

L'humus des sols du Brésil

Nature et relations avec l'environnement (1)

Boris VOLKOFF (2) et Carlos Clemente CERRI (3)

(1) Travail réalisé dans le cadre de la Convention ORSTOM (France)/CNPq (Brésil)

(2) Mission ORSTOM, BP 1857, Yaoundé, République du Cameroun

(3) Université de São Paulo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, CP 96, 13400 Piracicaba, Brésil

RÉSUMÉ

Un inventaire systématique permet de définir les grands types d'humus naturels des sols du Brésil. De leur répartition géographique on dégage leur déterminisme et on analyse l'effet des facteurs bioclimatiques et pédologiques. On montre que les caractéristiques générales de la matière organique (quantité, extractibilité) dépendent de diverses propriétés intrinsèques du sol (essentiellement acidité et drainage) mais d'un seul facteur climatique qui est la température. A un niveau de caractérisation plus détaillée on montre que dans tous les sols acides certaines différenciations biochimiques des acides humiques des horizons A sont subordonnées à un autre facteur climatique : durée de la saison sèche. Enfin l'étude des variations de la concentration en isotope stable C-13 fait apparaître que seul l'humus des horizons A est directement en équilibre avec la végétation actuelle, l'humus des horizons de profondeur semble, lui, soustrait aux influences de cette végétation.

MOTS-CLÉS : Brésil — Végétation naturelle — Matière organique des sols.

ABSTRACT

HUMUS OF BRAZILIAN SOILS. NATURE AND RELATIONSHIP WITH THE ENVIRONMENT

The main types of natural humus of Brazilian soils have been defined after a systematic survey was made. The analyses of the effects of pedologic and bioclimatic factors was possible using the geographic distribution of such humus. It was noted that although the general characteristics of the organic matter (quantity, extractivity) depend on several soil intrinsic properties (essentially acidity and drainage), they depend on only climatic factor, i.e., temperature. A more detailed characterization has shown that certain biochemical differentiation of the humic acids of all A horizon acid soils are subject to another climatic factor — duration of dry season. Finally, the study of the variations in the stable isotope C-13 concentration indicated that while the humus of A horizons is in equilibrium with the present vegetation, this is not the case of deep horizons which apparently do not suffer influence from soil surface vegetation.

KEY WORDS : Brazil — Native vegetation — Soil organic matter

RESUMO

HUMUS DOS SOLOS DO BRASIL. NATUREZA E RELAÇÕES COM O AMBIENTE

A partir de um levantamento sistemático, definiram-se os principais tipos de humus naturais dos solos do Brasil. A distribuição geográfica desses tipos de humus permitiu inferir sobre os fatores bioclimáticos e pedológicos de suas formações. Mostrou-se ainda que embora as características gerais da matéria orgânica (quantidade, estabilidade)

estejam relacionadas a diversas propriedades intrínsecas do solo (essencialmente acidez e drenagem), elas dependem de um único fator climático, que é a temperatura. A um nível de caracterização mais detalhado, mostrou-se também que para todos os solos ácidos, certas diferenciações bioquímicas dos ácidos húmicos dos horizontes subordinadas a um outro fator climático : duração da estação seca. Finalmente, o estudo das variações na concentração do isótopo estável C-13 ressaltou que apenas o humus dos horizontes A está em equilíbrio com a atual vegetação do solo, o que não acontece com o humus dos horizontes de profundidade que parece disvinculado das influências desta vegetação.

PALAVRAS CHAVES : Brasil — Vegetação natural — Matéria orgânica do solo.

INTRODUCTION

La matière organique est le constituant du sol qui reflète le mieux les interactions entre le sol, la biosphère et l'atmosphère car elle dépend à la fois de la nature du sol et de l'environnement bioclimatique. C'est donc un très bon indicateur du milieu (KONONOVA, 1966 ; STEVENSON, 1982 et 1985).

En milieu tropical plus qu'ailleurs elle a un rôle déterminant dans le cycle du carbone et la plupart des autres cycles biogéochimiques supergènes. Par son action cumulée sur de longues périodes de temps, elle intervient également sur la pédogenèse et l'évolution des sols (DUCHAUFOR, 1977 ; TURENNE, 1977).

Il est donc important de s'attacher à son étude, d'établir les relations entre ses caractéristiques propres et celle de l'environnement, d'analyser sa dynamique et les mécanismes de son action.

En outre, l'humus est une référence très commode pour l'étude des transformations du milieu, en particulier celles que provoque l'intensification de l'utilisation agro-pastorale des sols, mais il ne peut être convenablement utilisé à cet effet que si l'on dispose d'un minimum de connaissances sur sa nature et ses relations avec la végétation naturelle et le climat.

Les données la littérature (BOISSEZON *et al.*, 1973 ; DABIN, 1981 ; SANCHEZ, 1982) ne permettent pas toujours de définir précisément ce qu'est la matière organique des sols tropicaux qui apparaît tantôt uniforme tantôt très hétérogène. Ceci est dû au fait que les paramètres utilisés pour sa caractérisation (quantité totale, rapport C/N, rapport acides humiques/acides fulviques) sont interdépendants et d'ordres différents ; ils peuvent en même temps expliciter des caractéristiques communes à tous les sols tropicaux et fluctuer fortement d'une station à l'autre. D'où l'impossibilité apparente d'établir une hiérarchie des caractères et les difficultés rencontrées jusqu'alors pour définir des types d'humus spécifiques aux sols tropicaux (PERRAUD, 1971 ; TURENNE, 1977 ; DABIN, 1981).

Au Brésil on trouve de larges espaces peu modifiés par l'action de l'homme et une grande diversité de

milieux, ce qui autorise des comparaisons et des corrélations entre des situations qui peuvent être très contrastées. C'est donc un terrain de choix pour l'étude de la matière organique en équilibre avec son environnement pédo-bioclimatique et pour l'étude des facteurs qui déterminent ses caractères à un niveau régional.

Des travaux de caractérisation des humus, qui ont pu être réalisés au Brésil sur des sites sélectionnés, se dégagent quelques enseignements généraux qui seront exposés ici.

LE CLIMAT, LA VÉGÉTATION ET LES SOLS

Les traits principaux de l'oro-hydrographie, de la géologie et du climat du Brésil ont été présentés dans un travail antérieur (VOLKOFF, 1985).

L'interprétation des données du présent travail nécessite cependant d'y apporter quelques compléments.

Les types de climats

Il est en effet nécessaire de préciser certains éléments du climat, comme le régime des pluies et la température, qui, on le montrera plus loin, interfèrent sur les caractéristiques de la matière organique du sol.

La figure 1 établie à partir de BRASIL (1974 à 1981) montre comment varie la saison sèche. On obtient, si l'on excepte la région située à l'Est de São Paulo, un découpage géographique qui recouvre celui qui est basé sur le volume des précipitations. En effet les zones sans saison sèche ou à très courte saison sèche sont les zones les plus arrosées ; les zones à très longue saison sèche coïncident avec les zones semi-arides.

La carte rappelle la division du Brésil en deux domaines, tropical à température moyenne annuelle supérieure à 18°C et subtropical à température moyenne annuelle inférieure à 18°C. L'aire de ce dernier est aussi délimitée par l'isotherme 15°C du mois de juillet, mois le plus froid de l'hiver austral. La carte met aussi en évidence l'existence d'un domaine de transition entre le climat tropical et le climat subtropical. Il s'agit d'un climat tropical d'altitude que l'on appellera climat tropical

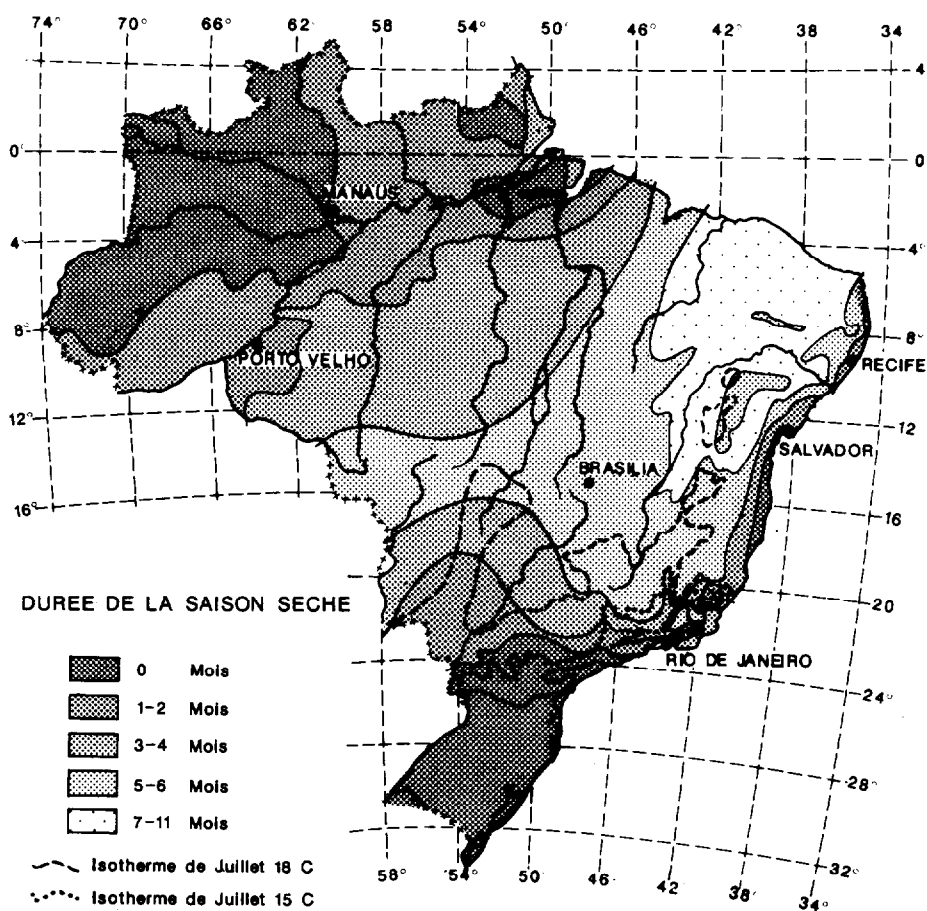


FIG. 1. — Durée de la saison sèche et isothermes 15°C et 18°C de juillet (d'après BRÉSIL, 1974 à 1981, et CAMARGO *et al.*, 1977)

atténué et qui se trouve délimité entre les isothermes 15°C et 18°C du mois de juillet. On se rend compte que ce domaine couvre une zone à durées de saison sèche très variées.

Les divisions phytogéographiques

Les différenciations du climat et de la végétation sont sensiblement parallèles (BRASIL, 1974 à 1981).

On peut ainsi distinguer (fig.2) :

- un ensemble forestier amazonien à forêt ombrophile dense, forêt ombrophile ouverte et campinarana. Il inclut quelques savanes et présente des forêts semi-décidues et décidues sur ses bordures ;
- un domaine du Cerrado où dominent les savanes, mais où l'on trouve aussi des forêts semi-décidues. A ce domaine se rattachent les forêts secondaires à *Orignya martiana* (babaçu) du nord du Maranhão et la végétation complexe de la dépression périodiquement inondée du Pantanal du Mato Grosso ;

- une zone de la caatinga, à steppe à épineux, forêt décidue et semi-décidue ;
- un domaine forestier atlantique à forêt ombrophile dense sur le littoral et à forêt mésophile à l'intérieur ;
- une zone à végétation subtropicale : forêt mixte à Araucaria, forêt subtropicale semi-décidue et prairie (prairie altimontane et Pampa).

Les sols (BRASIL, 1981 ; VOLKOFF, 1985)

Les sols se répartissent en quelques grands types : Latosols (oxisols ou sols ferrallitiques typiques), sols latéritiques (« podzólico vermelho-amarelo » ou ultisols qui sont ou des sols ferrallitiques ou des sols à morphologie de sols ferrugineux tropicaux), podzols, cambisols (ferrallitiques ou fersiallitiques), sols bruns eutrophes et sols fersiallitiques. Les latosols et les sols latéritiques sont toujours, sauf sur substrats calcaires du Nordeste, fortement désaturés. Les cambisols et les sols fersiallitiques peuvent être, suivant les zones

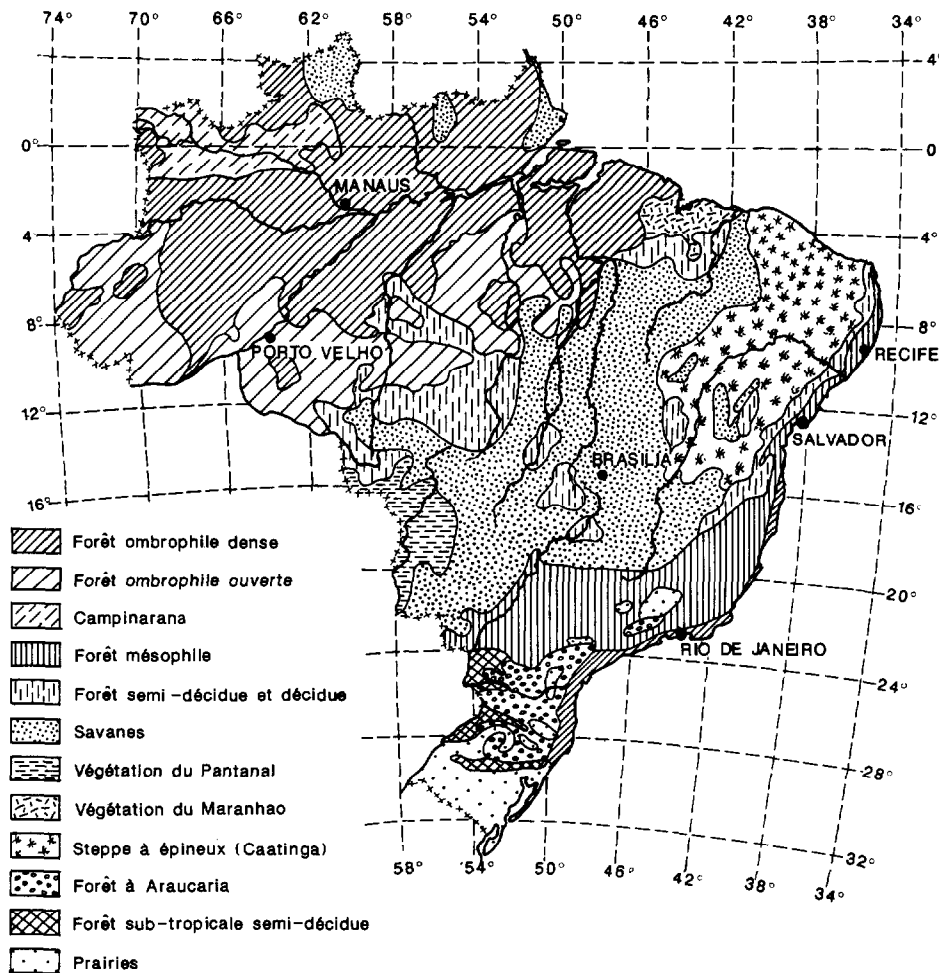


FIG. 2. — Schéma phytogéographique du Brésil (d'après BRÉSIL, 1974 à 1981, complété par les auteurs)

climatiques, soit faiblement désaturés soit fortement désaturés.

LES MÉTHODES D'ÉTUDE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE UTILISÉES

Les sols dont il est question dans ce travail ont été, pour la plupart, décrits dans des publications antérieures (CERRI et VOLKOFF, 1987a, 1987b ; RIBEIRO *et al.*, 1988 ; VOLKOFF et ANDRADE, 1976 ; VOLKOFF et CERRI, 1978, 1980, 1981 ; VOLKOFF *et al.*, 1979, 1982, 1984, 1988a). A ceux-ci ont été ajoutés des latosols du Plateau Central, sur basalte (sous forêt mésophile de la région de Ribeirão Preto-Etat de São Paulo, sous savane de la région de Campo Grande-Etat du Mato Grosso do Sul) et sur grès (sous savane de la région de Campo Grande-Etat du Mato Grosso do Sul et de

la région de Cuiaba-Etat du Mato Grosso) et des sols latéritiques à morphologie de sols « ferrugineux tropicaux » sur schistes (sous savane de la région de Cuiaba-Etat du Mato Grosso) et sur gneiss (sous savane de la région de Goiania-Etat du Goiás). Les résultats se rapportent ainsi à un total de 40 profils complètement analysés.

Les déterminations ont été faites sur des échantillons prélevés par tranches, d'une dizaine de centimètres d'épaisseur, successives dans les horizons A du sol, espacées en profondeur.

Les échantillons ont été séchés et tamisés à 2 mm. Le carbone total a été dosé par les méthodes traditionnelles soit par voie humide (oxydation au bichromate de potassium en milieu sulfurique), soit par voie sèche (carmhograph).

La méthode de fractionnement de la matière organi-

que utilisée (DABIN, 1971) consiste, sur un échantillon débarrassé de ses fragments végétaux grossiers, à extraire par épuisements successifs les acides fulviques libres (AFL) avec H_3PO_4 2M, et les acides humiques et fulviques alcalino solubles, d'abord par une solution de pyrophosphate de soude 0,1 M, ensuite par une solution de soude 0,1 N. Le résidu organique insoluble est l'humine. Les taux sont exprimés par rapport au carbone : carbone de la fraction considérée pour cent du carbone total de l'échantillon. Les résultats sont représentés sous la forme d'un spectre qui visualise la distribution du carbone dans l'humus. La juxtaposition des spectres donne, pour un même profil, une image des variations de la composition de l'humus en fonction de la profondeur et permet pour plusieurs profils, de les comparer aisément.

Le rapport E4/E6 est le rapport des absorbances à 465 nm et 665 nm mesurées sur une solution sodique d'acides humiques extraits suivant le protocole précédent, amenées à une concentration de 14 mg de carbone/100 ml et à un pH de 8 (KONONOVA, 1966 ; VOLKOFF et CERRI, 1978). Ce rapport renseigne sur le degré de condensation des molécules humiques.

Concentration en ^{13}C . On compare la concentration d'un échantillon de sol avec celle d'un étalon (Standard PDB) et on calcule le $\delta^{13}\text{C}$:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = 1000 \cdot \left(\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C} \text{ échantillon}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C} \text{ standard}} - 1 \right)$$

Ainsi une valeur de $\delta^{13}\text{C}$ de -10 ‰ signifie que l'échantillon est appauvri de 10 ‰ (1 ‰) par rapport au standard.

On rappellera que les plantes se divisent en deux types photosynthétiques : les plantes en C_3 où le produit de fixation primaire du gaz carbonique est l'acide phosphoglycérique et les plantes en C_4 où la fixation se fait sous forme d'acides amiques et asparagiques (HATCH et SLACK, 1966). La plupart des graminées tropicales sont des plantes en C_4 , le $\delta^{13}\text{C}$ y varie de -8 à -18 ‰ . Les plantes en C_3 sont plus caractéristiques des forêts tropicales, le $\delta^{13}\text{C}$ y varie entre -25 et -30 ‰ (TENHUNEN *et al.*, 1983).

Les mesures ont été effectuées par spectrométrie de masse sur le CO_2 obtenu par combustion complète de la matière organique du sol et purifié (FLEXOR et VOLKOFF, 1977 ; VOLKOFF et CERRI, 1987).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Inventaire des profils humiques — Types d'humus

Si l'on compare les caractéristiques générales de la matière organique des différents sols on constate une grande diversité. Mais si on sélectionne quelques-unes

d'entre elles, par exemple le mode de distribution du carbone en fonction de la profondeur, la nature des substances humiques, il devient possible de regrouper les sols en ensembles peu nombreux.

La distribution du carbone en fonction de la profondeur permet de distinguer deux types de profils : profils à matière organique concentrée en surface, formant un horizon A_{11} de quelques centimètres seulement d'épaisseur (2-3 cm) sans horizon A_{12} , les taux de matière organique décroissant rapidement en profondeur ; profils à décroissance de la matière organique avec la profondeur plus lente, avec un horizon A_{11} et un horizon A_{12} . L'horizon A_{12} peut alors être soit plus pauvre soit aussi riche (dans certains cas même plus riche) en carbone que l'horizon A_{11} .

En se basant sur le critère de la composition — résultats obtenus par fractionnement chimique — on distingue 3 familles d'humus :

- a — une famille globalement caractérisée par la prédominance des formes humine et acide fulvique libre présents en parts égales. Beaucoup de sols sans horizon A_{12} contiennent un humus de ce type ;
- b — une seconde famille où le carbone existe principalement sous forme d'acide fulvique libre et de substances alcalino-solubles et où il y a peu d'humine ;
- c — une famille enfin où le carbone se distribue sur l'humine et les fractions alcalino-solubles et où les acides fulviques libres sont très peu représentés.

Si lors de la synthèse des données, on adopte les concepts des écoles bio-pédologiques européenne ou américaine, et qu'on ne considère plus l'humus comme un simple constituant mais comme un corps naturel (à l'exemple du Mull, du Moder, ou des épipédons), on réussit à définir quelques types principaux d'humus : — un humus O (de ochrique) peu coloré, riche en humine et en acides fulviques libres et présentant un horizon A_1 peu épais surmontant un ensemble $\text{A}_3\text{-B}_1$ où les taux de carbone décroissent rapidement ; — un humus U (de umbrique) à proportions élevées d'acides fulviques libres et alcalino solubles et à faibles proportions d'humine, à horizons humifères A_{11} et A_{12} de couleur sombre ou noire,

et, suivant que le sol présente ou ne présente pas d'indices d'hydromorphie :

- un humus M (de mollique) à fractions alcalino-solubles et humine abondants, à horizons humifères A_{11} et A_{12} moyennement assombrés,
- un humus H (de hydromorphe) qui intrinsèquement se différencie peu du précédent.

On aboutit ainsi à quatre types d'humus, qu'il convient de relier à l'environnement pédo-bioclimatique.

Les types d'humus et l'environnement pédo-bioclimatique

On constate que l'humus O (fig.3) est l'humus des sols

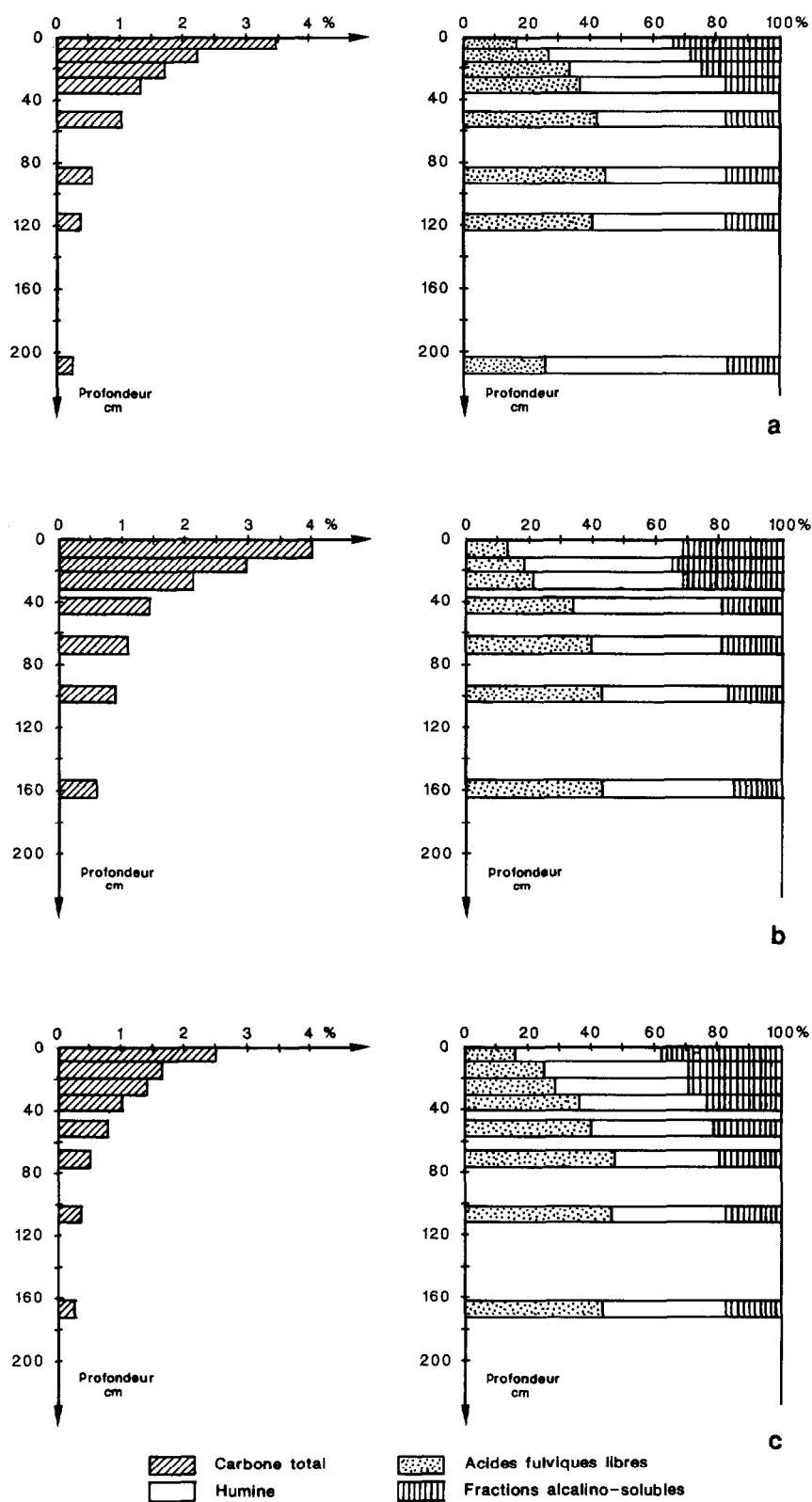


FIG. 3. — Distribution du carbone total et variations de la composition de l'humus avec la profondeur : (a) latosol sous forêt ombrophile dense d'Amazonie ; (b) latosol sous savane du Brésil Central ; (c) latosol sous steppe à épineux du Nordeste

parfaitement drainés kaoliniques, fortement désaturés, donc de la plupart des latosols (VOLKOFF et ANDRADE, 1976 ; VOLKOFF, 1977 ; VOLKOFF et CERRI, 1981 ; MANARINO *et al.*, 1982 ; CERRI et VOLKOFF, 1987). On le trouve aussi bien sous les climats très humides sans saison sèche d'Amazonie (fig.3a) que sous les climats à saisons contrastées du Brésil Central (fig.3b) et des zones semi-arides du Nordeste (fig.3c). Il ne dépend donc ni de l'abondance ni du régime des précipitations et de ce fait il est aussi indépendant du type de végétation.

L'humus U (fig.4a) correspond lui aussi à des sols drainés et fortement désaturés : latosols, sols latéritiques, cambisols et sols fersiallitiques acides (VOLKOFF et CERRI, 1978 ; VOLKOFF *et al.*, 1978 et 1984). L'aire des sols à humus U coïncide avec le domaine climatique sub-tropical du Brésil du Sud et du Sudeste (fig.1). L'humus U reflète donc un abaissement de la température moyenne.

Les sols à Humus M (fig.5) sont des sols généralement bien drainés mais peuvent aussi être des sols à drainage interne imparfait. Tous sont bien pourvus en bases et de réaction proche de la neutralité. On les rencontre principalement dans le Nordeste à climat chaud et sec (VOLKOFF et CERRI, 1981, RIBEIRO *et al.*, 1988) et dans l'extrême Sud à climat subtropical (VOLKOFF *et al.*, 1979). Mais on peut aussi en trouver en forêt amazonienne (VOLKOFF *et al.* 1988a). Dans le Nordeste ces sols sont très variés, peu évolués, bruns eutrophes, vertisols, fersiallitiques (fig.5a) et ferrallitiques, ces derniers toujours dans un environnement calcaire. La plupart se trouvent sous une végétation de caatinga mais il existe quelques exemples de sols à humus M sous savane. Dans le Sud ce sont des sols fersiallitiques, des brunizems et des vertisols ; tous sont sous végétation de prairie. En Amazonie il s'agit essentiellement de sols bruns eutrophes ou cambisols eutrophes (fig.5b).

Les sols à Humus H (fig.6) sont les sols hydromorphes (CERRI et VOLKOFF, 1988), relativement peu humifères sous climat tropical (Fig.6a) pouvant devenir tourbeux sous climat subtropical. Dans les horizons A des podzols l'humus s'assimile à un humus H.

Le passage des sols à humus O aux sols à humus U n'est pas brutal. Il existe un large domaine de transition où les sols présentent un humus intermédiaire de type O-U (fig.7). On y observe, par rapport à l'humus O, une diminution de l'humine et corrélativement une augmentation des fractions alcalino-solubles. Ce domaine de transition, qui s'étend de l'Etat de São Paulo à l'Etat de Bahia en traversant le Minas Gerais, correspond à la zone de climat tropical atténué. L'humus O-U est donc lié à un abaissement de la température moyenne mais il n'a aucun lien ni avec la pluvio-

sité puisque celle-ci est extrêmement diversifiée — de 1500 mm à moins de 1000 mm annuels —, ni avec la végétation qui peut être aussi bien la forêt mésophile (fig.7a), que la savane, la forêt semi-décidue ou décidue ou même la steppe à épineux.

Un autre humus de transition particulièrement fréquent est l'humus O-H intermédiaire entre l'humus O et l'humus des sols hydromorphes (fig.8). On note dans ce cas une diminution des acides fulviques libres et une augmentation corrélatrice des fractions alcalino-solubles. Cet humus concerne d'une part de très nombreux sols latéritiques du Brésil Central, notamment ceux qui présentent une morphologie de sols « ferrugineux tropicaux » (fig.8a et b), sols fondamentalement kaoliniques, dans l'ensemble assez fortement désaturés en base, mais relativement peu profonds et à drainage interne médiocre, et d'autre part les sols ferrallitiques à hydromorphie de profondeur d'Amazonie.

Caractéristiques biochimiques : rapport acides humiques/acides fulviques, rapport E4/E6 des acides humiques

La distribution du carbone sur les différentes fractions alcalino-solubles — acides humiques et fulviques extraits au pyrophosphate, acides humiques et fulviques extraits à la soude — n'indique que quelques tendances dont il est difficile de tirer des conclusions générales.

On constate en effet que lorsque l'humus s'enrichit en fractions alcalino-solubles, ce sont toujours les fractions extraites au pyrophosphate et plus spécialement les acides humiques qui augmentent. Les humus U, M et H sont donc relativement plus riches en fractions extraites par le pyrophosphate et plus riches en acides humiques que l'humus O.

On note aussi, et plus particulièrement en ce qui concerne les humus O, que le rapport acides humiques/acides fulviques est globalement bas (inférieur à 1) dans les sols des zones forestières, amazoniennes notamment, et qu'il est égal, ou supérieur à 1, partout ailleurs.

Le rapport E4/E6 des acides humiques montre des différences plus tranchées (tabl.I) ceci concerne aussi bien les acides humiques extraits par le pyrophosphate ou par la soude. En sols neutres, le rapport est toujours faible quelque soit le type de végétation. En sol acides il dépend du drainage et de la végétation. Il est toujours faible dans les sols mal drainés. En sol bien drainé il est élevé sous forêt ombrophile, intermédiaire sous forêt mésophile et forêt subtropicale, faible sous tous les autres types de végétation (savane, caatinga, prairie). Le rapport n'est donc élevé qu'en sol acide sous forêt ombrophile. Ce caractère des acides humiques est donc lié à l'absence de saison sèche car c'est la réduction de la durée de la saison sèche qui détermine, au moins dans la zone de passage de la forêt amazonienne

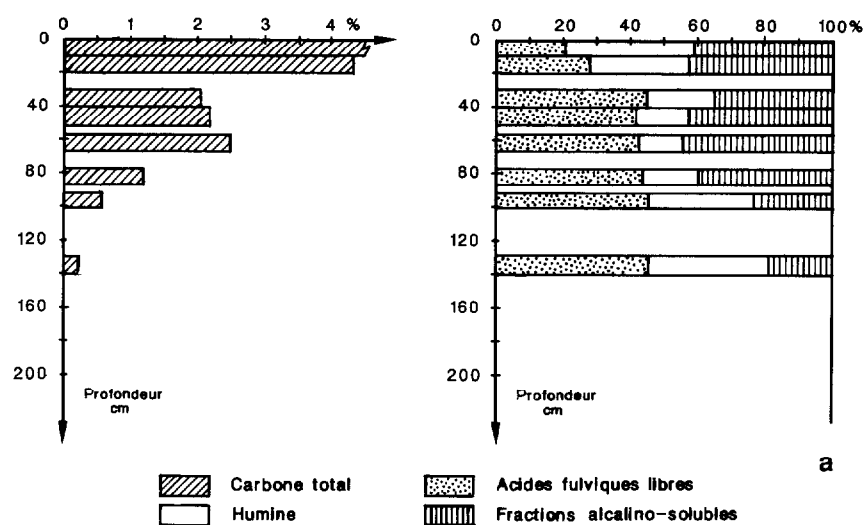


FIG. 4. — Distribution du carbone total et variations de la composition de l'humus avec la profondeur : (a) cambisol sous prairie subtropicale d'altitude

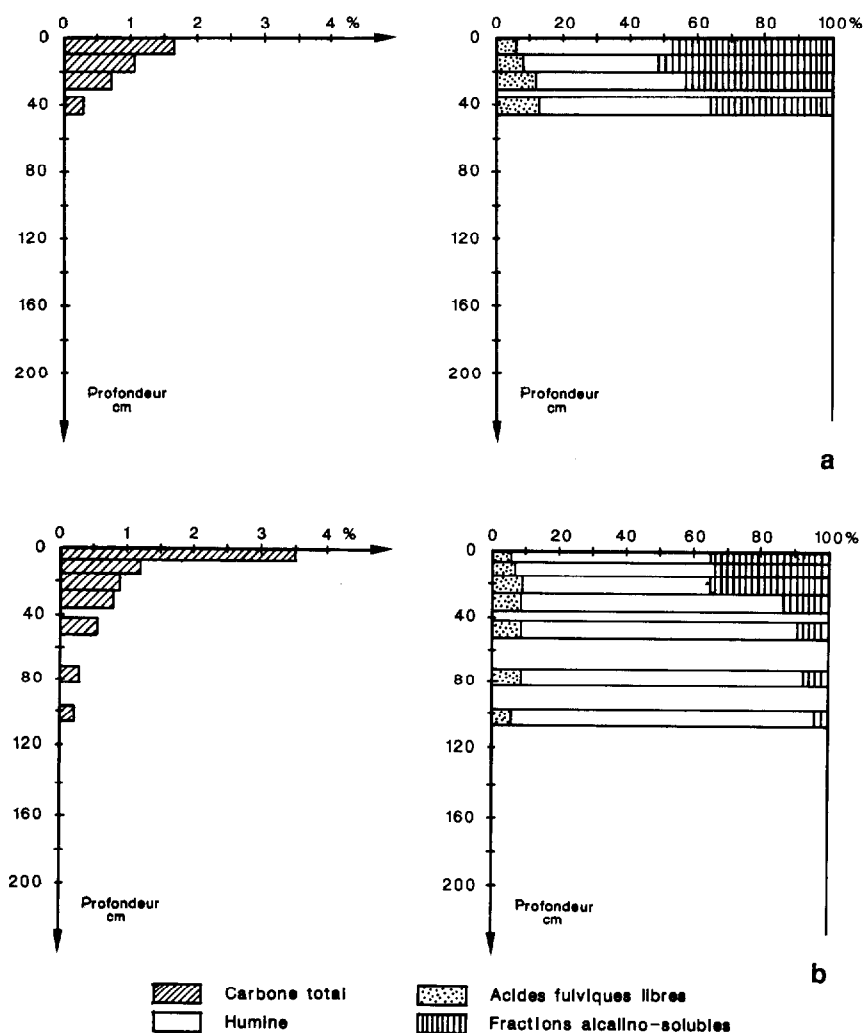


FIG. 5. — Distribution du carbone total et variations de la composition de l'humus avec la profondeur : (a) sol fersiallitique sous steppe à épineux du Nordeste ; (b) cambisol eutrophe sous forêt ombrophile ouverte d'amazone.

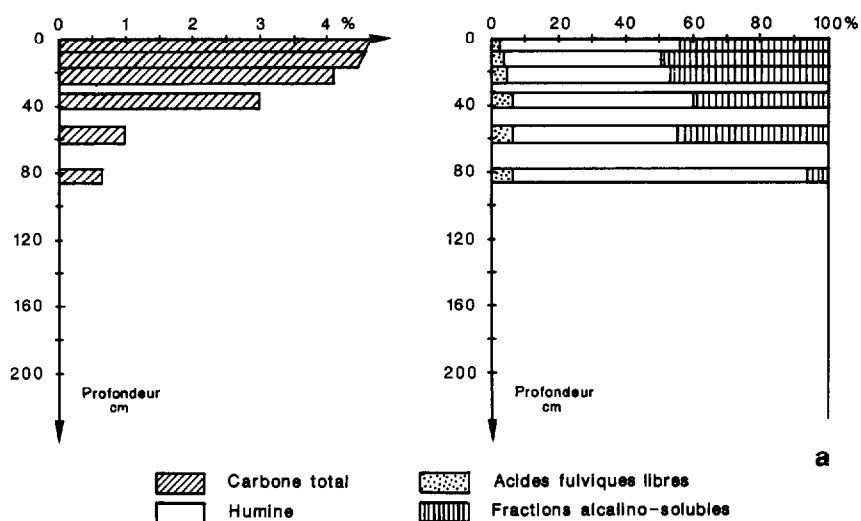


FIG. 6. — Distribution du carbone total et variations de la composition de l'humus avec la profondeur : (a) sol hydromorphe à gley sous savane d'Amazonie.

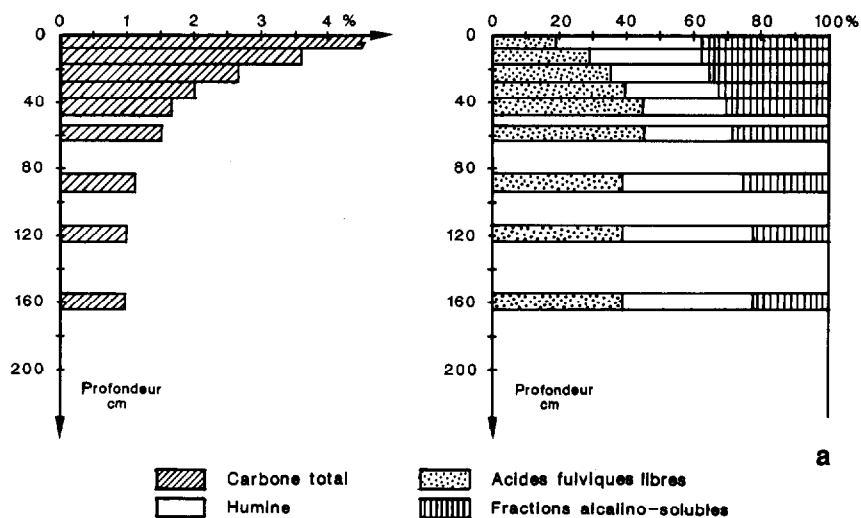


FIG. 7. — Distribution du carbone total et variations de la composition de l'humus avec la profondeur : (a) latosol sous forêt mésophile du Brésil du Sudeste.

TABLEAU I
Rapport E4/E6 des acides humiques de différents sols

Types de sols	E4/E6
Latosols sous forêt ombrophile amazonienne.....	7-8
Sols hydromorphes d'Amazonie.....	4
Cambisols eutrophessous forêt ombrophile amazonienne.....	5
Latosols et sols lateritiques sous savanes du Brésil Central.....	4-5
Latosols et cambisols sous forêt mésophile atlantique et sous forêt subtropicale à Araucarias.....	5-6
Cambisols sous prairie d'altitude.....	4-5
Sols fersiallitiques sous steppe à épineux.....	4

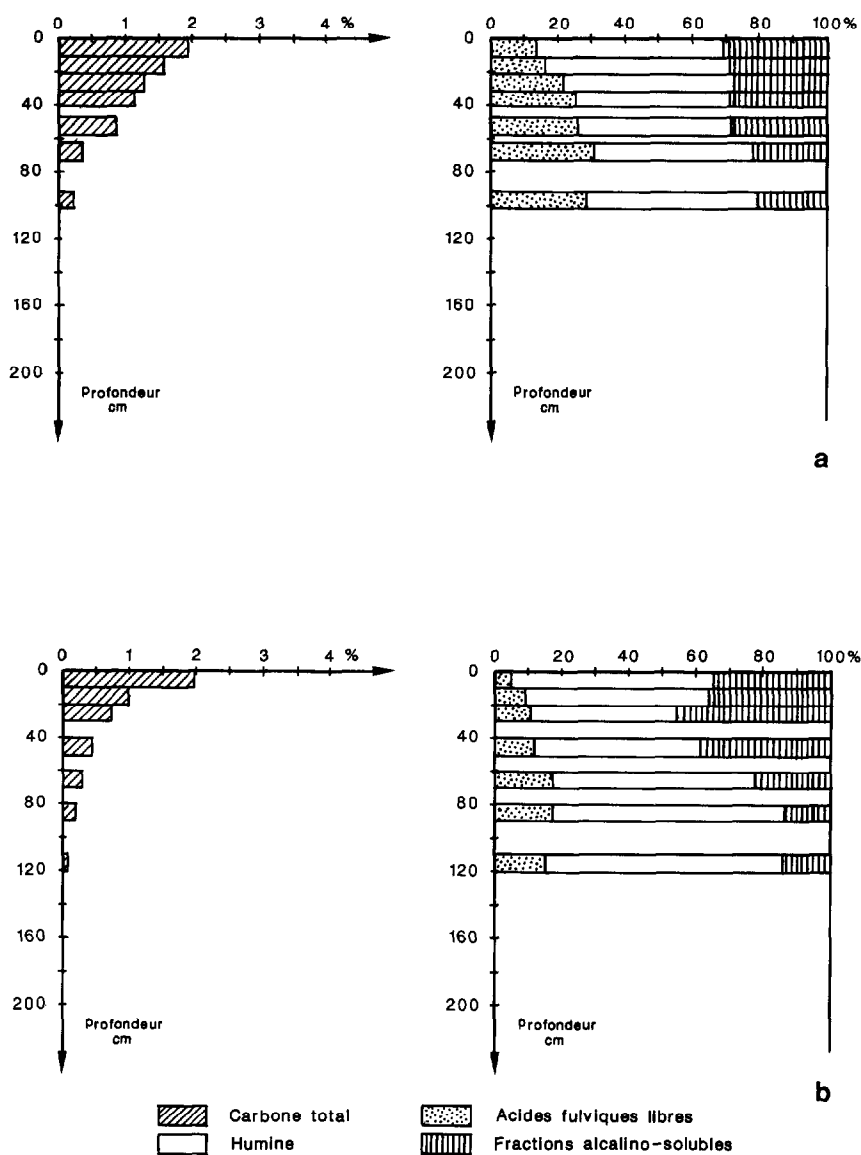


FIG. 8. — Distribution du carbone total et variations de la composition de l'humus avec la profondeur : (a) sol latéritique sur gneiss sous savane du Brésil Central ; (b) sol latéritique sur schistes sous savane du Brésil Central.

aux savanes du Brésil Central l'apparition de la forêt.

Les variations du rapport E4/E6 révèlent ainsi deux états de condensation des acides humiques : grosses molécules lâches en sols bien drainés acides et sous forêt ombrophile, petite molécules denses partout ailleurs, dans les sols sous savane, dans les sols des zones semi-arides du Nordeste (VOLKOFF *et al.*, 1988b), dans les sols saturés et les sols hydromorphes d'Amazonie. Le degré de condensation des acides humiques apprécié à l'aide du rapport E4/E6 apparaît ainsi déterminé par un facteur sécheresse. Ceci est en accord avec les observations faites en milieu forestier guyanais sur le rôle des successions assèchement-réhumectation dans la

polymérisation des acides humiques (TURENNE, 1977).

Etudes isotopiques

En sol acide et bien drainé la composition isotopique de l'humus pris à différentes profondeurs dans un profil n'est pas constante et on montre qu'il y a des variations significatives.

En surface, dans les litières et dans l'horizon A₁₁, il y a toujours un léger enrichissement en ¹³C.

En profondeur, c'est-à-dire les horizons A₁₂, A₃ et B₁, deux cas se présentent selon que le sol est sous forêt ou sous savane.

Sous forêt il y a enrichissement progressif en ¹³C.

Les couches profondes apparaissent ainsi nettement plus riches en ^{13}C que les horizons superficiels (FLEXOR et VOLKOFF, 1977 ; VOLKOFF *et al.*, 1978 ; VOLKOFF *et al.*, 1982).

Sous savane on observe l'inverse : la base des profils est appauvrie par rapport aux horizons de surface (MODENESI *et al.*, 1982 ; VOLKOFF et CERRI, 1987).

Il y a donc un gradient isotopique positif ou négatif suivant que le sol est sous forêt ou sous savane (tabl.II), les concentrations en ^{13}C convergent vers un même taux commun à tous les sols.

Le léger enrichissement isotopique qui accompagne l'évolution des résidus végétaux en surface ne modifie pas fondamentalement l'équilibre isotopique de la végétation. Il y a donc un rapport direct entre la source

de carbone, la végétation, et la matière organique du sol.

Le fait qu'il y ait ensuite variations de la concentration en ^{13}C dans les profils signifie que le carbone de l'humus de profondeur et le carbone de l'humus de surface ont des origines différentes et le fait qu'il y ait convergence vers des mêmes concentrations soit enrichissement isotopique soit appauvrissement signifie que la nature de l'humus de profondeur est indépendante du type de végétation.

Le carbone de l'humus de profondeur peut être hérité ou provenir de l'actuelle végétation : racines, substances organiques mobiles transférées de la surface.

Admettre l'hypothèse de l'héritage d'une matière organique formée au cours d'un épisode paléoclimatique à végétation différente de la végétation actuelle conduirait

TABLEAU II
 $\delta^{13}\text{C}$ dans les horizons A1 et B de différents sols

	Horizon A	Horizon B	Diff.
	----- $\delta\%$ -----		
Latosol (forêt ombrophile dense - amazonie)	-30	-27	+3
Podzol (campinara - Amazonie)	-30	-27	+3
Latosol (forêt ombrophile littorale - Bahia)	-29	-27	+2
Latosol (forêt décidue - Bahia)	-28	-25	+3
Latosol (forêt à Araucaria - Parana)	-26	-23	+3
Cambisol (prairie d'altitude - Minas Gerais)	-16	-22	-4
Brunizem acide (prairie - Rio Grande do Sul)	-17	-20	-3

à admettre d'une part que cet héritage est de même nature sur toute l'étendue du territoire brésilien et d'autre part que le sol est susceptible de conserver très longtemps sa matière organique. Ceci est difficilement acceptable.

Si l'humus de profondeur est le produit de la décomposition des racines de l'actuelle végétation, on peut se demander pourquoi il ne reflète pas la composition isotopique des végétaux auxquels les racines appartiennent ?

L'hypothèse des transferts est la plus plausible. Les sols acides sont en effet des sols à humus riche en substances acido-solubles réputées très mobiles. Cette mobilité est d'ailleurs confirmée par l'abondance de ces substances dans les niveaux d'accumulation profonds (VOLKOFF *et al.*, 1984). De plus on a pu vérifier que sous forêt ces acides fulviques libres sont beaucoup plus riches en ^{13}C que les fractions alcalino-solubles qui gardent une concentration en ^{13}C voisine de celle de la végétation (FLEXOR et VOLKOFF, 1977 ; VOLKOFF *et al.*, 1978). De la migration de ces derniers résulte donc un

enrichissement en ^{13}C des couches profondes. Il se passe probablement la même chose sous savane mais dans ce cas les fractions mobiles qui s'accumulent en profondeur sont appauvries en ^{13}C par rapport à la source végétale initiale.

Tout cela voudrait dire que les substances mobiles stabilisées en profondeur ont leur propre composition isotopique et que celle-ci est indépendante de celle de la végétation. On ignore tout de leur origine. On peut cependant penser qu'elles résultent d'une néogenèse ou d'une évolution par une maturation selon des processus dont on ne connaît pas la nature.

Ces observations font supposer que l'humification suit deux voies distinctes. L'une conserve, ou modifie peu, la composition isotopique initiale de la végétation, l'autre la transforme au contraire considérablement. Les produits de la première se maintiennent dans les horizons A du sol, ceux de la deuxième ne sont observés que dans les sols acides où, après transfert, ils sont stabilisés en profondeur.

CONCLUSIONS

Sous végétation naturelle, il semble donc qu'on ne trouve dans les sols Brésil qu'un nombre limité de types d'humus.

La répartition géographique de ces types montre que sous végétation naturelle l'humus est déterminé par trois facteurs principaux : un externe, la **température**, deux autres propres au sol, l'**acidité** (présence ou absence de bases) et le **drainage** (aération). L'effet de la présence de bases l'emporte toujours sur l'effet des autres facteurs. Lorsque le milieu est acide la différenciation se fait d'abord suivant le drainage, suivant la température ensuite si le milieu reste bien drainé.

On remarque que ces facteurs sont exactement ceux qui déterminent l'activité biologique (pH, aération, température) mais on constate aussi que l'humidité, c'est-à-dire le volume et le régime des précipitations, est sans effets.

L'alternance dessiccation-humectation n'agit, en sols désaturés (qui représentent l'essentiel des sols du Brésil), que sur l'état de polymérisation des fractions alcalino-solubles.

Les études isotopiques montrent, spécialement en milieu acide, et sous forêt comme sous savane, que les humus superficiels et les humus profonds n'ont pas la même origine. Il y aurait deux voies d'humification ; celle qui se manifeste en surface et est certainement

directement liée à l'activité biologique, donne naissance à des substances non ou peu mobiles ; l'autre, dont les mécanismes ne sont pas connus, conduit à la néosynthèse de substances généralement mobiles qui sont stabilisées en profondeur.

Quelles sont les conséquences pratiques de ces observations ?

Elles n'apportent guère de précisions sur les mécanismes des interactions sol-climat-végétation mais elles conduisent à proposer une division du Brésil en unités géographiques dont on peut d'ores et déjà affirmer que le fonctionnement biogéochimique est différent et qu'il est commandé par un certain nombre de facteurs dont on a établi la hiérarchie.

L'action des bases commande l'activité biologique. En conditions acides, lorsque cette activité est ralentie, la température ou le drainage priment sur la pluviosité. Une température élevée et un bon drainage maintiennent une intense minéralisation. Un abaissement de température ou une diminution du drainage provoquent une accumulation d'acides humiques. En milieu acide une partie du carbone est soustraite à l'activité biologique superficielle ; il se forme des substances (surtout acidosolubles) qui diffusent en profondeur. Le régime des pluies n'a d'effet que sur le degré de polymérisation de certains constituants.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 16 février 1989

BIBLIOGRAPHIE

- BOISSEZON de (P.), MOUREAUX (C.), BOCQUEL (G.) et BACHELIER (G.), 1973. — Les sols ferrallitiques. Tome IV. La matière organique dans les sols ferrallitiques. ORSTOM, Paris, *Initiation-Documentations techniques* n° 21, 146 p.
- BRASIL, 1974 à 1981. — Projeto Radam-Brasil. Volume 4 à 12. Departamento nacional da produção mineral, Rio de Janeiro.
- BRASIL, 1981. — Mapa de solos do Brasil na escala a 1/5 000 000. Ministério da agricultura, Empresa brasileira de Pesquisa agropecuária, Serviço nacional de levantamento e conservação de solos, Rio de Janeiro.
- CAMARGO (A.P.) de, ALFONSI (R.R.), PINTO (H.S.) et CHIARINI (J.V.), 1977. — Zoneamento da aptidão climática para culturas comerciais em áreas de Cerrado. In IV Simpósio sobre o Cerrado, Brasília 1976, M.G. Ferri coordenador. USP (Reconquista do Brasil, v.38) São Paulo : 89-105.
- CERRI (C.C.) et VOLKOFF (B.), 1987a. — Organic content in a yellow Latosol of central Amazon rain forest. *Acta Oecologica, Oecologia Generalis*, 8(1) : 29-42.
- CERRI (C.C.) et VOLKOFF (B.), 1987b. — A matéria orgânica de alguns solos dos campos inundáveis da Ilha de Marajó. *Rev. bras. de Ciencia do solo* (à paraître).
- DABIN (B.), 1971. — Etude d'une méthode d'extraction des matières humiques du sol. *Sciences du Sol*, Versailles, n° 1 : 47-63.
- DABIN (B.), 1981. — Les matières organiques dans les sols tropicaux normalement drainés. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 18(3-4) : 197-215.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1977. — 1. Pédogenèse et classification. In *Pédologie*, sous la direction de Ph. Duchaufour et B. Souchier, Masson, Paris, 477 p.
- FLEXOR (J.M.) et VOLKOFF (B.), 1977. — Distribution de l'isotope stable ^{13}C dans la matière organique d'un sol ferrallitique de l'Etat de Bahia, Brésil, C.R.Ac.Sc. Paris, sér. D, t. 284, 2 mai 1977 : 1655-1657.

- HATCH (B.) et SLACK (C.R.), 1966. — Photosynthesis by sugar cane leaves. A new carboxylation reaction in the pathway of sugar formation. *J. Biochem.*, 101 : 103-111.
- KONONOVA (M.M.), 1966. — Soil Organic Matter. Pergamon Press Ltd, Oxford, 544 p.
- MANARINO (R.), VOLKOFF (B.) et CERRI (C.C.), 1982. — Comparação do húmus de capoeira e de floresta natural em latossolos amarelos da região amazônica. In Anais do Colóquio regional sobre matéria orgânica do solo, CENA, Piracicaba, SP, Brasil, 1982 : 51-57.
- MODENESI (M.C.), MATSUI (E.) et VOLKOFF (B.), 1982. — Relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ nos horizontes húmiferos superficiais e nos horizontes escuros profundos dos solos de campo e mata da região de Campos do Jordão, São Paulo. In Anais do Colóquio regional sobre matéria orgânica do solo, CENA, Piracicaba, SP, Brasil, 1982 : 155-160.
- PERRAUD (A.), 1971. — La matière organique des sols forestiers de la Côte d'Ivoire. Thèse Univ. de Nancy, ORSTOM, Paris.
- RIBEIRO (L.P.), VOLKOFF (B.) et MELFI (A.J.), 1988. — Caracterização mineralógica e orgânica dos vertissolos ácidos do Recôncavo baiano (à paraître).
- SANCHEZ (P.A.), GICHURU (M.P.) et KATZ (L.B.), 1982. — Non-Symbiotic Nitrogen Fixation and Organic Matter in the Tropics. 12th International Congress of Soil Science, New Delhi, 8-16 february 1982, Symposia Paper I, 1 : 99-114.
- STEVENSON (F.J.), 1982. — Humus chemistry. John Wiley et Sons, New York, 443 p.
- STEVENSON (F.J.), 1986. — Cycles of soils. John Wiley et Sons, New York, 380 p.
- TENHUNEN (J.D.), TENHUNEN (L.C.), ZIEGLER (H.), STICHLER (W.) et LANGE (O.L.), 1983. — Variation in carbon isotope ratios of Euphorbia species from different habitats of Tenerife in spring. *Flora*, 173(5/6) : 363-370.
- TURENNE (J.F.), 1977. — Modes d'humification et différenciation podzolique dans deux toposéquences guyanaises. *Mémoire ORSTOM* n° 84, Paris, 173 p.
- VOLKOFF (B.), 1977. — La matière organique des sols ferrallitiques du Nordeste du Brésil. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol. XV(3) : 275-289.
- VOLKOFF (B.), 1985. — Organisations régionales de la couverture pédologique du Brésil. Chronologie des différenciations. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol. XXI(4) : 225-236.
- VOLKOFF (B.) et ANDRADE (M.J.) de, 1976. — Caracterização da matéria orgânica de alguns solos ferralíticos do Estado da Bahia : aplicação de um método de fracionamento das substâncias húmicas. In Anais do décimo quinto congresso brasileiro de ciência do solo, Campinas, Julho 1975. Sociedade brasileira de Ciência do solo : 119-126.
- VOLKOFF (B.) et CERRI (C.C.), 1978. — Quelques propriétés de l'humus d'un sol ferrallitique humifère sur granite du Paraná (Brésil). *Science du Sol*, n° 4 : 269-280.
- VOLKOFF (B.) et CERRI (C.C.), 1980. — Comparação de húmus de um solontchak, um rendzina e um solo lítólico da região semi-árida do Rio Grande do Norte. *Rev. bras. de Ciência do solo*, Vol.4(1) : 49-59.
- VOLKOFF (B.) et CERRI (C.C.), 1981. — Húmus em solos da floresta amazônica na região do rio Madeira. *Rev. bras. de Ciência do solo*, Vol.(5) : 15-21.
- VOLKOFF (B.) et CERRI (C.C.), 1987. — Carbon isotopic fractionation in subtropical brazilian grassland soils. Comparison with tropical forest soils. *Plant and Soil*, 102 : 27-31.
- VOLKOFF (B.), MATSUI (E.) et CERRI (C.C.), 1982. — Discriminação isotópica do carbono nos húmus de latossolo e podzol da região amazônica do Brasil. In Anais do Colóquio regional sobre matéria orgânica do solo, CENA, Piracicaba, SP, Brasil, 1982 : 147-153.
- VOLKOFF (B.), MELFI (A.J.) et CERRI (C.C.), 1979. — Les sols sur roches cristallines formés sous climat subtropical au Brésil. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XVII(3) : 163-183.
- VOLKOFF (B.), CERRI (C.C.) et MELFI (A.J.), 1984. — Húmus e mineralogia dos horizontes superiores de três solos de campo de altitude dos estados de Minas Gerais, Paraná et Santa Catarina. *Rev. bras. de Ciência do solo*, 8 : 277-283.
- VOLKOFF (B.), CERRI (C.C.) et MELFI (A.J.), 1988a. — Cambissolos eutróficos e solos associados do Alto Rio Purus (à paraître).
- VOLKOFF (B.), POLO (A.) et CERRI (C.C.), 1988b. — Características bioquímicas des acides humiques des sols tropicaux du Brésil. Distinction fondamentale entre les sols équatoriaux et les sols des régions à climat tropical contrasté. *C.R.Ac.Sc.*, Paris, t.307, sér.II : 95-100.
- VOLKOFF (B.), FLEXOR (J.M.), SANTA ISABEL (L.) et SANTA ISABEL (M.), 1978. — Natureza do húmus nos latossolos distróficos da Bahia. *Rev. bras. de Ciência do solo*, Vol. 2(1) : 59-63.