

## Rôle des nappes dans les différenciations pédologiques des zones à podzols de l'Amazonie

Boris VOLKOFF, Jefferson MORTATTI et Carlos CERRI

**Résumé** – Les podzols du bassin du Rio Negro en Amazonie occupent des plateaux sableux où une végétation rase et clairsemée, appelée campina, alterne avec la forêt. La campina correspond aux zones à podzols géants à alios très profond, alors que la forêt est associée à des podzols à alios peu profond. La plupart de ces derniers proviennent de la transformation de podzols géants. On montre que l'existence du podzol à alios peu profond, et celle de la forêt qui l'accompagne, est liée à un affleurement permanent de la nappe phréatique. La transformation des podzols géants et la colonisation de la campina par la forêt apparaissent, dans ces conditions, comme les conséquences d'une remontée générale du niveau des nappes de la région.

### The role of groundwaters in the pedological differentiation observed in the Amazonian podzol areas

**Abstract** – Podzols situated in the Rio Negro basin in Amazonia occupy sandy plateaus, where an open and sparse vegetation called campina alternates with the forest. The campina corresponds to giant podzols with very deep alios, while the forest is characterised by podzols with shallow alios. Most of the latter result from the transformation of giant podzols. It is shown that the podzol with shallow alios, and its related forest, is linked to the permanent high water table. The transformation of these giant podzols and the colonization of the campina by the forest seem to result from a general rise in the level of the local groundwaters.

**Abridged English Version** – Podzols from the Rio Negro Basin (Amazonia) (Fig. 1) ([1], [2], [3]), where mean annual rainfall is high (3,000 mm) [1], are characterized by two types of vegetation, either the forest or a clear bush formation called as campina. In the giant podzols under campina, the groundwater level varies with the seasons, from the soil surface to depths which could even be higher than 10 m, whereas in the podzols under forest, which are characterized by shallow alios, the groundwater level remains permanently near the surface [4]. It was supposed that in the giant podzols, the general water table fluctuates and rises to the soil surface when rainfalls are at their maximum. In the other podzols, the semi-permeable and shallow alios will retain permanently perched water near the surface. This perched water will then be independent of the phreatic water and will therefore be at the origin of afforestation and of the development of peat bogs, often associated with podzols in these areas. The question is whether the groundwater of podzols under forest is a perched water independent of the phreatic water and whether, consequently, the emplacement of the groundwater is subsequent to the formation of the secondary alios within the giant podzol originally under campina. Isotopic methods used to study the recharge [5], the water movement within the soil ([6], [7], [8]); and the origin of river water [9], contributed also to the analysis behaviour of groundwater in these Amazonian podzols. The methodology is based on the fact that  $^{18}\text{O}$  and D concentrations in rain water show high seasonal variability in the region. This seasonal variability is reduced in the rivers, without leading to time modifications (Fig. 2) [10]. It is supposed that the mixture of rain water with groundwater is not instantaneous and that differences in isotopic concentrations between juvenile phreatic water and older river water can be easily detected. The sampling took place in June 1985 and in June 1988. In June 1985, samples were collected from groundwater in podzols, and from rivers in four different stations over 10 days. The campaign, conducted in June 1988

Note présentée par Georges PEDRO.

0764-4450/90/03101361 \$ 2.00 © Académie des Sciences

in a single site, covered with forest and campina, allowed comparison of rain water, groundwater and river water.  $^{18}\text{O}$  and D concentrations are defined according to Standard Mean Ocean Water (SMOW) in  $\delta$  (‰) [11]. All the results follow the meteoric water line  $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$  (Figs. 3 and 4) [11], [12]. In 1985 (Fig. 3), all the rivers and all groundwaters under forest show nearly the same isotopic composition ( $\delta^{18}\text{O} = -7\text{‰}$ ). However, the groundwater under campina is depleted in  $^{18}\text{O}$  ( $\delta^{18}\text{O} = -15\text{‰}$ ). The samples taken in 1988 show that all the rainwater: direct rain, internal forest rain or rain water flowing down the tree trunks, have the same isotopic composition ( $\delta^{18}\text{O} = -11\text{‰}$ ) (Fig. 4). The forest groundwater has the same composition as all the drainage waters (brooks, Uaupés, Rio Negro), whereas the composition of the groundwater under campina is intermediate between that of rain waters and that of drainage waters.  $^{18}\text{O}$  and D concentration, in the water table under campina, gradually increases as the forest becomes closer. It keeps increasing when entering the forest but, inside the forest, it becomes rapidly stable (Fig. 5). In the  $^{18}\text{O}$ -D diagram based on the D analysis made in some rain, ground and river waters, all the points are located on the meteoric water line. Therefore there was no isotopic fractionation in any of these waters. Therefore all the variations observed in the isotopic composition are exclusively due to dilution. In 1985 and 1988, the composition of the phreatic water in soils under forest was similar to that of all the drainage waters in the region ( $\delta^{18}\text{O} = -7$  and  $-6\text{‰}$ ). It is therefore a water table. In 1988 the composition of groundwaters under campina and under forest was different from that of the last rain and from that of the average rainfall observed over this period ( $\delta^{18}\text{O} = -11\text{‰}$ ). The groundwater under campina has an isotopic composition closer to that of the last rain than the groundwater under forest. Thus the groundwater under campina absorbs the variations introduced by the rain more slowly than the groundwater under forest. It shows that recent rain waters do not mix instantaneously but form a temporary thin sheet of water, which behaves more like perched groundwater and which is restituted after each rainstorm. The variation in the composition of groundwaters at the entrance of the forest shows that this thin sheet of water spreads towards the forest. It represents a small volume of water, for the composition of the groundwater is subjected to slight modifications in the forest. The subsurface groundwater of podzols under forest is in isotopic equilibrium and in communication with the water table, therefore, there is no perched groundwater in these podzols as supposed at the beginning. Afforestation results from the permanent water table at the centre of the plateau (Fig. 6). The zones under campina and the giant podzols are characterized by the rapid alternations of groundwater recharges and discharges depending on rainfall intensity. The secondary transformation of giant podzols into shallow alios seems to be linked to a rise in the water table and to the fact that it remains close to soil surface. The reasons for this rise would be due either to a climatic change with a global increase in precipitations, or to a subsidence which would have led to the global decrease in discharge of the drainage water from the region.

I. INTRODUCTION. — Le Rio Negro draine, sous l'Équateur, un grand bassin à forte pluviosité (plus de 3000 mm annuels) dont la couverture pédologique, essentiellement sableuse et très épaisse, est à podzols ([1], [2], [3]).

Les podzols occupent un ensemble de plateaux surbaissés et portent une végétation qui est, soit une forêt, soit une formation arbustive claire dénommée *campina*. Sous la

forêt dominant des podzols à horizon  $B_h$  peu profond et sous la *campina* des podzols géants [4].

Les deux types de podzols semblent génétiquement liés. Beaucoup de podzols à alios peu profond sont en effet d'anciens podzols géants ayant subi une podzolisation secondaire dans leur partie supérieure [4]. Mais on ne connaît pas encore aujourd'hui les causes de cette transformation.

Dans les podzols géants la nappe oscille selon les saisons entre la surface du sol et des profondeurs qui peuvent dépasser 10 m, tandis que pour les podzols à alios peu profond, celle-ci reste en permanence proche de la surface.

A première vue on est amené à penser que, dans les podzols géants, c'est la nappe phréatique générale qui fluctue; en revanche dans les autres podzols c'est l'alios peu profond qui maintiendrait une nappe perchée permanente près de la surface. Dans cette conception la nappe perchée serait indépendante de la nappe phréatique, et c'est elle qui serait alors à l'origine de l'installation de la forêt.

Le problème est donc d'établir ici si la nappe des podzols sous forêt est une nappe perchée indépendante de la nappe phréatique, avec toutes les conséquences qui en découlent : mise en place de cette nappe postérieurement à la formation d'un alios secondaire au sein du podzol géant initialement sous *campina*, et rôle de l'évolution pédologique dans la différenciation de la végétation sur les plateaux sableux allant jusqu'au développement de tourbières au centre des plateaux.

Or, les méthodes isotopiques ayant fait leur preuve pour suivre la recharge des nappes phréatiques [5], le transfert de l'eau dans le sol ([6], [7], [8]), et pour déterminer l'origine de l'eau des rivières [9], c'est à elles qu'on a eu recours pour analyser le comportement des nappes dans cette zone des podzols d'Amazonie.

Le raisonnement s'appuie ici sur le fait que les concentrations en  $^{18}\text{O}$  et en D des eaux de pluie présentent, dans la région, de fortes variations saisonnières [10], et qu'à certaines périodes les pluies qui se succèdent n'ont donc pas la même composition isotopique.

On constate que les rivières atténuent les variations saisonnières sans les décaler dans le temps [10]. Ce qui signifie que l'épaisse couverture sableuse a une très faible capacité de rétention de l'eau, et que les nappes, tout en tamponnant les variations saisonnières des pluies, circulent et se déchargent rapidement dans les rivières. On peut néanmoins supposer que le mélange des eaux de pluie aux eaux de nappes ne soit pas instantané et que l'on puisse déceler, immédiatement après une période très pluvieuse, des différences de concentrations isotopiques entre le toit de la nappe, perchée ou phréatique, enrichi en eaux de pluie récentes, et les eaux, plus vieilles, des rivières.

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES. — 1. *Rappel des caractéristiques de la région.* — Le secteur étudié, situé sous l'Équateur (*fig. 1*), est un bas plateau sableux de 100 m d'altitude moyenne. Il est découpé par des entailles d'une dizaine de mètres de profondeur.

La température moyenne annuelle est de 25°C et la pluviosité annuelle dépasse 3 000 mm [1]. La période la plus pluvieuse se situe entre mars et août (300 à 500 mm mensuels), avec un maximum en mai-juin, et la moins pluvieuse entre octobre et février (150 à 250 mm mensuels).

Une forêt à grands arbres occupe les entailles et les têtes de drainage. Sur le plateau, au milieu d'une forêt plus basse, apparaissent de larges plages d'une formation arbustive claire (*campina*).

2. *Variations saisonnières de la composition des eaux des pluies et des rivières.* — Les teneurs en  $^{18}\text{O}$  et D des eaux de pluie et des eaux du rio Uaupès à Iauareté varient parallèlement au cours de l'année [5] : maximum en janvier-février et minimum en juin. L'amplitude des variations, forte pour les eaux de pluie (maximum  $\delta^{18}\text{O} = -2\text{‰}$ , minimum  $\delta^{18}\text{O} = -10\text{‰}$ ), est faible pour les eaux de l'Uaupès ( $\delta^{18}\text{O} = -5\text{‰}$  et  $\delta^{18}\text{O} = -8\text{‰}$ ). On remarque que pendant la période de l'année moins pluvieuse, novembre et janvier, les pluies sont riches en isotopes lourds et les eaux de drainage sont plus pauvres que les eaux de pluie; le contraire est observé en mai-juin au maximum des pluies (fig. 2).

3. *Méthodes de prélèvements et d'analyses.* — Les prélèvements ont été effectués en juin 1985 et en juin 1988, c'est-à-dire en périodes de hautes eaux, lorsque les concentrations en  $^{18}\text{O}$  et D des eaux de pluie sont faibles et les eaux de drainage plus concentrées en isotopes lourds que les eaux de pluie.

Les prélèvements de la campagne de juin 1985 ont porté sur les nappes des podzols et l'eau des rivières de quatre stations distribuées entre São Gabriel et Cachoeira de Ipanoré. Ils se sont étalés sur une période de 10 jours.

La campagne de juin 1988 a consisté en prélèvements d'eaux des pluies, des nappes et des rivières effectués sur un seul site à proximité de São Tomé, à l'aval de Missão Taraquá (fig. 1). Le site comporte une forêt et une campina. Un drain prend naissance dans la forêt (échantillon ruisseau) et se jette dans une petite rivière qui elle-même se jette, 1 km plus loin, dans le rio Uaupès. Les eaux de pluie d'une nuit (nuit du 18 au 19 juin 1988) ont été prélevées au niveau du sol sous forêt et sous campina. Un prélèvement des eaux de ruissellement le long des troncs d'arbres a également été fait. L'eau de la pluie d'une période de 24 h (entre 7 h le 18 juin et 7 h le 19 juin) a été recueillie dans le pluviomètre de São Tomé. L'eau des nappes des podzols a été prélevée le 19 juin immédiatement après la pluie et 30 h après. Il n'y a pas eu de pluie dans l'intervalle.

Les concentrations en  $^{18}\text{O}$  et en D ont été mesurées par spectrométrie de masse au laboratoire du CENA à Piracicaba (Brésil). Les résultats sont donnés par rapport au Standart Mean Ocean Water (SMOW) en ‰ [11].

III. RÉSULTATS. — 1. *Relations  $^{18}\text{O}$  et D.* — Tous les résultats de 1985 et de 1988 se regroupent sur la droite d'équation  $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$  des eaux météoriques (fig. 3 et 4) ([11], [12]).

#### EXPLICATIONS DES PLANCHES

##### Planche I

Fig. 1. — Carte de situation.

Fig. 1. — Location map.

Fig. 2. — Variations temporelles des teneurs en  $^{18}\text{O}$  des eaux de pluie et des eaux de l'Uaupès à Iauareté [5].

Fig. 2. — Temporal variations of  $^{18}\text{O}$  in rain water and in Uaupès river at Iauareté [5].

Fig. 3. — Relations  $^{18}\text{O}$ -D dans les eaux de rivières et les nappes de podzols de différents sites.

Fig. 3. —  $^{18}\text{O}$ -D relationships for river and subsurface waters in podzols of various sites.



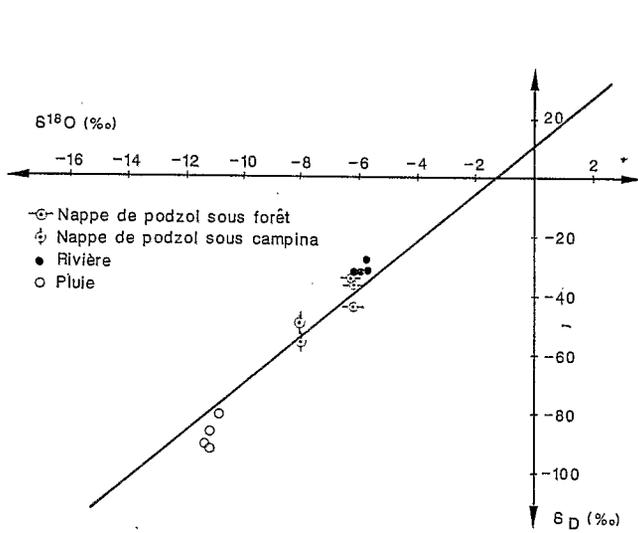


Fig. 4

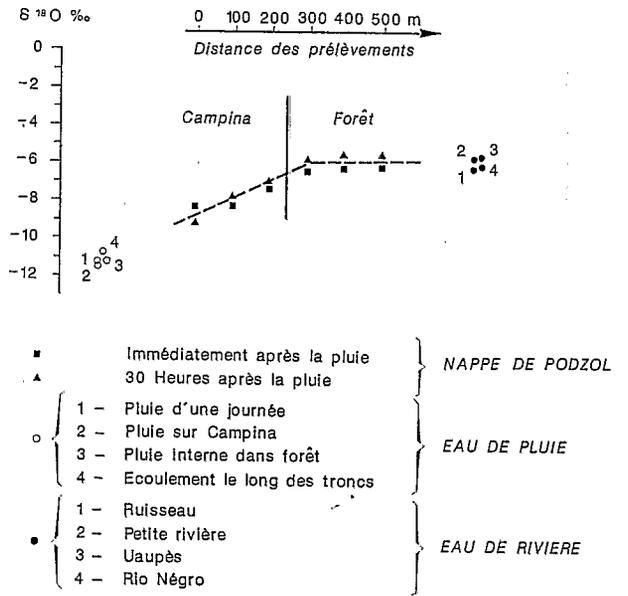


Fig. 5

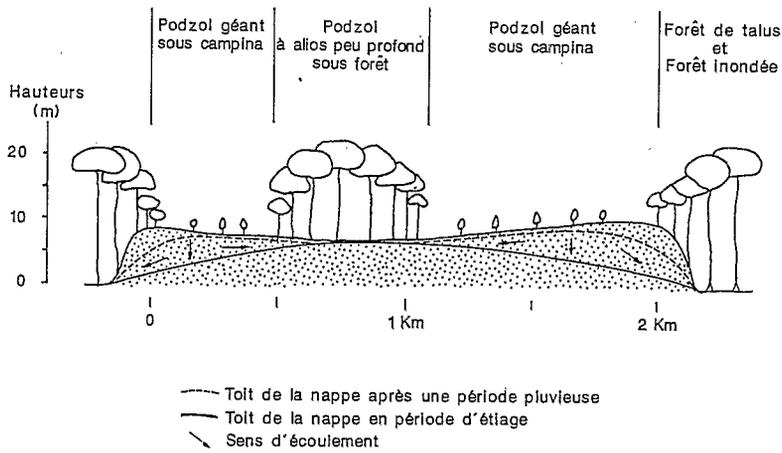


Fig. 6

## Planche II.

Fig. 4. — Relations  $^{18}\text{O}$ -D dans les eaux de pluie et les nappes de podzols sur un seul site et dans les eaux des rivières avoisinantes.

Fig. 4. —  $^{18}\text{O}$ -D relationships for rain waters, subsurface waters of podzols of a single site and neighbouring river waters.

Fig. 5. — Variations spatiales des teneurs en  $^{18}\text{O}$  des eaux de nappe des podzols au passage campina-forêt. Comparaison avec les teneurs des eaux de pluie et celles des rivières.

Fig. 5. — Spatial variations of  $^{18}\text{O}$  in podzol subsurface water across campina-forest transition. Comparison with rain water and river.

Fig. 6. — Profil schématique de la nappe phréatique et distribution des sols et de la végétation sur un plateau sableux.

Fig. 6. — Schematic groundwater table profile and soil and vegetation distribution in a sandy plateau.

2. Relations entre les eaux des nappes et les eaux des rivières : campagne 1985 (fig. 3). — Entre São Gabriel et Ipanoré : (1) toutes les rivières ont sensiblement la même composition isotopique ( $\delta^{18}\text{O} = -7 \text{ ‰}$ ); (2) toutes les nappes sous forêt ont la composition des eaux des rivières (ou un peu plus riches); (3) sous campina, la nappe est pauvre en  $^{18}\text{O}$  ( $\delta^{18}\text{O} = -15 \text{ ‰}$ ).

3. Relations pluies, nappes et rivières : campagne 1988. — On constate : (1) que toutes les eaux de pluie, pluie directe, pluie interne dans la forêt ou ruisselée le long des troncs d'arbres, ont sensiblement une même composition ( $\delta^{18}\text{O} = -11 \text{ ‰}$ ) (fig. 4 et 5) qui correspond à celle d'une eau pauvre en  $^{18}\text{O}$  (fig. 2); (2) que la nappe de la forêt a la composition des eaux de drainage, qu'elles soient du ruisseau, de l'Uaupés ou du rio Negro à São Gabriel (fig. 4 et 5); (3) que la composition de la nappe sous campina est intermédiaire entre celle de la pluie et celle des eaux de drainage.

4. Variations spatiales de la composition de la nappe au contact campina-forêt immédiatement après la pluie et 30 h après la pluie : campagne 1988. — La concentration des eaux du toit de la nappe sous campina augmente progressivement à mesure que l'on se rapproche de la forêt. Elle continue à croître lorsqu'on entre dans la forêt, mais elle se stabilise très vite à l'intérieur de la forêt (fig. 5).

Les différences entre la composition de la nappe immédiatement après la pluie et 30 h après la pluie ne sont pas significatives.

IV. INTERPRÉTATIONS. — Dans le diagramme  $^{18}\text{O}$ -D réalisé à partir de l'analyse de D de quelques eaux de pluie, de nappe et de rivière, les points s'ordonnent tous sur la droite des eaux météoriques. Dans aucune de ces eaux, il n'y a donc eu de fractionnement isotopique. Les variations de composition isotopique observées s'expliquent donc uniquement par des phénomènes de dilution.

En 1985 et en 1988, le toit de la nappe des sols sous forêt a la composition de l'ensemble des eaux de drainage de la région ( $\delta^{18}\text{O} = -7$  et  $-6 \text{ ‰}$ ). Il s'agit donc bien de la nappe phréatique. L'incorporation des pluies récentes n'en modifie pas la composition isotopique de façon notable.

En 1985, sous campina la nappe est à  $\delta^{18}\text{O} = -14 \text{ ‰}$ . S'agissant d'une période où les eaux de pluie sont en moyenne pauvres, cela veut dire que la nappe de la campina contient, en proportions, plus d'eau récente que la nappe sous forêt et l'eau des rivières.

En 1988, les compositions des nappes, sous campina et sous forêt, sont différentes de celles de la dernière pluie et de celles de la moyenne des pluies à cette période

( $\delta^{18}\text{O} = -11 \text{ ‰}$ ). La nappe sous campina a une composition isotopique plus proche de celle de la dernière pluie que la nappe sous forêt. La nappe sous campina amortit donc beaucoup plus faiblement les variations introduites par la pluie que la nappe sous forêt. Ce qui signifie que les eaux des pluies récentes ne s'y mélangent pas instantanément et constituent une lame d'eau temporaire qui se comporte comme une nappe perchée et qui se renouvelle à chaque épisode pluvieux.

Les variations de la composition des nappes à l'entrée de la forêt indiquent que cette lame d'eau diffuse en direction de la forêt. Elle représente un volume d'eau faible, car la composition de la nappe phréatique est peu altérée dans la forêt.

V. CONCLUSIONS. — La nappe sub-superficielle des podzols sous forêt est en équilibre isotopique et en communication avec la nappe phréatique; il n'existe donc pas de nappe perchée dans ces podzols comme cela avait pu être supposé au départ.

C'est bien l'affleurement permanent de la nappe phréatique au centre du plateau, qui est à l'origine de l'installation de la forêt comme cela est schématisé sur la figure 6.

Les zones de campina et de podzols géants sont précisément les zones où charges et décharges de la nappe alternent rapidement au gré des variations de l'intensité des pluies. En périodes très pluvieuses les eaux de la nappe sont évacuées par les bordures et par le centre du plateau sableux.

La transformation secondaire des podzols géants en podzols à alios peu profond apparaît, dans ces conditions, clairement reliée à une remontée de la nappe phréatique et à son maintien près de la surface du sol au centre du plateau.

Les raisons de cette remontée seraient à attribuer soit à un changement climatique avec augmentation globale des apports par les précipitations, soit à une subsidence qui aurait provoqué le ralentissement général de l'évacuation des eaux de drainage de la région.

Note remise le 5 février 1990, acceptée le 8 mars 1990.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BRÉSIL, *Projeto Radambrasil*, 11, Pico da Neblina, 1976, Ministerio das Minas e Energia, Departamento da produção Mineral, Rio de Janeiro, 374 p.
- [2] D. DUBROEUCQ et P. BLANCANEUX, In D. RIGHI et A. CHAUVEL éd., *Podzols et podzolisation*, I.N.R.A., 1987, Paris, p. 37-52.
- [3] M. GAUVAUD, P. BLANCANEUX, D. DUBROEUCQ et M. POUYLLAU, *Cah. ORSTOM, sér. pédol.*, 22, (3), 1986, p. 265-283.
- [4] D. DUBROEUCQ et B. VOLKOFF, *Cah. ORSTOM, sér. pédol.*, 25, (1), 1989 (sous presse).
- [5] J. Ch. FONTES, In P. FRITZ et J. Ch. FONTES éd., *Handbook of environmental isotope geochemistry*, 1, The terrestrial environment, A, 1980, Elsevier, Amsterdam, p. 75-140.
- [6] P. R. LEOPOLDO, W. FRANKEN, E. MATSUI et SALATI, *Isotope Hydrology*, 1983, A.I.E.A., Vienne, p. 125-137.
- [7] Ph. MÉROT, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 300, série II, 1985, p. 1033-1038.
- [8] Ph. MEROT, BOURGUET M. et M. LE LEUCH, *Catena*, 8, 1981, p. 69-81.
- [9] E. MATSUI, E. SALATI, I. FREIDMANN et W. L. F. BRINKMANN, *Water Resour. Res.*, 12, (4), 1976, p. 781-785.
- [10] E. SALATI et J. MARQUES, In H. SIOLI éd., *The Amazon. Limnology and Landscape ecology of mighty tropical river and its basin*, Dr W. Junk Publishers, Dordrecht, 1984, p. 85-126.
- [11] H. CRAIG, *Science*, 133, 1961, p. 1702-1703.
- [12] Y. YURTSEVER et J. R. GAT, In J. R. GAT et G. GONFIANTINI éd., *Stable isotope hydrology. Deuterium and oxygen-18 in the water cycle*. Technical reports series n° 210, 1981, A.I.E.A. Vienne, p. 103-142.

B. V. : ORSTOM, B. P. n° 1857, Yaoundé, République du Cameroun;  
C. C. et J. M. : C.E.N.A./U.S.P., C. P. n° 96, 13400 Piracicaba, Brésil.