

**EFFETS DE LA STRUCTURE ET DES RACINES  
DANS UN SOL FERRALLITIQUE ARGILEUX  
SUR LE CYCLE DE L'EAU EN MILIEU FORESTIER AMAZONIEN**

**A. Chauvel**

*LEST Centre ORSTOM de Bondy, 72 route d'Aulnay, 93143 Bondy CEDEX*

Cet exposé reprend le contenu d'une communication présentée par A. Chauvel et al., en 1992, au VII Congrès Brésilien de météorologie, à São Paulo. Les références des annales de ce Congrès figurent dans la liste bibliographique.

**RESUME**

L'étude des relations sol-eau-racines est ici abordée dans un profil de sol ferrallitique argileux, profond de plus de 6 mètres, sous forêt amazonienne, dans la région Nord de Manaus.

L'analyse des données portant sur : 1- la distribution des racines, 2- les variations verticales de la structure et de la porosité, 3- le profil hydrique et 4- les mouvements de l'eau (révélés par marquage au tritium), indique un prélèvement d'eau important par les racines, en saison sèche, dans la partie médiane du profil et à la base de l'horizon B Ferrallitique argileux, à plus de 6 mètres de profondeur. L'hypothèse d'une régulation inter-annuelle du cycle de l'eau dans l'écosystème forestier est suggérée.

**MOTS CLES :** structure, racines, cycle de l'eau, forêt, Amazonie.

## INTRODUCTION

En Amazonie Brésilienne, des travaux récents (Luizão et al. 1992), mettent en évidence le caractère saisonnier des racines et, en particulier des plus fines, ainsi que la présence de racines atteignant plusieurs mètres de profondeur (Cerri et Volkoff 1987 ; Nepstad et al. 1994), dans les latosols argileux recouverts par la forêt tropicale humide. Par ailleurs, les travaux de Pimentel da Silva et al., hydrologues, (1992), indiquent que la végétation prélève des quantités importantes d'eau en dessous de 2 m, ce qui conduit à examiner en détail les relations sol-eau-racines dans les horizons profonds. Dans ce travail, nous nous proposons d'examiner simultanément les données disponibles sur la distribution des racines, sur la dynamique de l'eau et sur les caractéristiques porosimétriques d'un profil de latosols argileux de près de 7 m de profondeur dans la région Nord de Manaus.

## LE MILIEU PHYSIQUE

Le climat est de type tropical humide (Af selon la classification de Köppen). Les précipitations pluviométriques annuelles varient largement d'une année sur l'autre (de l'ordre de 1000 mm entre les extrêmes) ; leur moyenne est voisine de 2100 mm, tandis que leur distribution présente un très net caractère saisonnier : pendant 1 à 4 mois chaque année, le plus souvent entre juin et octobre, les pluies n'atteignent pas 60 mm/mois alors que l'évaporation totale dépasse 100 mm/mois (Cabral 1991). Le bilan hydrique du sol est alors nettement déficitaire.

Les sols ferrallitiques, classés "Latosolos amarelos, álicos, textura muito argilosa" dans la classification brésilienne (Camargo & Rodrigues 1979), recouvrent de bas plateaux. Développés sur des sédiments continentaux (formation Alter do Chão), ils sont composés principalement de Kaolinite (jusqu'à 80 %), d'hydroxydes de fer et d'aluminium et de 5 à 15 % de quartz. La limite inférieure de l'horizon B ferallitique, située entre 6 et 7 m de profondeur, sub-horizontale contournée, marque le passage avec les horizons nodulaires sous-jacents (Lucas 1989). De nombreux résultats relatifs au fonctionnement hydrique de ces sols (Cabral 1991), indiquent que, sous forêt, le drainage est entièrement vertical.

La végétation, connue sous le nom de "floresta de terra firme", est une forêt dense humide sempervirente (Prance et al. 1976).

## LA DISTRIBUTION VERTICALE DES RACINES

Le poids et la longueur des racines, extraites jusqu'à 6 m de profondeur, ont été mesurés, en fin de saison sèche (novembre 1991). Pour cela, une tranchée (2m x 1m) et de 6,5 m de profondeur a été creusée et des blocs de 15 dcm<sup>2</sup> ont été retirés de chacune des parois opposées (distantes de 2 m l'une de l'autre). Après pesée de ces blocs, les racines en ont été séparées par tamisage dans l'eau, sur des tamis de 2 mm et de 250 µm. Un tri manuel, à l'oeil nu et sous loupe binoculaire, a permis de séparer les racines en classes de diamètres de : 1-5 mm, 0,2-0,5 mm et < 0,2 mm. Les racines de diamètre supérieur à 5 mm, distribuées de façon très irrégulière, n'ont pas été prises en compte dans les résultats présentés. Les racines ont été ensuite séchées à l'étuve à 70° et pesées. Les mesures de longueur ont été faites sur des aliquotes des échantillons (séparées avant séchage) pour chaque classe de diamètre retenu. La relation entre le poids et la longueur des racines pour chaque aliquote a été utilisée pour l'évaluation de la longueur des racines extraites de chaque bloc. Les valeurs retenues sont les moyennes de celles obtenues pour les deux blocs.

Les racines sont observées depuis la surface jusqu'à la limite inférieure de la tranchée. Les concentrations les plus fortes se situant dans les horizons les plus superficiels (fig 1 a). Dans les trente premiers cm sont ainsi mesurés près de 70 km de racines/m<sup>3</sup>, dont 78 % de racines de diamètre inférieur à 0,2 µm. La quantité de racines diminue fortement avec la profondeur et, à partir de 1 m, les longueurs de racines restent inférieures à 3 km/m<sup>3</sup> sauf aux profondeurs de 3 m et de 6 m marquées par des accumulations notables de racines, avec des valeurs respectives de 6 et de 3,5 km/m<sup>3</sup>. Les racines les plus fines, déjà prédominantes en surface, contribuent pour plus de 90 % au total de la longueur des racines profondes du sol.

## LE SOL

Il est constitué, en dessous de l'horizon A humifère, d'une dizaine de cm de profondeur, par un ensemble d'horizons B ferrallitiques, très argileux, meubles, limités à 6-7 m de profondeur, par une transition rapide subhorizontale contournée avec l' horizon à nodules hématitiques et gibbsitiques sous-jacents.

Le profil a été étudié en détail par Y. Lucas (1989), et par d'autres auteurs dont les données analytiques sont ici utilisées. Pour caractériser la porosité fine ( $< 100 \mu\text{m}$ ) la distribution dimensionnelle des vides a été déterminée par la technique d'injection de mercure (Grimaldi et al. 1990). Les résultats obtenus sont représentés sous forme d'histogrammes de distribution des vides en différentes classes définies par un accroissement constant du logarithme décimal de  $r$ .

L'ensemble des résultats disponibles, et en particulier les spectres de porosité (fig 1 b), met en évidence la différenciation verticale suivante :

- dans les 40 cm superficiels se concentre la plus grande partie des nutriments, de la matière organique, des racines et de la biomasse microbienne. L'activité biologique maintient une porosité grossière à fine importante ;
- entre 0,4 et 3,5 m de profondeur, la structure micro-agrégée délimitée par un réseau de fines fissures, explique le caractère bimodal du spectre de porosité (fig 1 b) : les pores les plus petits ( $< 0,1 \mu\text{m}$ ) sont situés entre les particules de kaolinite, tandis que les plus grands ( $n \times 10 \mu\text{m}$ ) correspondent aux microfissures inter-microagrégats. Cette porosité fissurale diminue progressivement, avec la profondeur, de même que la micro-agrégation ;
- entre 3,5 et 5 m, la porosité est essentiellement interparticulaire, de diamètre inférieur à  $0,1 \mu\text{m}$  ;
- entre 5 et 6,5 m apparaissent, en quantités croissantes avec la profondeur, dans des volumes verticaux en forme de doigts de gant, des nodules hématitiques et gibbsitiques caractéristiques de l'horizon nodulaire sous-jacent. La dégradation progressive de ces nodules, de bas en haut (Lucas 1989), est à l'origine de vides de dissolution qui se manifestent par le développement d'une porosité de dimensions comprises entre 1 et  $100 \mu\text{m}$  visibles sur les spectres de porosité. Ces processus de dissolution qui affectent seulement des nodules hématitiques et gibbsitiques ne libèrent toutefois pas de nutriments.

## LES VARIATIONS SAISONNIERES DU PROFIL HYDRIQUE

Les résultats des mesures d'humidité pondérale des échantillons prélevés par sondages jusqu'à 6 m de profondeur sont représentés sur la fig 1 c. La première courbe caractérise la fin de la saison des pluies (moyennes du 6/05/91) tandis que la seconde correspond au maximum de saison sèche (moyennes du 22/11/91). Les variations d'humidité permettent de caractériser quatre ensembles superposés :

- entre 0 et 40 cm, les teneurs en eau et l'amplitude de leurs variations entre les extrêmes sont maximales en superficie, et diminuent progressivement vers le bas ;
- de 0,4 m à 3,5 m les humidités relevées au maximum de sécheresse (liées aux teneurs en argile) varient peu en fonction de la profondeur, tandis que celles mesurées en fin de saison des pluies (plus dépendantes de la structure) diminuent progressivement vers le bas, de même que le stock d'eau disponible ;
- de 3,5 à 5 m, les deux courbes tendent à se confondre et les taux d'humidité diminuent faiblement avec la profondeur ;
- en dessous de 5 m, les teneurs en eau au maximum de sécheresse continuent à diminuer avec la profondeur, mais celles qui sont caractéristiques de la fin de saison des pluies se maintiennent, puis augmentent fortement vers le bas dès qu'apparaissent des concentrations de nodules. L'amplitude des variations entre les valeurs extrêmes présente un maximum à la base des horizons B, comparable à celui observé en surface. A l'observation, on constate que les surfaces observées à la limite de l'horizon nodulaire, présentent un aspect brillant révélateur de la présence d'un film d'eau libre.

## LES MOUVEMENTS DE L'EAU DANS LE SOL

Le marquage artificiel de l'eau par l'isotope de l'hydrogène a été largement utilisé pour mesurer la vitesse d'infiltration et le stockage de l'eau dans les sols. Dans la recherche réalisée en collaboration entre l'INPA et l'AIEA, (Rozanski et al. 1992), l'injection de tritium (activité 420  $\mu\text{Ci}$  et 560  $\mu\text{Ci}$ ) a été faite sur parcelles de 3 x 3 m en avril 1990, suivie par un apport de 300 l d'eau non marquée pour faire entrer l'eau marquée dans le profil et éviter la perte de tritium par évaporation. Les échantillons de sol ont été prélevés 59, 114 et 377 jours après l'injection de tritium. L'extraction de l'eau et les analyses isotopiques ont été réalisées au "Laboratoire d'Hydrologie Isotopique de l'AIEA".

Les résultats (fig 1d) montrent une infiltration lente de l'eau marquée en fin de saison des pluies : après 59 jours, le pic de tritium se situe seulement à près de 1 m de profondeur. Ce pic se déplace peu durant la saison sèche si bien qu'en octobre, 114 jours après l'injection, il se localise encore à près de 1,5 m de profondeur. Entre octobre 1990 et mai 91, période recouvrant toute la saison des pluies, le pic d'eau marquée atteint 3,5 m de profondeur dans le sol. On observe une perte de près de 40 % du tritium entre 1,5 et 3,5 m de profondeur, qui indique une absorption significative de l'eau du sol par les racines existantes entre ces niveaux. La vitesse d'infiltration de l'eau, calculée à partir du déplacement du tritium est ainsi

variable au cours de l'année : près de 3 fois plus grande en saison des pluies (30 à 40 cm/mois) que pendant la saison sèche (13 cm/mois).

## DISCUSSION ET CONCLUSION

Ainsi considéré, le système sol-eau-racines semble pouvoir être subdivisé en quatre étages principaux superposés :

- dans les 40 cm superficiels, une forte activité biologique et des apports de litière, permettent le maintien d'une bonne structure et de teneurs en matière organique élevée à l'origine d'une capacité de rétention pour l'eau utile, et pour les nutriments, importante. Sont ainsi maintenues, en période de pluies fréquentes, des conditions favorables à l'absorption de l'eau et des éléments minéraux. Dès que les pluies cessent durant plus d'une semaine, les réserves en eau disponible s'épuisent et certaines plantules faiblement enracinées se flétrissent. Luizão et al. (1992) ont montré que dans ces horizons superficiels, la biomasse racinaire diminue fortement en saison sèche ;
- entre 0,4 et 1,4 m, la micro-agrégation est bien développée ; elle diminue progressivement de 1,4 à 3,5 m, en même temps que la porosité fissurale inter-agrégats (de quelques 10  $\mu\text{m}$  de large) assurant la rétention d'eau disponible. Selon Van Wambecke (1974), la conductivité hydraulique de ces horizons oxiques diminue brusquement dès que la tension dépasse 1000 cm d'eau (vidage d'une grande partie de la porosité inter-microagrégats). Les racines doivent alors se développer en direction des volumes contenant encore de l'eau disponible. On suppose que le maximum de racines fines observé en fin de saison sèche à 3,5 m de profondeur, correspond au front de propagation de ces racines absorbantes en fin de saison sèche. Les résultats obtenus par marquage de l'eau au tritium montrent que le stock d'eau disponible accumulé entre 0,4 et 3,5 m de profondeur, relativement important, provient des pluies de l'année climatique en cours ;
- entre 3,5 et 5 m, la réduction de la porosité de taille supérieure à 0,1  $\mu\text{m}$  limite la disponibilité de l'eau pour les racines, sans cependant empêcher une circulation verticale lente de l'eau en régime pseudo-permanent (selon P. Audry, communication orale). A ce niveau, la densité de racines est minimale ;
- en dessous de 5 m de profondeur, l'existence d'une discontinuité (entre le matériel argileux ferrallitique et l'horizon nodulaire), ainsi que le développement de vides de dissolution de quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  de large à la périphérie des nodules (Lucas, 1989), permet l'accumulation d'eau libre. En saison humide, cette eau, non absorbée par les racines (qui trouvent plus haut des réserves importantes), s'accumule à la base de l'horizon B ferrallitique.

Au maximum de la saison sèche, à l'inverse, les réserves disponibles dans la partie supérieure du profil s'épuisent et les taux d'humidité s'y stabilisent (Pimentel da Silva et al. 1992). Ce serait alors en profondeur, à la base de l'horizon ferrallitique, exploitée par de fines racines, que la forêt puiserait les réserves en eau qui lui permettent de maintenir son évapotranspiration (Nepstad et al. 1994). Les résultats du marquage de l'eau par le tritium (Rozanski et al. 1992, fig 1 d) indiquent que ces ressources hydriques profondes proviennent des précipitations des années antérieures à l'expérimentation, ce qui impliquerait une régulation inter-annuelle du cycle de l'eau dans l'écosystème forestier amazonien. L'effet exercé par la déforestation en Amazonie sur les changements climatiques régionaux, étudié par Nobre et al. (1991), s'explique sans doute, pour une part, par l'aptitude des racines des arbres, mais non de celles de la végétation herbacée des pâturages (Pimentel da Silva et al. 1992), à recycler dans l'atmosphère les ressources en eau de la profondeur des horizons B ferrallitiques, issues des pluies des années précédentes.

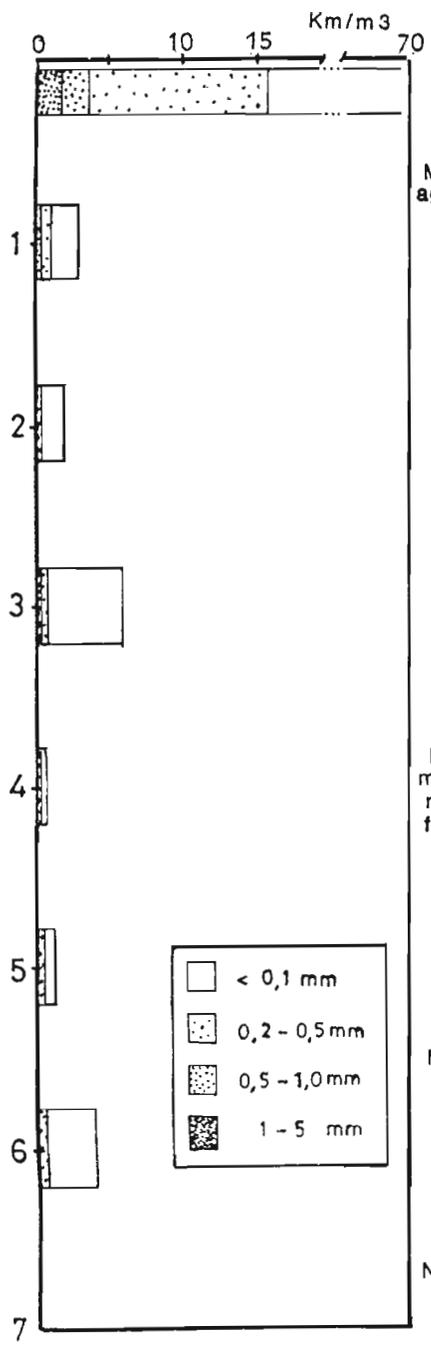
## BIBLIOGRAPHIE

- Cabral O (1991) - Armazenagem de água num solo com floresta de terra firme e com seringal implantado. Dissertação de Mestrado, INPE : 104 p.
- Camargo M N & Rodrigues T E (1979) - Guia de Excursão, XII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Manaus, EMBRAPA : 72.
- Chauvel A, Vital A R T, Lucas Y, Desjardins T, Franken W K, Luizão F J, Araguas L A, Rozanski K & Bedmar A P - O papel das raízes no ciclo hidrológico da floresta amazônica. VII Congresso Brasileiro de Meteorologia. 28/9 - 2/10 1992 : 298-302.
- Cerri C C & Volkoff B (1987) - Carbon content in a yellow latosol of Central Amazon Rain Forest. *Acta Oecol.*, 8 : 29-42.
- Grimaldi M, Sarrazin M, Chauvel A, Luizão F J, Nunes N, Lobato Rodrigues M de R, Amblard & Tessier (1990) - Effets de la déforestation et de diverses cultures sur la structure des latosols argileux d'Amazonie Brésilienne. *Cahiers Agriculture*, 2 : 36-47.
- Lawrence G P (1977) - Measurement of pore sizes in fine textures-textures soils : a review of existing techniques. *J. Soil Sci.*, 28 : 527-540.
- Lucas Y (1989) - Systèmes pédologiques en Amazonie brésilienne : équilibres, déséquilibres et transformations. Thèse Doct., Univ. Poitiers, 211 : 157 p.
- Luizão F J, Luizão R C, Chauvel A (1992) - Premiers résultats sur la dynamique des biomasses racinaires et microbiennes dans un latosol d'Amazonie Centrale (Brésil) sous forêt et sous pâturages. *Cah. ORSTOM*, XXVII : 69-79

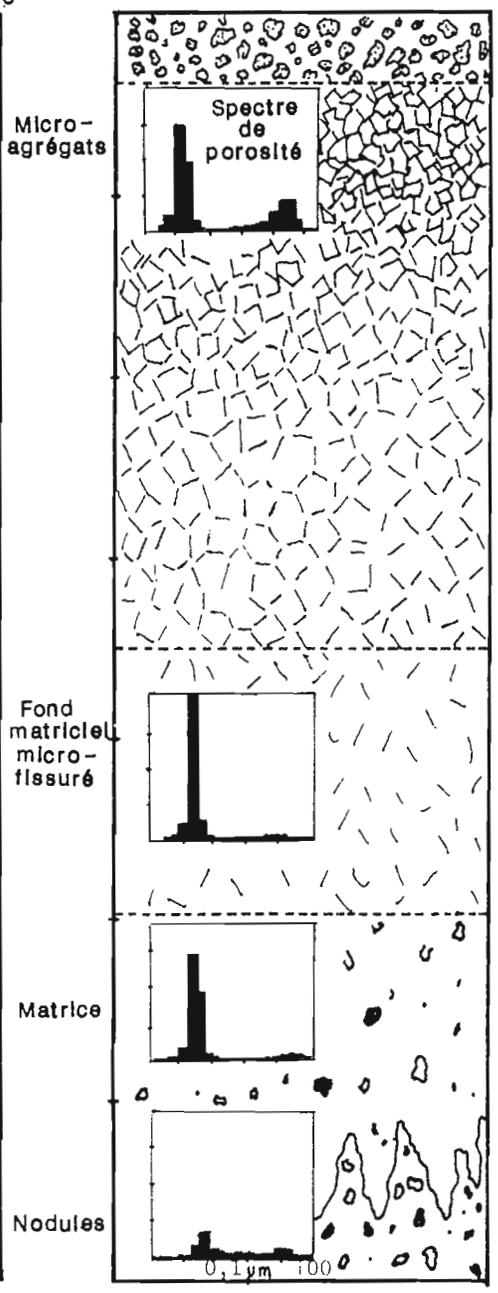
- Nepstad D C, Carvalho C R, Davidson E A, Jipp P H, Lefebvre P A, Negreiros G H, Silva E D da, Stone T A, Trumbore S E & Vieira S (1994) - The role of deep roots in hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature*. vol. 372 : 666-669.
- Nobre C, Sellers P J & Shukla J (1991) - Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of climate*. 4 : 957-987.
- Rozanski K, Araguas Araguas L, Plata Bedmar A, Tancredi A C, Franken W (1992) - Downward movement of soil moisture in the Central Amazon region traced by means of hydrogen isotopes. *Intern. Symp. on Use of Stable Isotopes in Plant Nutrition, Soil Fertility and Environmental Studies*. IAEA.
- Van Wambeke A (1974) Les propriétés agricoles des oxisols. *Pédologie* 24 : 191-195.

#### Liste des figures

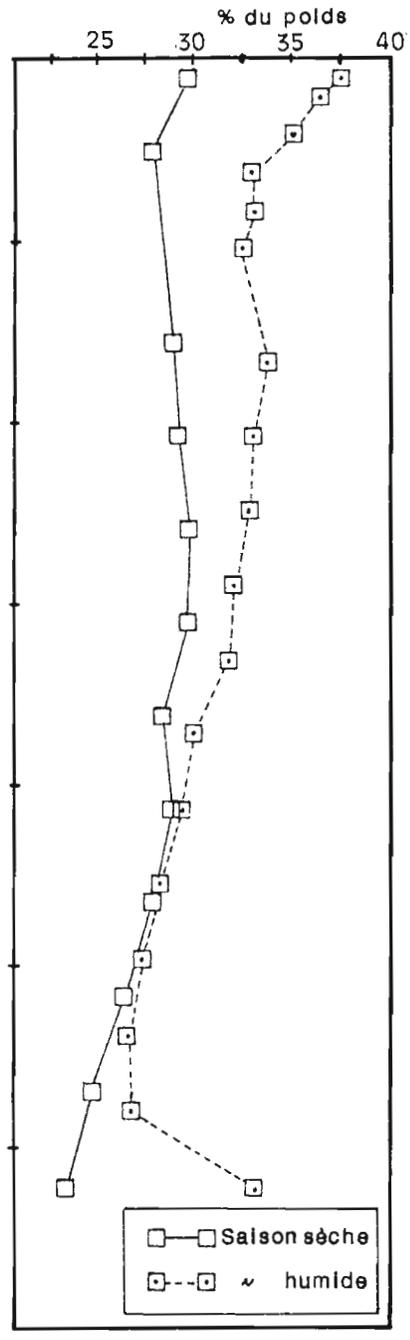
Fig. 1 Diagramme du profil de sol ferrallitique montrant : a/ la distribution des racines, b/ la structure de sol et le spectre de porosité, c/ les profils hydriques de saison sèche et de saison humide, d/ l'infiltration de l'eau marquée par le tritium.



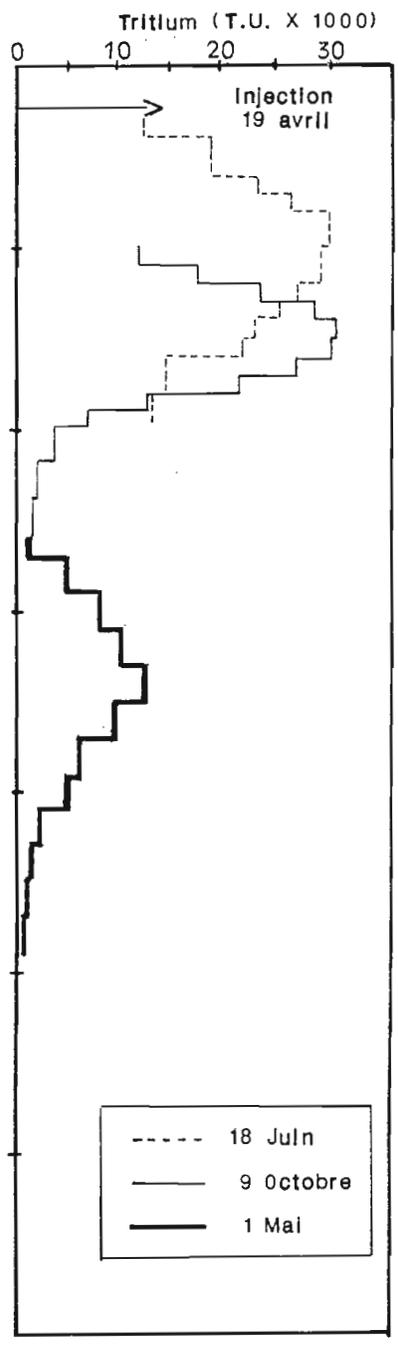
a/ Distribution des racines



b/ Morphologie du sol et spectre de porosité



c/ Profils hydriques



d/ Infiltration de l'eau marquée au tritium