

13

Les andosols noirs d'altitude : matériaux bioformés marqueurs des végétations passées

Didier Dubroeuq, Marie-Pierre Ledru

Introduction

Les andosols noirs des prairies subalpines, nommés *Melanudands* dans la taxonomie des sols américaine (Soil Survey Staff, 1990), sont des sols volcaniques à teneur élevée en matière organique. Ils ont fait l'objet d'un intérêt particulier pour leur rôle de fixateur de carbone organique, analogue à celui des tourbes, et pour leur minéralogie, essentiellement composée de carbone et de minéraux silico-alumineux paracrystallins. D'abord étudiés dans les zones froides en Alaska, ces sols ont montré une étroite relation dans l'espace et dans le temps avec l'expansion de la prairie à *Calamagrostis canadensis* (Shogi *et al.*, 1988). Étudiés ensuite au Japon, ces sols ont montré leur dépendance avec la pelouse graminéenne à *Miscanthus sinensis*, tant sur le plan de la distribution des sols que des caractères de leur matière organique. Les sols voisins sous une chênaie à *Quercus serrata* ont en effet des caractères différents bien que provenant d'un même matériau pyroclastique (Shogi *et al.*, 1990).

Au Mexique, sur les versants humides du volcan Cofre-de-Perote, État de Veracruz, les andosols noirs prennent une grande importance entre 2 000 et 3 500 m d'altitude, par leur extension et leur épaisseur dans certaines parties de la topographie. On les trouve naturellement sous une forêt claire de pins avec un tapis herbacé très dense où domine une graminée pérenne du genre *Mulhembergia* (*Mulhembergia macroura*). Ces sols ont d'abord été étudiés pour leurs propriétés physiques particulièrement intéressantes vis-à-vis de l'eau. Ils peuvent stocker jusqu'à 120 litres d'eau disponibles par m² sur une profondeur de 1,50 m et cette capacité est indépendante de la saison (Dubroeuq *et al.*, 1992). D'un

point de vue écologique, l'hygroscopicité des andosols noirs d'altitude est fondamentale, car elle a pour effet de réguler le drainage et d'alimenter des écoulements d'eau permanents sur la majeure partie du massif volcanique. Une deuxième particularité de ces sols est leur résistance à la décomposition bactérienne qui se traduit par une accumulation verticale de produits organiques riches en carbone issus de la décomposition des végétaux par l'activité biologique. La stabilité de ces composés conduit à l'immobilisation de quantités importantes de carbone dans les sols et, localement, ces composés organiques peuvent s'accumuler dans les zones basses du paysage. Nous sommes donc en présence d'un des rares cas où il existe une bonne corrélation entre la chronologie des couches du sol et leur profondeur et où les teneurs en carbone organique sont suffisantes à tous les niveaux pour permettre des datations au ¹⁴C.

Notre étude s'appuie sur cette dernière particularité. Elle vise à préciser les causes et le processus de l'accumulation de matière organique par des observations microscopiques. Ensuite, par les datations, nous avons étudié la durée et l'importance du phénomène et enfin, par l'analyse des pollens, nous avons reconstitué les écosystèmes qui ont présidé aux diverses phases de la formation du sol.

Matériel et méthodes

Environnement

Cette étude a été réalisée au Mexique, dans l'État de Veracruz, en région volcanique vers 3 100 m d'altitude. Le site est localisé sur le flan sud-est du volcan Cofre-de-Perote, un des édifices majeurs de la bordure est de l'axe

néovolcanique central mexicain. Les andosols noirs se répartissent de préférence sur les replats de la topographie, le long des versants les plus humides orientés Est vers la façade atlantique. Dans ces situations les précipitations sont environ de 2 000 à 3 000 mm selon l'altitude et la couverture nuageuse est semi-permanente. La végétation naturelle est une forêt claire de pins (*Pinus harve-gii*, *Pinus montezumae*) avec un tapis herbacé épais et relativement haut (50-80 cm) essentiellement constitué de graminées pérennes (*Mulhembergia macroura* et *Stipa* sp.)

Aspect général du sol

Le profil donné comme exemple est celui d'un sol profond de couleur noire jusqu'à 220 cm de profondeur, devenant ensuite jaune et argileux avec des boules de roche. Ce niveau plus argileux est en fait la partie supérieure altérée d'un flux de cendres et de blocs de type avalanche dont l'épaisseur varie entre 10 et 20 m. Le sol est structuré en horizons distincts (Figure 1) : de 0 à 120 cm des horizons noirs très friables constitués de microagrégats d'environ 0,1 mm, de 120 à 220 cm un horizon noir très massif et à consistance pâteuse traversé par des galeries de vers de terre, de 220 à 300 cm de profondeur on observe des horizons jaunes argileux traversés par des chenaux subhorizontaux remplis de matière noire analogue à celle de l'horizon noir sus-jacent. Cette disposition suggère l'existence d'une circulation latérale des produits organiques noirs à la base du sol.

Une séquence de cinq fosses avec des sondages intermédiaires permet de reconstituer en coupe la distribution des horizons du sol dans un segment topographique de 120 m de long pour un dénivelé de 8 m (Figure 2). Cette coupe longitudinale permet de constater que le sol noir se forme dans les couches de cendres qui recouvrent le matériau pyroclastique grossier et qu'il se développe préférentiellement dans les parties concaves de la topographie. Là, le matériau noir finit par remplacer totalement la cendre qui ne subsiste plus que sous forme de plages discontinues. La distribution de la couverture graminéenne se surimpose à celle du sol noir. Elle a tendance à disparaître sur les fortes pentes à l'amont et à prendre son développement optimum dans la partie concave à l'aval du segment topographique.

Méthodes

Observation préliminaire de lames minces de sol sous microscope pétrographique. Observation sélective de la partie microagrégée du sol en microscopie à balayage à l'aide d'un microscope Cambridge Stereoscan 200 équipé d'une microsonde EDX à rayons X. Les observations ont été réalisées à l'ORSTOM par A. Bouleau, sous des grossissements de 1 000 à 5 000 et sur de très fins fragments de sol non perturbés, fixés sur film de carbone puis métallisés à l'or. La partie inférieure du sol noir, amorphe et non structurée, a été observée en microscopie électronique à transmission par sédimentation de

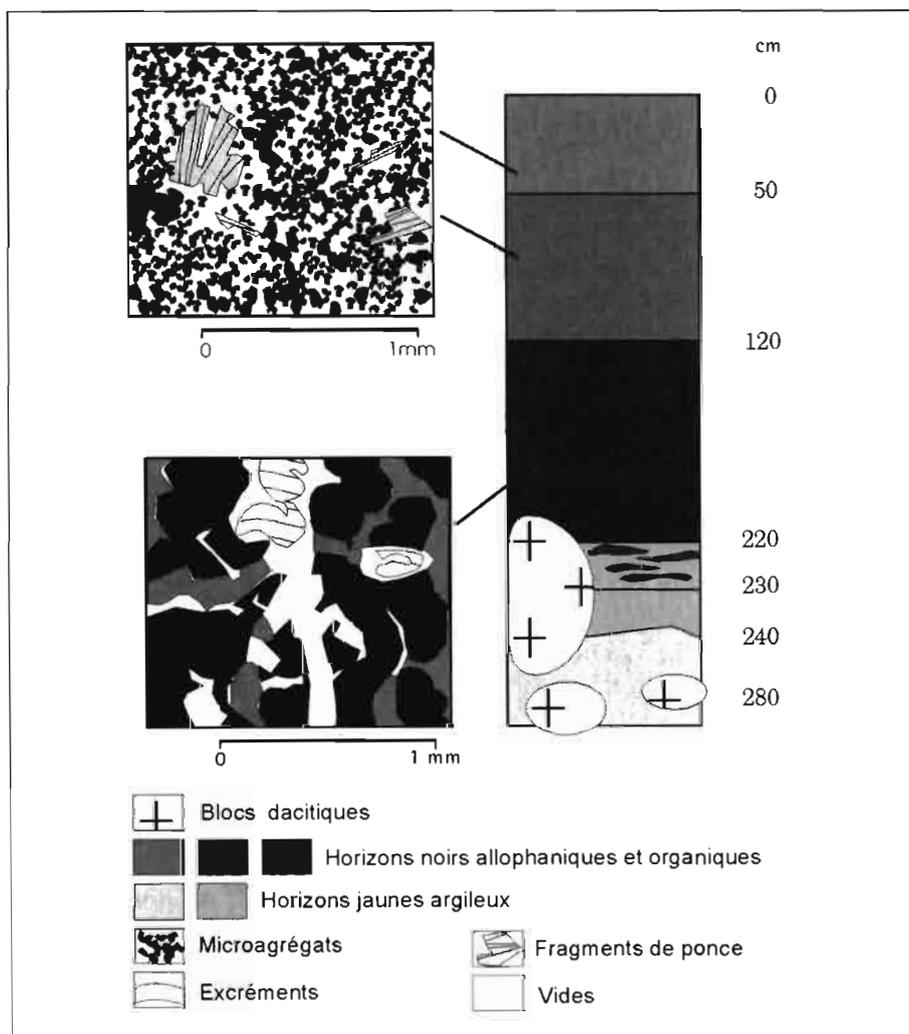


Figure 1
La partie supérieure du profil de sol noir est constituée presque exclusivement de microagrégats organiques de 0,05 à 0,1 mm de diamètre et de fragments de ponces. La partie inférieure du sol noir est très massive et à consistance pâteuse, traversée par des galeries de vers de terre.

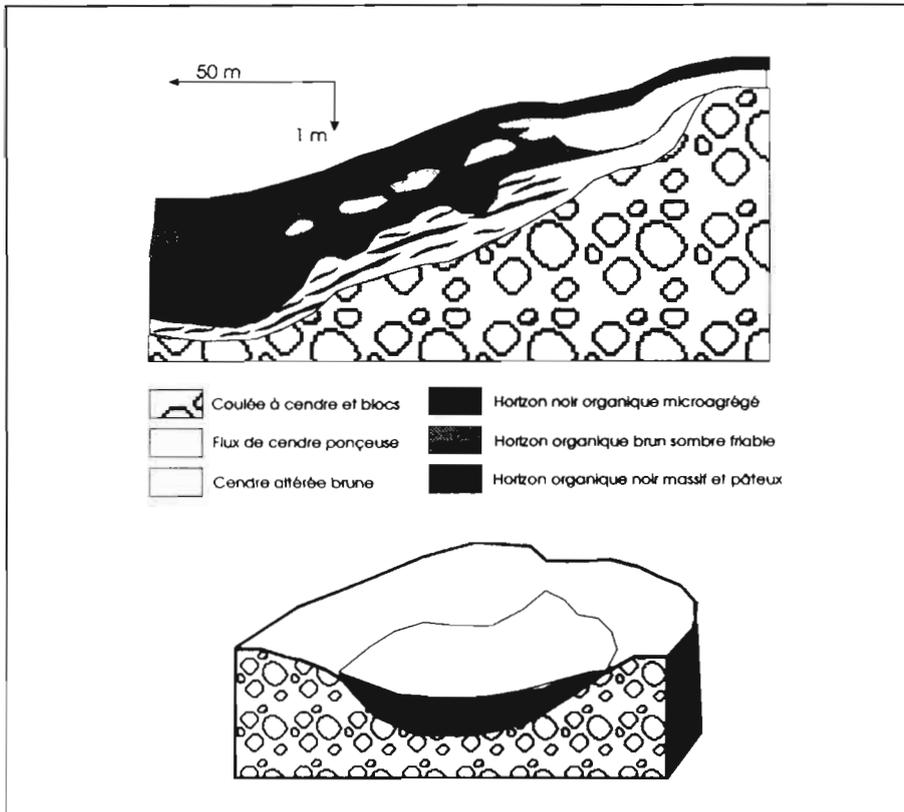


Figure 2

Le sol noir se forme dans les couches de cendre qui recouvrent un matériau pyroclastique grossier. De l'aval vers l'amont, le matériau organique noir remplace progressivement le matériau cendré. Les andosols noirs se répartissent de préférence dans les creux de la topographie

particules en suspension sous des grossissements de 20 000 à l'aide d'un appareil Jeol 100 U.

Les datations ont été réalisées à l'ORSTOM par M. Fournier, chacune sur 400 g de sol, par calcination, récupération du gaz carbonique sous forme de benzène et mesure des masses atomiques par scintillation liquide à l'aide d'un analyseur Packard Instrument Tricarb 2260 XL.

Les analyses minéralogiques par diffraction X ont été réalisées à l'ORSTOM par G. Millot, à l'aide d'un diffractomètre Siemens D 500 avec anticathode de cuivre, sur poudre de sol total et sur fraction fine inf. à 2 µm après oxydation de la matière organique par H₂O₂.

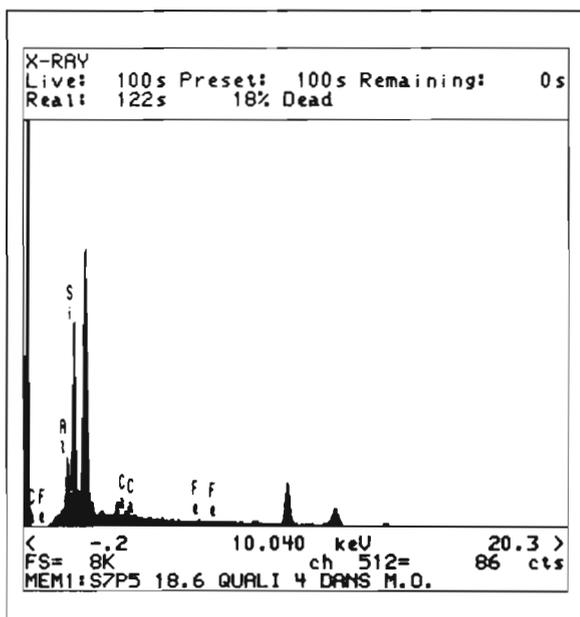


Figure 3 Microanalyse de la partie superficielle d'une boulette. Le pic non identifié correspond à l'or de la métallisation.

L'analyse palynologique a été réalisée à l'ORSTOM sur des fractions des quatre échantillons destinés aux datations. Ces échantillons ont subi un traitement à l'acide nitrique (technique de Lüber) et à la potasse 1% destiné à détruire la matière organique avant de procéder à la séparation des grains de pollen à l'aide d'une liqueur dense de chlorure de zinc. Les culots de pollens montés entre lame et lamelle ont été observés au microscope sous des grossissements de 400 et 1 000. Environ 200 grains en moyenne ont été comptés par échantillon.

Résultats

La constitution du sol

Le sol noir présente des teneurs élevées en carbone, de 10 à 15% du poids de sol sec en ce qui concerne la partie noire du profil, de 0 à 220 cm de profondeur. On constate également que ce sol ne contient pas d'argiles minéralogiques. Les spectres de diffraction de la fraction fine du sol ne montrent aucun pic d'argile, les minéraux argileux sont donc entièrement sous forme paracrystalline ou amorphe. En revanche la poudre de sol comporte des quantités importantes de minéraux résiduels des cendres, essentiellement des verres et des plagioclases (Figure 3).

Vus en microscopie électronique à balayage, les microagrégats de la partie supérieure du sol noir sont des boulettes de 20 à 60 µm de diamètre, à centre creux et à structure foliée, dont la partie externe est couverte d'un mucus riche en silice (Photo a). Accolés aux boulettes, on observe les fragments de verre volcanique et de ponce résiduels des cendres et qui n'ont pas été incorporés (Photo b). De telles structures sont d'origine faunique et correspondent, par leur taille et leur aspect, aux boulettes fécales d'*Enchytraeidea* (Barois et al., 1994).

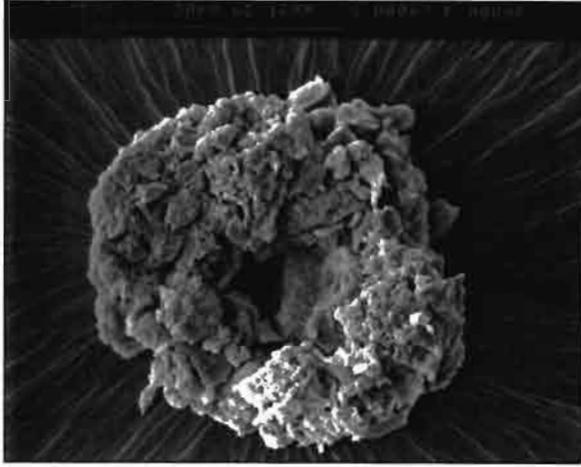


Photo a : Les microagrégats sont des boulettes de 20 à 60 μm de diamètre à centre creux et à structure foliée, dont la partie externe est couverte d'un mucus riche en silice. Ils sont d'origine faunique.



Photo b : Les fragments grossiers de ponce et de verre volcanique résiduels des cendres ne sont pas incorporés aux boulettes.

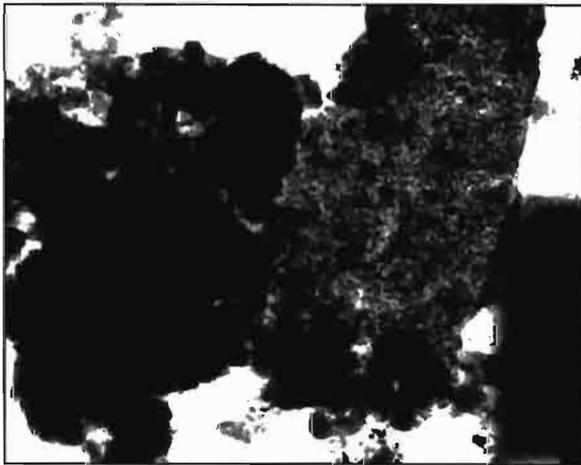


Photo c : La partie inférieure du sol noir se compose essentiellement de gels silico-alumineux et de flocons de matière organique de 0,2 μm environ. Les gels se condensent en amas de sphérules creuses de 5 nm de diamètre attribués à de l'allophane. La hauteur de la photo correspond à une échelle de 2 μm .

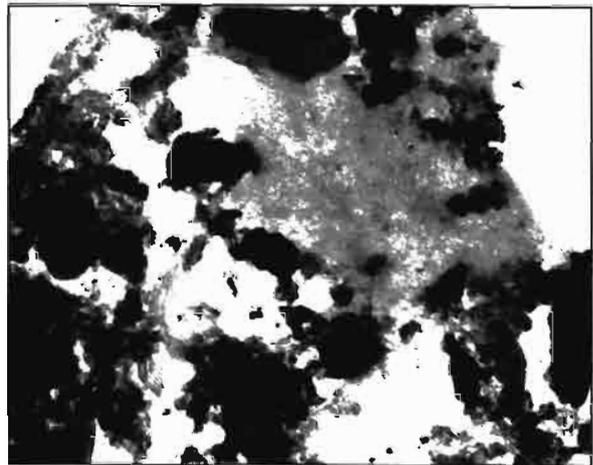


Photo d : Sur le pourtour des gels on distingue des tubes creux de 10 nm de diamètre attribués à de l'halloysite. La hauteur de la photo correspond à une échelle de 2 μm .

Observée en microscopie électronique à transmission, la partie inférieure du sol noir, non structurée et d'aspect pâteux, se compose essentiellement de gels silico-alumineux mêlés à des fragments de matière organique arrondis en flocons de 0,2 μm environ. Les gels se condensent par endroit en amas de sphérules creuses de 5 nanomètres de diamètre attribués à de l'allophane (Photo c). On distingue également, au voisinage des gels, quelques tubes creux de 10 nanomètres de section environ et attribués à de l'halloysite (Photo d).

L'âge des couches du sol

La série de datations des différents horizons du sol noir de référence a donné les âges suivants, en années BP :

À l'exception du niveau 4, les horizons du sol noir présentent une certaine continuité chronologique. Le rajeunissement de la partie inférieure du sol s'explique

par les apports latéraux de matière amorphe circulant par la macroporosité du sol et venant s'accumuler dans les parties concaves de la topographie. À ce niveau il est vraisemblable que les produits organiques en place soient plus anciens que l'âge moyen de l'échantillon global.

L'analyse palynologique

Les résultats de l'analyse, exprimés en pourcentage par rapport à la somme totale des pollens d'arbres et d'herbacées, les spores de fougères (Monolete, Trilete, Polypode, Lycopode) étant exclus, sont présentés dans le Tableau 1. Les variations les plus significatives (Figure 4) concernent les graminées, avec une nette prédominance dans les niveaux 4 et 2 et l'apparition de polypode dans les niveaux 3 et 4 en synchronisme avec le développement des chênes et des aulnes dans la forêt mixte. À l'inverse des graminées les chénopodes se déve-

Niveau	Profondeur (cm)	âge	échantillon
1	20	790 \pm 80	OBDY 1431
2	80	2690 \pm 40	OBDY 1461
3	130	7550 \pm 40	OBDY 1463
4	210	7490 \pm 50	OBDY 1429

Niveau	1	2	3	4
<i>Pinus</i>	73,0	50,0	62,0	49,5
<i>Alnus</i>	14,0	19,0	24,0	17,0
<i>Quercus</i>	1,3	3,9	2,6	2,2
Verbenaceae	-	0,4	-	1,6
Humiriaceae	-	0,8	-	-
<i>Solanum</i>	-	-	0,3	-
Poaceae	4,7	24,0	4,1	20,5
Asteraceae	4,7	17,0	5,0	8,3
Apiaceae	1,2	-	0,4	0,5
Chenopodiaceae	0,6	0,4	0,7	-
<i>Ludwigia</i>	-	0,4	-	-
<i>Monolete</i>	0,3	2,6	5,0	3,8
<i>Trilete</i>	1,9	7	2,6	-
<i>Lycopodium</i>	0,9	1,7	2,6	1
<i>Polypodium</i>	-	3,5	2,2	-
Varia	2,8	5,0	9,0	4,5
Total	100,0	100,0	100,0	100,0

Tableau 1 Analyse palynologique des niveaux 1 à 4 du sol, respectivement à 20 cm, 80 cm, 130 cm et 210 cm de profondeur.

loppent dans les niveaux 3 et 1 du sol. La prédominance de certaines espèces comme les pins s'explique par la forte dissémination de leurs pollens et leur proportion n'est pas à prendre en absolu.

Interprétation et conclusion

La présence d'agrégats à structure d'excréments ainsi que la continuité chronologique des horizons du sol suggèrent une construction biologique du sol. La relative stabilité des composés organiques, qui retient toute décomposition et permet leur accumulation, peut s'expliquer en partie par la structure des boulettes fécales et par leur enveloppe muqueuse riche en silice. Toutefois, dans les horizons profonds du sol, la persistance de l'eau et l'abondance des produits amorphes finit par faire disparaître les microagrégats. Dans ces conditions, les pollens conservés dans les couches du sol permettent une reconstitution des variations de la végétation pendant une période qui se situe depuis 7 550 BP jusqu'à nos jours. L'âge du niveau 4 est antérieur à cette période. L'âge mesuré de 7 490 BP ne peut être pris en considération à cause du rajeunissement provoqué par les apports latéraux de produits organo-minéraux amorphes.

Avant 7 500 BP prédomine une forêt claire à chênes et aulnes. Le tapis herbacé, principalement graminéen, est caractéristique de conditions climatiques relativement sèches.

Vers 7 500 BP la proportion de la forêt de chênes et d'aulnes augmente au détriment de la prairie à graminées. La présence de *Ludwigia* et de *Polypodium* atteste d'une forte humidité et de la présence de zones marécageuses.

Vers 2 700 BP la prairie se développe à nouveau mais les conditions climatiques ne sont pas aussi sèches qu'avant 7 500 BP car les fougères persistent. Les composées réapparaissent à nouveau.

Vers 800 BP le paysage se caractérise par une forêt de pins avec des aulnes. Les chênes et les fougères ont disparu. Le tapis herbacé est réduit, sans doute par la persistance de conditions plus sèches et par la prédominance des pins.

Actuellement on assiste à une destruction anthropique progressive de la forêt de pins par abattage et une diminution de la prairie à *Mulhembergia macroura* par brûlis et arrachage pour la mise en culture.

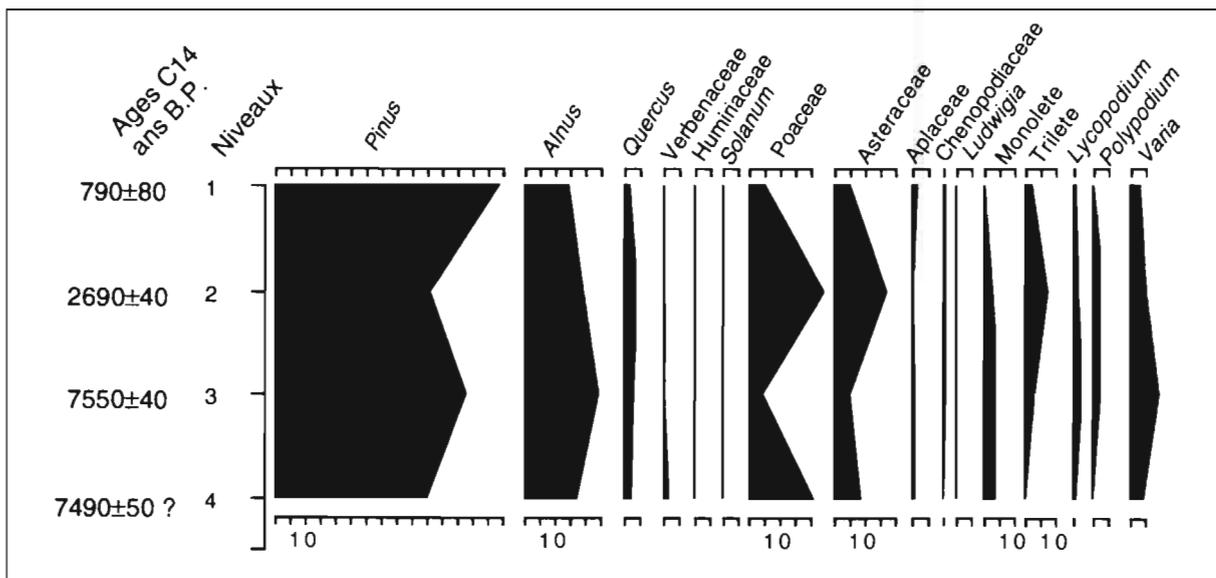


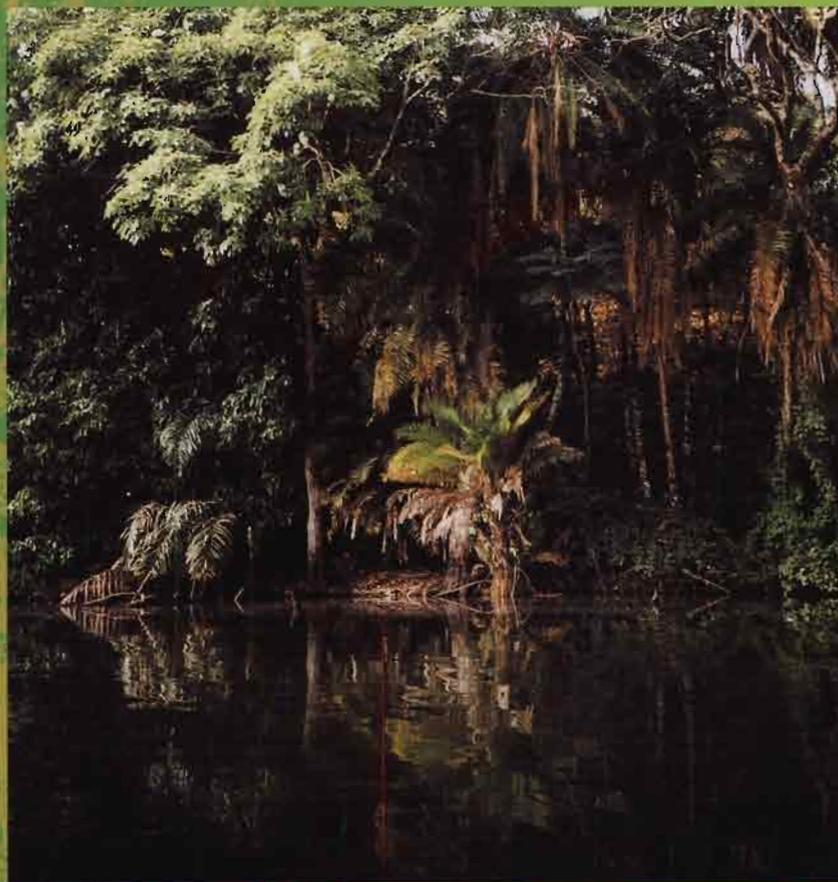
Figure 4 Diagramme palynologique du profil d'andosol noir du volcan Cofre-de-Perote.

Références

- Dubroeuq, D. ; Campos, A. ; Geissert, D. 1992.
Comportamiento de los Andosoles negros respecto al agua en el volcán Cofre-de-Perote. *Terra*, **10** (1), 51-58
- Barois, I. ; Rojas, P. ; Dubroeuq, D. 1994. Soil formation under *Mulhembergia macroura* linked with the fauna. *15^e Congreso Internacional de la Ciencia del Suelo*, Acapulco, Mexico, 10-16 juillet 1994. *Transact.*, **6b**, 147-148.
- Shogi, S. ; Kurebayashi, T. ; Yamada, I. 1990. Growth and chemical composition of Japanese pampa grass *Miscanthus sinensis* with special reference to the formation of dark colored Andisols in northeastern Japan. *Soil Sci. Plant. Nutr.*, **36**, 105-120.
- Shogi, S. ; Takahashi, T. ; Ito, T. ; Ping, C. L. 1988. Properties and classification of selected volcanic ash soils from Kenai Peninsula, Alaska. *Soil Sci.* **145**, 395-413.
- Soil Survey Staff. 1990. *Keys to Soil Taxonomy*, 4th edition, AID, *USDA-SMSS technical Monograph*, **19**, 422 p., Virginia (USA), Blacksburg.

Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux

MICHEL SERVANT, SIMONE SERVANT-VILDARY,
ÉDITEURS SCIENTIFIQUES



IRD

UNESCO

MAB

CRS



Les responsables d'édition adressent leurs sincères remerciements à
Christian Levêque, Samy Mankoto, Bernard Riéra et Léo Rona-Beaulieu.

Ouvrage publié avec le soutien de :

Centre national de la recherche scientifique, Programme Environnement,
vie et sociétés, 3, rue Michel-Ange, F-75016 Paris

UNESCO, 7 place de Fontenoy, F-75007 Paris
Programme sur l'Homme et la Biosphère (MAB)
Projet PNUD ZAI/97/001-ERAIFT

Ministère des affaires étrangères
Comité MAB France

IRD (Institut de recherche pour le développement),
313, rue Lafayette, F-75010 Paris

ISBN 92-3-203753-X
Mise en page : Valérie Herman
Impression : Imprimerie Jouve
Photo de couverture : Lac Tabéré, Adamaoua, Cameroun

© UNESCO 2000