dans toute la plaine. L'abaissement de la surface du sol a ainsi atteint, dans beaucoup d'endroits, le toit du niveau hydrostatique général. Ce niveau, qui correspond au niveau de base régional marqué par les rapides de São Gabriel da Cachoeira sur le Rio Negro et les rapides de Sanmariapo sur l'Orénoque (figure 2), est resté certainement inchangé pendant une très longue période de temps.

Dans ce milieu amazonien les altérations conduisent naturellement à un processus d'allitisation dans lequel la gibbsite est le principal minéral néoformé. Les sols très épais des collines convexes sont cependant argileux, essentiellement à kaolinite. Il n'y a pas d'explications simples à ce fait. Des redistributions d'éléments ont certainement favorisé la néoformation de la kaolinite. Une redistribution de la silice imputable à l'action du couvert forestier (Lucas *et al.*, 1993) a pu contribuer à ce phénomène. Les sols des modelés les plus aplanis, collines basses et plaine ferrallitique, sont au contraire peu épais, appauvris en kaolinite et enrichis en gibbsite en comparaison des sols des modelés convexes. Ils sont aussi toujours plus riches en matière organique. Dans la mesure où l'on admet qu'ils dérivent de sols initialement argileux semblables à ceux des actuelles collines convexe, comme rien n'indique qu'ils aient subi des remaniements, on peut supposer qu'ils ont subi une perte d'éléments fins par lessivage ou par dégradation chimique sous l'effet de processus de réduction, ferrolyse, acidocomplexolyse, voire hydrolyse acide minérale (Grimaldi et Pedro, 1996) dans des milieux où les nappes sont à la fois acides et chargées de matières organiques. Il y aurait eu, dans ces conditions, transformation de la couverture « latéritique » argileuse en une couverture jaune sablo-argileuse « dégradée ». La situation la plus dégradée correspond aux profils réduits à quelques dizaines de centimètres de matériau jaune sablo-argileux sur un matériau d'altération blanc et déferrié, observés là où la nappe est devenue permanente et à faible profondeur.

Le développement des podzols hydromorphes et leur évolution

Les podzols sont en continuité avec la couverture ferrallitique. On observe les podzols en effet autour et dans la plaine ferrallitique. Il en existe aussi autour de certaines collines basses à sols ferrallitiques.

Le processus de développement des podzols est le même, qu'ils soient dans la plaine ou autour des collines. Il ne se

manifeste qu'au contact de sols ferrallitiques devenus jaunes et éluviés. L'horizon albique, l'horizon spodique et l'alios sont les résidus de la fonte de tous les horizons meubles du sol ferrallitique. La saprolite blanche, par contre, reste en continuité latérale avec les horizons d'altération du sol ferrallitique.

Le développement du podzol paraît directement lié aux circulations des eaux de nappe. Le microrelief, chenaux et cuvettes fermées, est caractéristique de ces régions et marque l'apparition du podzol dans la séquence. Il est aussi l'indicateur d'une dynamique de l'eau localement plus intense, liée à une convergence de la nappe des sols ferrallitiques et de celle, plus superficielle, des podzols.

Dans les situations où il n'y a pas de podzol à l'aval des collines, c'est un sol gris sableux à pseudogley sur saprolite blanche qui marque la fin de la séquence. Il n'y a pas de podzol parce qu'il n'y a pas de nappe permanente. Il y aurait même, dans ces conditions, néoformation de kaolinite. Par contre la présence d'une nappe permanente aux pieds de certaines collines favorise la podzolisation (collines à aval podzolique). Ces situations ne peuvent s'expliquer que par une remontée du niveau général des nappes, remontée qui serait la conséquence, comme dans le secteur du Casiquiare, d'un affaissement tectonique et, plus généralement, d'une érosion géochimique des modelés.

L'épaisseur de la couche de sable blanc semble augmenter à mesure que l'on s'éloigne du contact avec le sol ferrallitique. On passe ainsi de zones à podzols hydromorphes à alios relativement peu profond aux zones à podzols géants. Le podzol géant peut lui-même évoluer vers un podzol géant à nappe superficielle (Histic Alaquod) voire même en une tourbe (Hydic Tropofibris) et en un sol lessivé blanchi hydromorphe (Typic Albaquilt). Ces évolutions se font, sans nul doute, sous les effets d'une remontée générale du niveau des nappes (Volkoff *et al.*, 1990).

La transformation des plaines à sols ferrallitiques en plaines à podzols

La carte des couvertures pédologiques (figure 3) nous montre que les grands panneaux de plaine ferrallitique s'organisent en périphérie des massifs de collines et sont généralement délimités par des rivières. Cette disposition serait en fait fortement influencée par la structure du socle. La dissection de la plaine ferrallitique par les podzols débute généralement par une plage podzolisée au centre de l'interfluve. Puis la surface podzolisée croît de façon centrifuge en gagnant les bords de l'interfluve. Ce mode de propagation permet d'expliquer pourquoi les plus grands panneaux de plaine ferrallitique ne sont actuellement podzolisés que dans leur partie centrale et pourquoi, dans les phases les plus avancées du processus, il ne reste plus que quelques taches de sols jaunes disposées en bordure des fleuves ou autour des inselbergs.

Ce modèle d'évolution permet aussi d'expliquer en partie le modelé et les sols que l'on observe dans les entailles à sols ferrallitiques. En examinant la coupe topographique réalisée à Ipanoré (figure 9), nous pouvons admettre que les convexités sont les restes d'une ancienne plaine ferrallitique à sols jaunes qui bordait une plaine à podzols. Du fait d'un relèvement général de la surface du sol, la plaine subsiste actuellement sous forme d'un plateau et sa bordure a été ensuite entaillée puis remodelée en une surface de raccordement polyconvexe. Sur ces lambeaux de plaine ferrallitique s'installe à nouveau la podzolisation qui crée des replats sableux en pente douce.

CONCLUSIONS

L'étude cartographique des couvertures pédologique du bassin du Haut Rio Negro met en évidence les étapes de la dégradation d'une très vieille couverture en partie bauxitique. Elle permet aussi d'en discuter les causes possibles.

Des conditions de grande stabilité tectonique et un climat tropical très humide pendant une très longue période semblent avoir favorisé un aplanissement poussé par enfoncement vertical des couvertures ferrallitiques dont la surface a ainsi atteint, sur de larges secteurs, le niveau des nappes phréatiques. Les couvertures ferrallitiques ont subi au cours de cet enfoncement et sous l'effet de nappes acides d'importantes dégradations. Elles ont pu alors se transformer aisément en podzols. Cette dernière transformation est essentiellement une transformation latérale. Elle a donné naissance à un podzol hydromorphe qui, en prenant de l'extension, a formé les larges plaines sableuses à podzols géants typiques de la région. Aux différents stades d'évolution qui ont fait passer des sols ferrallitiques argileux aux sols ferrallitiques sablo-argileux puis aux podzols, correspondent à chaque fois un abaissement de l'altitude générale et un aplanissement du modelé (Dubroeuq *et al.*, 1991).

Des événements tectoniques régionaux de faible amplitude ou plus prononcés mais localisés, expliquent les évolutions différentielles observées. L'extension des podzols aux dépens de collines ferrallitiques basses, la conservation de la plaine ferrallitique, la naissance de zones tourbeuses, la formation de nouvelles couvertures ferrallitiques sont à mettre en relation avec un basculement d'ensemble vers l'Est avec relèvement à l'Ouest, un effondrement tectonique dans la zone du Casiquiare, un bombement le long d'une dorsale transversale et des affaissements au Nord et à l'Ouest.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Adolpho Melfi, Anicet Beauvais et Georges Pédro pour les critiques et les suggestions apportées à ce travail de synthèse.

GLOSSAIRE

Les principaux horizons diagnostiques

Albique : variantes meuble ou compact. Horizon sableux, blanchi, à argile complètement détruite par acidolyse et/ou lessivage intense.

Alios : horizon d'accumulation d'oxydes des podzols (Bs), compact et dur, gris ou brun, souvent faiblement organique.

Argilique : horizon d'accumulation d'argile en général de type kaolinite, souvent gris ou blanc par hydromorphie.

Eluvié : horizon lessivé à déficit d'argile.

Fibreux humique : épipédon organique des forêts sur sables blancs, constitué d'un matelas de racines vivantes comportant de fins agrégats organiques.

Humique noir : épipédon organo-minéral à matière organique très acide, noire, non liée aux minéraux.

Limoneux : horizon d'accumulation de quartz très fins avec de faibles quantités d'argile, beige ou gris, spécifique des matériaux sableux des podzols géants.

Ochrrique : horizon subsuperficiel beige ou jaune pâle, bioturbé, très meuble, à structure grenue millimétrique, contenant à 2 % de matière organique indécelable qualitativement.

Oxique : variantes jaune ou rouge, horizon minéral homogène, friable, à microagrégats (micronodules de 0,05 à 0,1 mm de diamètre) ou à structure polyédrique fine.

Plinthite : horizon minéral hétérogène à taches nodulaires d'oxydes.

Pseudogley : engorgement temporaire, taches rédoximorphiques permanentes.

Régolithe : arène sablo-argileuse à minéraux primaires résiduels.

Saprolite : variantes rouge, bigarrée, ou blanche. Matériau argileux avec plages à structure de roche conservée.

Sombrique : horizon subsuperficiel à matière organique noire, illuviale, non liée aux minéraux.

Spodique : horizon d'accumulation de matière organique des podzols (Bh), compacte, noire, à structure microagrégée.

Umbrique : épipédon organo-minéral acide à matière organique brune liée aux argiles.

Les grands types de couvertures végétales

(1) **La campina** : encore appelée « *sabaneta* » au Venezuela, végétation clairsemée d'arbustes laurifoliés et sclérophylles laissant des espaces dénudés de sable blanc. Elle est caractéristique des podzols géants.

(2) **La forêt claire sur sable** : encore appelée « *bana* » au Venezuela ou « *caatinga amazónica* » au Brésil ; taillis dense d'arbres grêles de 10 à 15 m de haut et à feuilles

scléreuses parmi lesquels *Clusia columnaris*. Elle caractérise les podzols hydromorphes où la nappe est temporairement superficielle.

- (3) La forêt haute sur sable : encore appelée « campinarana » (Projeto Radambrasil, 1976). C'est une forêt de 20 à 30 m de hauteur à frondaisons égales, composée d'un mélange d'espèces à feuilles tendres tels que *Eperua purpurea* et d'espèces à feuilles scléreuses tels que *Hevea rigidifolia*. Elle est caractéristique des sols lessivés riches en aluminium.
- (4) La forêt de terre ferme : elle ne présente pas d'espèces à feuilles scléreuses et le sous-bois reste clair du fait de la densité de l'ombrage. Une futaie dont les frondaisons sont inégales avec des émergents de 30 à 40 m de hauteur caractérise les sols argileux et bien drainés tandis qu'une forêt d'arbres grêles pousse sur les sols gravillonnaires ou indurés.
- (5) La forêt sur tourbe sableuse : espèces voisines de celles de la forêt haute sur sable, mais avec une plus grande proportion de palmiers et le port de racines-échasses chez les arbres de grande taille.
- (6) La forêt inondée : espèces spécifiques de palmiers et d'arbres à racines-échasses atteignant 30 m de haut, dont le bois est très dense et ne flotte pas. Les fûts sont droits à ancrage instable, sujets à des chablis fréquents.

BIBLIOGRAPHIE

- Aleva G.J.J., 1981 - Bauxitic and other duricrusts on the Guaiana Shield, South America. In : « Lateritisation Processes », V.S. Krishnaswamy (ed.), Proc. internat. sem. on Lateritisation Processes, Trivandrum, India, 1979, New-Delhi, Bombay, Calcutta, Oxford and I.B.H. Publ. Co., p. 261-269.
- Atlas del Inventario de Tierras del Territorio Federal Amazonas, 1987 - Atlas geomorfo-pedológico. Escala 1/250 000. ORSTOM & Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Dirección de Suelos, Vegetación y Fauna, Caracas, Venezuela.
- Boulet R., Chauvel A. and Lucas Y., 1984 - Les systèmes de transformation en pédologie. AFES, Livre Jubilaire du Cinquantenaire, Plaisir, France, p. 167-179.
- Cecilia Martin F., 1976 - Atlas Géologique du Monde, feuilles 4 et 5 : Amérique du Sud. 1/1 000 000. UNESCO Paris.
- Chauvel A., Lucas Y. and Boulet R., 1987 - On the genesis of the soil mantle of the region of Manaus, Central Amazonia, Brazil. *Experientia* 43, 234-241.
- Chauvel A., Walker I. and Lucas Y., 1996 - Sedimentation and pedogenesis in a Central Amazonian Black water basin. *Biogeochemistry* 33, 77-95.
- Choubert B., 1974 - Le Précambrien des Guyanes. Mém. BRGM n° 81, Paris, 204 p.
- Clapperton C., 1993 - Quaternary Geology and Geomorphology of South America. Elsevier, 779p.
- Colinvaux P.A., De Oliveira P.E., Moreno J.E., Miller M.C. and Bush M.B., 1996 - A Long Pollen Record from Lowland Amazonia : Forest and Cooling in Glacial Times. *Science*, 174 : 85-88.
- Dubroeuq D. and Blancaneaux Ph., 1987 - Les podzols du haut rio Negro, région de Maroa, Venezuela. Environnement et relations lithologiques. In : "Podzols et Podzolisation", D. Righi et A. Chauvel ed., AFES (Plaisir) - INRA (Paris), p. 37-52.
- Dubroeuq D. and Sanchez V., 1981 - Características edáficas y ambientales del area muestra San Carlos de Rio Negro - Solano. Serie Informe Técnico, DGSIA/IC/12, MARNR, Caracas, Venezuela.
- Dubroeuq D. and Volkoff B., 1988 - Evolution des couvertures pédologiques sableuses à podzols géants d'Amazonie, bassin du haut Rio Negro. *Cah. ORSTOM sér. Pédol.* 24, 3, 191-214.
- Dubroeuq D. and Volkoff B. 1998 - From Oxisols to Spodosols and Histosols, evolution of the soil mantles in the Rio Negro basin (Amazonia). *Catena*, 32 : 245-280.
- Dubroeuq D., Gavaud M. and Millot G., 1988 - A high bauxitic surface in the Amazon Territory of Venezuela. Mapping through the Radar-Slar imagery and exploratory examination. *Sci. Géol. Bull.* 41, 1, 99-111, Strasbourg, France.
- Dubroeuq D., Volkoff B. and Pedro G., 1991 - La couverture pédologique du Bouclier Nord de l'Amazonie (bassin du Haut Rio Negro) - Séquence évolutive des sols et son rôle dans l'aplanissement généralisé des zones tropicales perhumides. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 312 sér. II, 663-671.
- Faure P. et Bénizri C., 1988 - Forban : un logiciel infographique de cartographie thématique développé et portable sur micro-ordinateur compatible PC. Séminar 1, premier séminaire informatique ORSTOM, 6-8 octobre 1987. ORSTOM-Paris, Collection Colloques et Séminaires, p. 299-320
- Fritsch E., 1984 - Les transformations d'une couverture ferrallitique en Guyane Française. Thèse, Univ. Paris VII, ORSTOM-Paris.
- Fritsch E., Bocquier G., Boulet R., Dosso M. and Humbel F.X., 1986 - Les systèmes transformants d'une couverture ferrallitique de Guyane Française. Analyse structurale d'une formation supergène et mode de représentation. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXII, 4, pp.361-396.
- Gavaud M., Blancaneaux Ph., Dubroeuq D. and Pouyllau M., 1986 - Les Paysages pédologiques de l'Amazonie vénézuélienne. *Cah. ORSTOM sér. pédol.* 22, 3, 265-284.
- Grzebyk M. and Dubroeuq D., 1994 - Quantitative analysis of distribution of soil types : existence of an evolutionary sequence in Amazonia. *Geoderma* 62, 285-298.
- Grimaldi C. et Pédro G., 1996 - 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. Sc. Paris*, 323, 11a, 483-492.
- Herrera R., Jordan C.F., Klinge H., Medina E. 1978 - Amazon ecosystems. Their structure and functioning with particular emphasis on nutrients. *Interciencia* 3, 4, 223-231.
- ISSS-ISRIC-FAO, 1998. World Reference Base for Soil Resources. FAO, Rome, World Soils Resources Reports 84, 88p.
- Jordan, C.F. and Herrera, R. 1981. Tropical rain forests : are nutrients really critical? *The American naturalist* 117, 2, 167-180.
- Jeanroy, E., 1983. Diagnostique des formes du fer dans les pédogénèses tempérées. Evaluation par les réactifs chimiques d'extraction et apports de la spectrométrie Mossbauer. Thèse Doc. Univ. Nancy I, France, 157 p.
- Klinge, H., 1965. Podzol soils in the Amazonian basin. *J. Soil Sci.* 16, 96-103.
- Klinge H., Medina E., Herrera R., 1977 - Studies on the ecology of Amazon caatinga forest in southern Veneuela. *Acta Cient. Venez.* 28, 270-276
- Lucas Y., Boulet R., et Chauvel A. 1988 - Intervention simultanée des phénomènes d'enfoncement vertical et de transformation latérale dans la mise en place de systèmes de sols de la zone tropicale humide. Cas des systèmes sols ferrallitiques-podzols de l'Amazonie Brésilienne. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 306 sér. II, 1395-1400

- Lucas Y., Boulet, R., Chauvel A. et Veillon L. 1987 - Systèmes sols ferrallitiques - Podzols en région amazonienne. In : "Podzols et podzolisation", D. Righi et A. Chauvel eds., AFES, Plaisir - INRA, Grignon, p. 53-65.
- Lucas Y., Chauvel A., Boulet R., Ranzani G., Scatolini F. 1984 - Transição Latossolos-Podzols sobre a formação Barreiras na região de Manaus, Amazônia. R. Bras. C. Solo 8, 325-335.
- Lucas Y., Luizão F.J., Chauvel A., Rouiller J. and Nahon D., 1993 - The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of the soils. Science 260, 521-523.
- Mc. Connel R.B., 1966 - Note on the erosion levels and geomorphology of British Guyana. Transact of the 3d. Caribbean Geol. Conf., Kingston, Jamaica., 1962, 151-159.
- Mehra O.P. and Jackson M.L., 1960 - Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. Clays Clay Miner. 7, 317-327
- Millot G., 1983 - Planation of continents by intertropical weathering and pedogenetic processes. In : « Lateritisation Processes », A.J.Melfi & A. Carvalho ed. University of São Paulo Press, São Paulo, p. 53-63.
- Mendoza V., Moreno L., Barrios F. and Rivas D., 1977 - Geología de la parte Norte del Territorio Federal Amazonas, Venezuela. 5e Cong. Geol. Venezolano. Ministerio de Energía y Minas - Sociedad Venezolana de Geólogos ed., Memoria I, p. 363-406.
- Proyecto Radargramétrico del Amazonas, 1979 - La Amazonia Colombiana y sus recursos, Bogotá D.E. Planchas 2,3,5,6, escala 1/500 000.
- Projeto Radambrasil, 1976 - Levantamento de Recursos Naturais, folha NA-19, vol. 11 : Pico da Neblina. Ministerio das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, Rio de Janeiro, 374 p.
- Projeto Radambrasil, 1977 - Levantamento de Recursos Naturais, folha NA-19, vol. 14 : Iça. Ministerio das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, Rio de Janeiro, 374 p.
- Soil Survey Staff, 1998 - Keys to Soil Taxonomy, 8 th edition. USDA, Natural Resource Conservation Service, Washington, DC, 326 pp.
- Sombroek W.G., 1966 - Amazon Soils. A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region. PUDOC, Wageningen, The Netherlands, 300 p.
- Thomas M., F., 1994 - Geomorphology in the Tropics, John Wiley & Sons, Chichester, U.K., 433 p.
- Tricart J., 1985 - Evidence of upper Pleistocene dry climates in northern South America. In : I. Douglas and T. Spencer (eds.), Environmental Change and Tropical Geomorphology. Allen & Unwin, London, pp.197-218
- Turenne J.F., 1975 - Modes d'humification et différenciation podzolique dans deux toposéquences guyanaises. Thèse Univ. Nancy. Mém. ORSTOM n° 84, Paris, 173 p.
- Veillon L., 1988 - Transition sol ferrallitique-podzol : cas d'une terrasse sédimentaire de l'Ucayali (Pérou). Cah. ORSTOM sér. pédol., 24, 2, 97-114
- Veillon L., 1990 - Sols ferrallitiques et podzols en Guyane septentrionale. Relations entre systèmes de transformations pédologiques et évolution historique d'un milieu tropical humide et forestier. Thèse Univ. Paris 6, France, 191 p.
- Volkoff B., Mortatti J. et Cerri C.C., 1990 - Rôle des nappes dans les différenciations pédologiques à podzols de l'Amazonie. C.R. Acad. Sc. Paris, 310 sér. II, 1361-1368.

ANNEXE : DESCRIPTION DES PROFILS DE SOLS

Profil 1 - Sol ferrallitique jaune-rouge (Typic Haploperox) sur embréchite feldspathique à San Simon de Cocuy, Venezuela :

- 000/050 cm : « Umbrique » brun foncé, argilo-sableux à sable fin et matière organique.
- 050/150 cm : « Oxique » jaune, très friable, nodules ferro-alumineux à boémite et hématite. Fraction fine à kaolinite dominante, gibbsite, goéthite alumineuse et quartz.
- 150/300 cm : « Oxique » brun-rouge, argileux, polyédrique fin. Minéralogie à kaolinite mal cristallisée, gibbsite microcristalline, goéthite alumineuse et quartz fin.
- 3 à 5 m de profondeur : « Plinthite » tacheté, beige clair à taches rouge-brun, argileux, minéralogie à kaolinite prépondérante, gibbsite, hématite.
- 5 à 20 m de profondeur : « Saprolite » blanche à larges plages lithorélictuelles rouge vif, argileux à toucher limoneux, quartz grossiers visibles, fraction fine à kaolinite macrocristalline, quartz, un peu d'illite.

Profil 2 - Sol ferrallitique jaune-rouge (Typic Haploperox) sur gneiss micacés, au km 55 de la piste São Gabriel-Cucuí, Brésil :

- 000/040 cm : « Umbrique » gris-brun, organo-minéral et bioturbé.
- 040/080 cm : « Ochrique » jaune clair, bioturbé, structure grenue très fine (0.5 mm), argilo-sableux à sable fin, faiblement organique, fraction fine à kaolinite, gibbsite, vermiculite-Al et goéthite-Al.
- 080/140 cm : « Oxique jaune » plus massif, argileux, polyédrique fin. Fraction fine à kaolinite mal cristallisée, gibbsite microcristalline et goéthite-Al.
- 140/170 cm : « Oxique rouge » même structure fine et même minéralogie, mais présence d'hématite.
- 170/220 cm de profondeur : « Plinthite », tacheté rougeâtre à taches claires, argileux, quelques nodules gibbsitiques en poupées, fraction fine à kaolinite et hématite.
- 220/400 cm de profondeur : « Régolithe » gris-violacé, très friable en fines paillettes micacées, petits nodules gibbsitiques en poupées, fraction fine à kaolinite bien cristallisée et hématite.

Profil 3 - Sol ferrallitique jaune (Xanthic Acroperox) à Ocamo, Venezuela :

- 000/060 cm : « Umbrique » brun sombre (10YR4/3), argilo-sableux, grumeleux, aprox. 5 % mat. organique.
- 060/090 cm : « Ochrique » jaune, (10YR5/5), structure

grenue très fine, aprox. 1 % mat. organique.

- 090/180 cm : « Oxiqne » jaune, argileux, polyédrique fin 1 cm, à faces lisses interprétées comme matranes (stress cutanes).

- 180/240 cm : « Plinthe » jaune pâle à taches rougeâtres arrondies, argileux, friable.

- 240/300 cm : « Saprolite », gris (2.5Y3/2) à larges taches rouges lithorélictuelles, aprox. 60 % argile, massif.

- 300/440 cm : « Régolithe », gris clair, niveau de nappe à 300 cm, sablo-argileux, aprox. 20 % argile, sables grossiers, meuble, poreux, fréquentes boules de roche altérée.

Profil 4 - Sol ferrallitique jaune lessivé (Acrudoxic Kandiudult) à San Carlos, Venezuela :

- 000/010 cm : « Fibreux humique » brun noirâtre, tapis de racines enchevêtrées et de débris végétaux.

- 010/060 cm : « Humique noir » noirâtre (10YR2/1) plus clair à la base (2.5Y4/2), aprox. 4 % MO non liée aux minéraux, sablo-limoneux, très friable en microagrégats organiques de 0,2 à 0,5 mm.

- 060/140 cm : « Argilique » jaune pâle (2.5Y6/2), fréquentes taches organiques liées aux cavités biologiques, sablo-argileux, structure polyédrique moyenne.

- 140/200 cm : « Régolithe » gris clair (2.5Y8/1), sablo-limoneux, aprox. 20 % argile, sables grossiers abondants, massif, nappe d'eau à 200 cm.

Profil 5 - Podzol hydromorphe à alios (Utic Alaquod) en région du rio Curiuia, Brésil :

- 000/008 cm : « Fibreux humique » brun noirâtre (10YR 4/3), tapis de racines enchevêtrées et de débris végétaux, aprox. 6 % MO non liée aux minéraux, très friable en agrégats organiques de 2 à 5 mm.

- 008/050 cm : « Humique noir » brun cendré (10YR4/1), aprox. 2 % MO couvrant les minéraux, sableux, très friable en agrégats de 2 à 5 cm.

- 050/090 cm : « Albique » beige (2.5Y 6/2), sableux, meuble, nombreuses racines verticales.

- 090/100 cm : « Alios » ocre (10YR 5/4), zones brunes indurées (10YR4/4) allongées horizontalement, sableux, dur, compact.

- 100/160 cm : « Albique » beige clair (2.5Y7/2), sableux, massif non compact.

- 160/180 cm : « Alios » ocre brun (2.5Y5/6), sablo-argileux, massif, forte compacité, induré par place.

- 180/220 cm : « Argilique » gris (5Y6/2), argilo-sableux, aprox. 30 % argile, très plastique, collant.

Profil 6 - Podzol hydromorphe à alios (Utic Alaquod) de Maroa, Venezuela :

- 000/005 cm : « Fibreux humique », litière de feuilles mêlées à un feutrage serré de racines avec de fins grumeaux de matière organique décomposée et noire.

- 005/020 cm : « Humique noir » noirâtre, humide, aprox. 3 % MO non lié à la fraction minérale, sableux, meuble.

- 020/110 cm : « Albique » blanc-gris, sableux, quartzeux, particulière, meuble, nappe à 100 cm.

- 110/130 cm : « Spodique » noir, noyé, sableux, aprox. 10 % MO recouvrant les minéraux, massif, compact.

- 130/150 cm : « Alios » brun sombre (7.5YR 4/2), très compact, dur, à structure litée, à sables grossiers visibles.

- 150/200 cm : « Argilique » gris-beige (2.5Y 7/4) à taches jaunes allongées verticalement, liées aux racines, humide, non engorgé, sablo-argileux, massif, très plastique.

- 200/300 cm : « Saprolite blanche » gris clair (2.5Y8/4), très humide, sablo-limoneux, sables grossiers et micas dorés visibles, massif, revêtements argileux épais dans les fissures.

Profil 7 - Podzol géant (Typic Quartzipsamment), sondage dans la région du Uaupés, Brésil :

- 000/005 cm : « Fibreux humique », litière de feuilles décomposées et feutrage de racines vivantes avec de fins grumeaux de matière organique.

- 005/020 cm : « Humique noir » noirâtre (5YR4/2), aprox 5 % MO non liée à la fraction minérale, sableux, grumeleux très friable, fines racines nombreuses.

- 020/065 cm : « Sombrique » gris clair à taches de matière organique illuviale (10YR3/3), sableux, aprox 2 % MO, humide, meuble.

- 065/200 cm : « Albique » blanc (10YR 7/1), humide, sableux à sables moyens, bouillant.

- 200/420 cm : « Albique » blanc (5Y8/1), humide, sableux à sables moyens et sables grossiers, meuble, faiblement compact en comparaison de l'horizon susjacent.

Profil 8 - Podzol géant à nappe superficielle (Histic Alaquod) à São Tomé, Uaupés, Brésil :

- 000/010 cm : « Fibreux humique », feutrage serré de racines avec de fins grumeaux de matière organique décomposée et noire.

- 010/040 cm : « Humique noir » noirâtre, humide, aprox. 2 % MO non liée à la fraction minérale, sableux, meuble.

- 040/100 cm : « Albique » blanc-gris, sableux, quartzeux, particulière, meuble, nappe à 80 cm.

- 100/120 cm : « Albique compact » : blanc-gris, noyé, sableux quartzeux, massif, faiblement compact.

- 120/125 cm : « Spodique » noir, noyé, sableux, aprox. 3 % MO non liée aux minéraux, très compact.
- 125/180 cm : « Limoneux » gris-brun à taches diffuses jaunes, humide non engorgé, sablo-limoneux faiblement argileux, massif, cohérent.
- 180/220 cm : « Albique » : blanc-jaune, très humide, sableux quartzeux, meuble, boulant en profondeur.

Profil 9 - Sol ferrallitique de versant (Typic Haploperox) à Missão Taraqua, Brésil :

- 000/020 cm : « Humique brun » argileux, brun, finement structuré, à matière organique.
- 020/060 cm : « Ochrique » argileux, très friable, brun-jaune, faiblement organique.
- 060/160 cm : « Oxique jaune » ocre (7.5YR5/8), argileux, quelques sables grossiers visibles, structure polyédrique fine peu nette, très friable, très poreux.
- 160/190 cm : « Oxique rouge » brun rouge (5YR5/8), argileux, polyédrique fin, très friable, poreux.
- 190/250 cm : « Saprolite rouge » rouge brun (2.5YR4/8), plages violacées micacées à structure de roche conservée, argileux, très poreux, friable.

Profil 10 - Tourbe sur sable (Hydric Haplofibrist) dans la région de Ocamo, Venezuela :

- 000/030 cm : « Fibreux humique », matelas de racines vivantes et de débris végétaux.
- 030/040 cm : « Humique noir » sablo-limoneux, aprox. 5 % MO non liée aux minéraux.
- 040/130 cm : « Albique » gris clair, sableux, taches de matière organique, nappe d'eau à 50 cm.
- 130/135 cm : « Spodique » noir, massif, sableux à matière organique.
- 140/220 cm : « Limoneux » humide, gris jaunâtre, sablo-limoneux faiblement argileux.

Profil 11 - Sol hydromorphe à horizon blanchi (Typic Albaquult) à Maroa, Venezuela :

- 000/015 cm : « Fibreux humique » matelas de racines enchevêtrées et de grumeaux organiques.
- 015/030 cm : « Ochrique » gris beige, très friable, à matière organique non discernable.
- 030/090 cm : « Pseudogley » gris clair à taches ocre, sableux faiblement argileux, très humide.
- 090/150 cm : « Albique », larges poches et chenaux à sables grossiers lavés formant un horizon albique discontinu, bouillant, nappe d'eau à 100 cm.
- 150/200 cm : « Argilique » gris blanc à rares taches ocres, argilo-sableux à sables grossiers visibles, massif, saturé d'eau, très plastique.

