

# **Approches hydrodynamique et géochimique du fonctionnement hydrologique dans la dépression piézométrique fermée de Dantiandou (Niger occidental)**

**Christian/Leduc<sup>1</sup>, Guillaume Favreau<sup>12</sup>, Christelle Marlin<sup>2</sup>, Bernard/Cappelaere<sup>1</sup>, Martial Dray<sup>3</sup>, Sylvie/Galle<sup>4</sup>, Wenceslao Martin-Rosales<sup>15</sup>, Bernard/Mougenot<sup>6</sup>, Philippe Olive<sup>3</sup>, Christophe/Peugeot<sup>1</sup>, Luc/Séguis<sup>1</sup>, Jean-Denis/Taupin<sup>34</sup>**

<sup>1</sup> UMR HydroSciences Montpellier <sup>2</sup> LHGI, Université Paris sud Orsay

<sup>3</sup> UMR Sisyphe Paris 6 <sup>4</sup> UMR LTHE Grenoble

<sup>5</sup> Université de Grenade <sup>6</sup> IRD/CESBIO Toulouse

Mots-clés : Zone semi-aride, Nappe phréatique, Géochimie, Hydrodynamique, Infiltration

## **I. INTRODUCTION**

Les dépressions piézométriques fermées sont des singularités hydrogéologiques fréquentes en zone semi-aride qui ne s'expliquent que par de faibles transferts horizontaux et une reprise évaporatoire importante, relativement aux autres termes du bilan hydrologique. Celle de la région de Dantiandou (près de Niamey dans l'ouest du Niger) a fait l'objet d'investigations poussées afin de mieux comprendre les mécanismes du ruissellement et de l'infiltration vers la nappe phréatique. Cette région étant en fort déséquilibre hydrologique depuis plusieurs décennies, sa dynamique n'en est que plus intéressante à analyser.

Notre projet complète les mesures de terrain réalisées par l'IRD depuis 1991, interprète et modélise le fonctionnement des différents compartiments (surface, zone non saturée, nappe) par une double approche, hydrodynamique et géochimique, pour vérifier le schéma pressenti d'une infiltration très localisée dans les bas-fonds et d'une reprise évaporatoire agissant sur l'ensemble du domaine.

## **II. MATERIELS ET METHODES**

### **II.1. Expérimentations de terrain**

Le travail de terrain a été en grande partie réalisé par l'équipe IRD du centre de Niamey (ITA, CSN et techniciens nigériens) et complété par plusieurs missions de quelques semaines.

Pour le suivi des précipitations, le réseau actuel IRD comporte une trentaine d'enregistreurs automatiques régulièrement disposés sur le degré carré de Niamey.

Pour la compréhension des écoulements de surface, 3 mares temporaires ont été équipées d'enregistreurs automatiques. Le recensement des mares, entamé à partir d'une nouvelle analyse des photos aériennes et satellitaires, a été complété par une recherche in situ. Cette analyse spatiale du paysage comporte également une analyse du relief.

Pour les transferts en zone non saturée, nous avons voulu vérifier la faiblesse ou l'absence d'infiltration vers la nappe en dehors des mares et évaluer la reprise évaporatoire depuis la nappe. Des instrumentations ont été menées dans trois domaines : 1) sous les mares, où se produit l'essentiel de l'infiltration ; 2) sous les ravines ou les zones d'épandage, seuls autres éléments du paysage où pourrait se produire une infiltration ; 3) dans le reste du milieu qui doit connaître une très faible reprise évaporatoire. Plusieurs profils avant et pendant la saison des pluies ont donc été réalisés afin de connaître la répartition de l'humidité, des chlorures et des isotopes (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H) dans

la zone non saturée.

Pour les écoulements dans la nappe phréatique, nous avons exploité le réseau de près de 300 puits et forages de l'IRD qui nous a fourni plusieurs milliers de mesures piézométriques et physico-chimiques (conductivité électrique, pH). Dans deux sites, des piézomètres avec enregistreurs automatiques permettent de suivre l'évolution de la nappe selon des transects perpendiculaires aux mares. Plusieurs centaines d'analyses d'ions majeurs et d'isotopes, stables et radioactifs, ont également été interprétées. Plusieurs essais de pompage ont sensiblement augmenté la connaissance de la distribution des perméabilités.

## **II.2. Modélisations**

Puisque les phénomènes hydrologiques en surface et dans le sous-sol n'ont pas les mêmes échelles d'espace et de temps, il a été entrepris séparément des modélisations numériques des circulations dans les 3 principaux compartiments de notre système (surface, zone non saturée, nappe). Dans tous les cas, il s'agit de modélisation spatialisée à bases physiques. Les modélisations actuellement les plus abouties concernent les écoulements de surface et la nappe sur le site de Wankama.

Un modèle hydrologique, r.water.fea, simule la production et le transfert de ruissellement au pas de temps de l'averse. Il utilise la répartition spatiale des états de surface (encroûtement, végétation, occupation du sol) pour estimer les paramètres de l'infiltration et du transfert en surface (conductivité hydraulique et rugosité). L'information spatialisée est traitée dans le modèle à l'aide du système d'information géographique GRASS. Le modèle, validé sur un bassin représentatif, doit être exploité sur d'autres bassins de même taille afin de vérifier sa robustesse et sa pertinence.

Pour la zone non saturée, le modèle bidimensionnel restituant la forme du "bulbe" d'infiltration sous la mare n'est encore opérationnel. Par contre, des profils de chlorure et d'isotopes stables ont été analysés et modélisés.

Dans la nappe, les teneurs en  $^3\text{H}$ , mesuré sur l'eau, et  $^{14}\text{C}$ , mesuré sur le carbone inorganique total dissous, nous fournissent deux traceurs de temps non-interactifs avec l'encaissant géologique. Les taux de renouvellement de la nappe connaissant les teneurs des précipitations et le mode de mélange ont été calculés à partir de plusieurs variantes d'un modèle. Diverses modélisations numériques des écoulements souterrains ont déjà été entreprises; la modélisation de la nappe à plus large échelle est en cours.

La reconstitution de l'évolution conjointe des écoulements de surface et souterrains au cours des dernières décennies est en cours et nécessitera plus de temps que prévu.

## **III. RESULTATS ET DISCUSSIONS**

### **III.1. En surface**

Les écoulements de surface sont très dépendants de la morphologie des bassins et de leurs conditions de surface. Ils sont fréquemment interrompus à mi-versant par la présence de zones d'épandage. Ils peuvent être brusquement changés en cas de modification des ravines alimentant les mares temporaires.

La dynamique de vidange des mares temporaires est, elle aussi, complexe. La distinction entre fond colmaté et partie supérieure des berges non colmatée était déjà connue. Elle est confirmée sur de nouveaux sites. De plus, il existe une dynamique saisonnière : le colmatage s'accroît progressivement au cours de la saison des pluies, ralentissant ainsi sensiblement la réalimentation de la nappe.

### **III.2. En zone non saturée**

Comme attendu, les profils isotopiques de saison sèche montrent un fort enrichissement vers la surface. L'évaporation reste nette en saison des pluies en dehors des mares ; elle serait d'environ 1 à 3 mm.an<sup>-1</sup>. D'après les profils de chlorure, la vitesse de circulation de l'eau sous les mares serait environ 100 fois plus forte qu'en dehors. Ces instrumentations confirment donc totalement le schéma pressenti d'une recharge efficace uniquement sous les mares et d'une reprise évaporatoire effective sur l'ensemble du paysage.

### **III.3. En zone saturée**

La fluctuation saisonnière de la nappe est très liée à la distribution et à l'intensité des pluies au cours de l'hivernage. Cependant, le mouvement de hausse observé depuis plusieurs décennies est en contradiction apparente avec les grands épisodes de sécheresse des années 70 et 80. En effet, depuis 40 ans, le fonctionnement hydrologique de la région a été plus modifié par l'anthropisation poussée du milieu (notamment le remplacement de la végétation naturelle par des champs de mil et des jachères) que par les fluctuations climatiques. Le mouvement de hausse touche toute la nappe, y compris la dépression piézométrique.

Les interprétations isotopiques et hydrodynamiques concordent et montrent que l'infiltration "originelle" était faible, de l'ordre du mm.an<sup>-1</sup>, et qu'elle a été spectaculairement multipliée, au moins d'un facteur 10, en quelques décennies.

## **IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

Profitant de la pérennité du réseau IRD au Niger en 2000, nous continuons l'instrumentation de terrain en routine. Les dernières années, aux conditions climatiques extrêmement diverses (1998, l'année la plus pluvieuse du siècle à Niamey ;t 1997, très sèche) soulignent l'intérêt d'un suivi à long terme, bien plus significatif que des opérations courtes (comme le fût Hapex-Sahel) quand il s'agit de comprendre les mécanismes hydrologiques en action dans un milieu semi-aride, toujours caractérisé par une très forte variabilité spatio-temporelle. Les conclusions tirées sont d'autant plus pertinentes que l'observation est longue.

Certaines actions de recherche inachevées seront continuées au-delà du terme officiel du projet PNRH. D'autres perspectives, par exemple en géochimie, sont ouvertes. Elles feront l'objet de proposition d'actions concertées entre les équipes ayant participé à ce projet. L'incitation à une plus forte collaboration, un des objectifs du PNRH, a donc parfaitement fonctionné. De plus, une extension, déjà entamée, de la recherche au bassin du lac Tchad devrait réunir les mêmes partenaires et de nouvelles équipes de France, Grande-Bretagne, Suisse, Espagne.

La hausse de la nappe dans un contexte de sécheresse incite à la prudence quand on essaie de relier fluctuations climatiques et changements hydrologiques. Ceci souligne la nécessité de bien mieux identifier et quantifier les processus physiques en oeuvre avant de proposer par exemple une évaluation de l'impact sur les ressources en eau du réchauffement global.

## **V. REFERENCES PRODUITES PAR LE PROJET**

### **V.1. Revues internationales**

CAPPELAERE B., TOUMA J. ET PEUGEOT C., 2000. A recursive algorithm for connectivity analysis in a 2D grid - Application to hydrodynamic modelling in heterogeneous soils. *Computers and Geosciences*, 26/2, 121-135.

ELIZONDO D., CAPPELAERE B. ET FAURE C. Automatic versus manual differentiation for non-linear inverse modeling. Soumis à *Computers and geosciences*.

FAVREAU G., LEDUC C. ET MARLIN C. Représentativité de l'échantillonnage géochimique et hydrodynamique en nappe libre de milieu semi-aride. Soumis à *Journal of African Earth Sciences*.

FAVREAU G., MARLIN C., LEDUC C. ET DRAY M. Recharge modelling of a rising water-table in semi-arid Niger

from  $^3\text{H}$  and  $^{14}\text{C}$  contents. Soumis à Groundwater.

**GALLE S., EHRMANN M. ET PEUGEOT C.**, 1999. Water balance in a banded vegetation pattern. A case study of tiger bush in western Niger. *Catena*, 37, 197-216.

**LEDUC C., FAVREAU G. ET SCHROETER P.** Long-term rise of a Sahelian water-table: the Continental Terminal in south-west Niger. Soumis à Journal of Hydrology.

**VIEUX B., LOOPER J., CAPPELAERE B. ET PEUGEOT C.** Influence of channel losses on spatially distributed rainfall-runoff simulation in a small endoreic catchment in the Sahel, Niger, Africa. Soumis à Hydrology and Earth System Sciences

## V.2. Congrès

**CAPPELAERE B., PEUGEOT C., MAIA A., VIEUX B. ET COLAS E.**, 1998. Compared sensitivity analyses of a fully-distributed and of a semi-distributed hydrological model for a sahelian watershed. XXIII<sup>rd</sup> General Assembly of the European Geophysical Society, Nice, Apr. 1998. *Annales Geophysicae* Vol.16, sup.II, p C522.

**FAVREAU G. ET LEDUC C.**, 1998. Fluctuations à long terme de la nappe phréatique du Continental Terminal près de Niamey (Niger) entre 1957 et 1997. In "Water resources variability in Africa during the XXth century", publ. AISH n° 252, 253-258.

**FAVREAU G., MARLIN C. ET LEDUC C.**, 1999. Isotopic and hydrodynamic estimates of the Continental Terminal water-table recharge near Niamey (Niger). In: "Isotopes geochemistry models: constraint of groundwater flow and transport dynamics", XXIV<sup>ème</sup> assemblée de l'EGS, la Haye.

**FAVREAU G., MARLIN C. ET LEDUC C.**, 2000. Une dépression piézométrique naturelle en zone semi-aride : contraintes initiales, évolution récente. In "Archives paléohydrologiques : quels témoignages", 18<sup>ème</sup> RST, Paris.

**LEDUC C., FAVREAU G., MARLIN C. ET DRAY M.**, 2000. Comparison of recharge estimates in the two largest aquifers of Niger based on hydrodynamical and isotopic data. In "Tracers and modelling in contaminant hydrogeology", publ. AISH n° XXX.

**VIEUX B., CAPPELAERE B. ET PEUGEOT C.**, 1998. Influence of channel losses on spatially distributed rainfall-runoff simulation in a small endoreic catchment in the Sahel region, Niger, Africa.. XXIII<sup>rd</sup> General Assembly of the European Geophysical Society, Nice, Apr. 1998. *Annales Geophysicae* Vol.16, sup.II, p C501.

**VIEUX B., LOOPER P., CAPPELAERE B., PEUGEOT C. ET MAIA A.**, 1998. Exploring climatic impacts on water resources in West Niger (Africa). In "Water resources variability in Africa during the XXth century", 16-19 Nov. 1998. IAHS - Pub. Nj 252, 347-354.

## V.3. Autres publications

**COSTE S.**, 1998. Inventaire des mares et des ravines par télédétection pour l'élaboration d'un modèle hydrologique en zone sahéenne (kori de Dantiandou, Niger). DEA Université Pasteur Strasbourg.

**FAVREAU G.**, 2000. Caractérisation et modélisation de la nappe phréatique du Continental Terminal près de Niamey (Niger) : hydrodynamique et hydrogéochimie d'une dépression piézométrique naturelle e milieu semi-aride. Thèse Université Paris-sud.

**PLAIN C.**, 1999. Essai de caractérisation de la zone non saturée au nord-est de Niamey (Niger). DEA Université de Paris sud.

## Figures

Fig. 1: Situation du bassin Continental Terminal et du degré carré de Niamey et carte de la hausse moyenne annuelle de la nappe pour la dernière décennie (en  $\text{m.an}^{-1}$ ).

Fig. 2 : Evolution saisonnière du colmatage dans la mare de Banizoumbou (les numéros des crues correspondent à leur ordre dans la saison).

Fig. 3 : Profil de  $^{18}\text{O}$  en saison sèche à Wankama, typique d'une reprise évaporatoire.

Fig. 4 : Distribution des taux de renouvellement dans la nappe phréatique calculés à partir des teneurs en tritium et carbone 14, sans tenir compte de l'augmentation de l'infiltration au cours des dernières décennies.

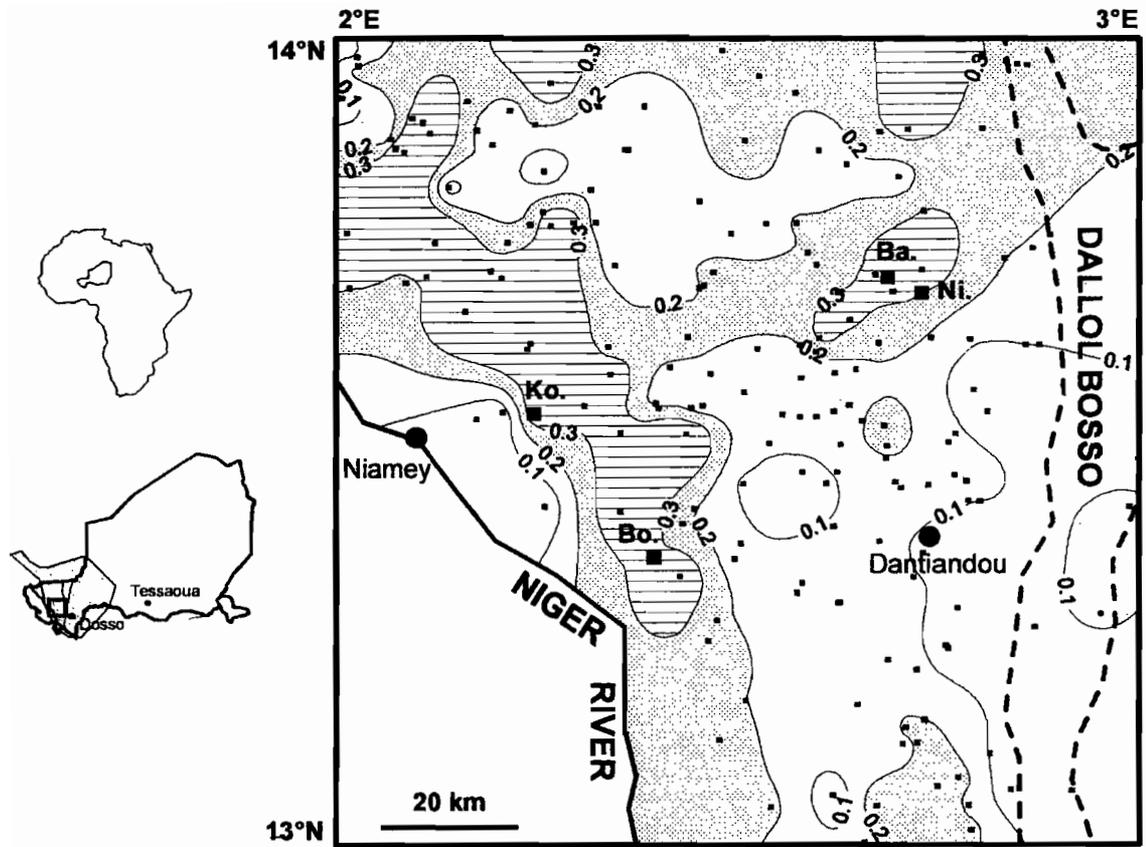


Fig. 1

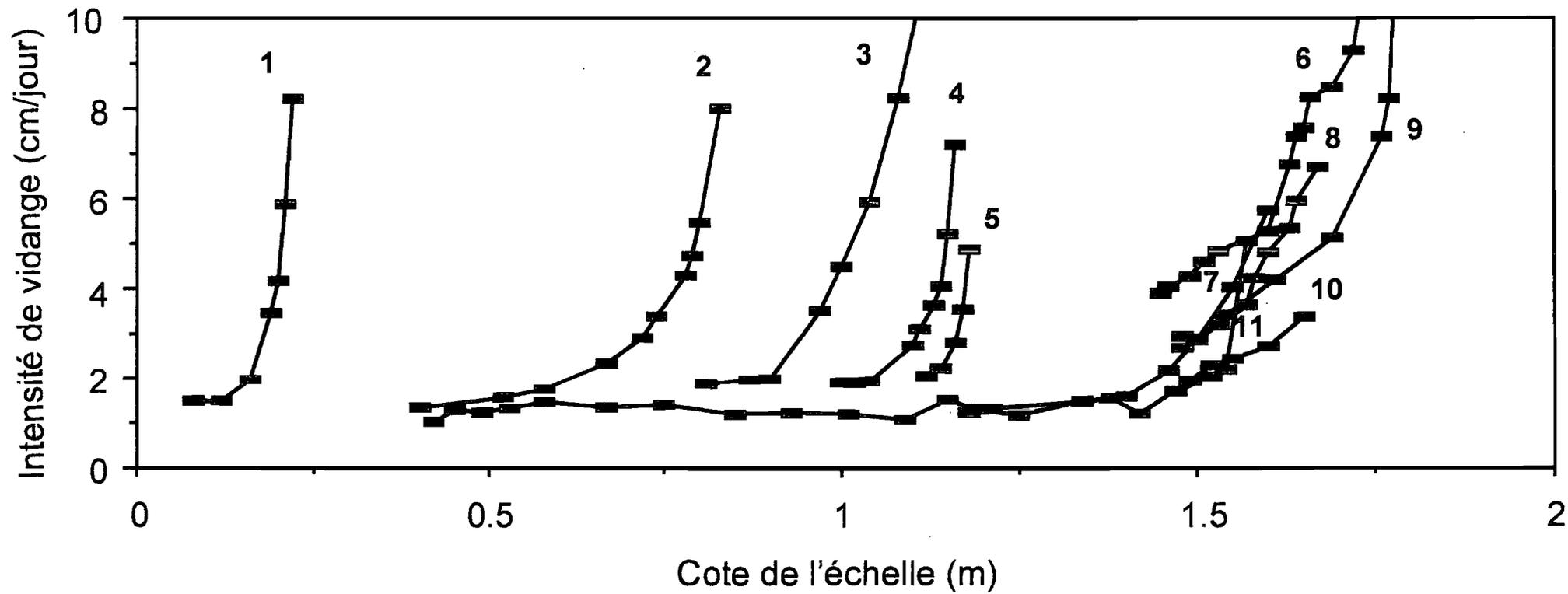


Fig. 2

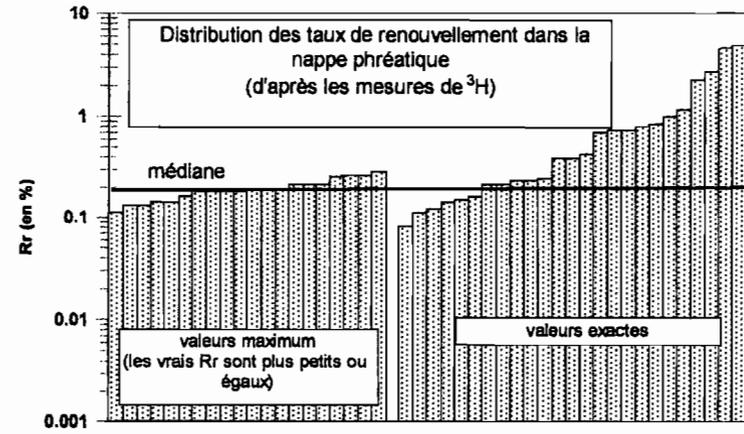
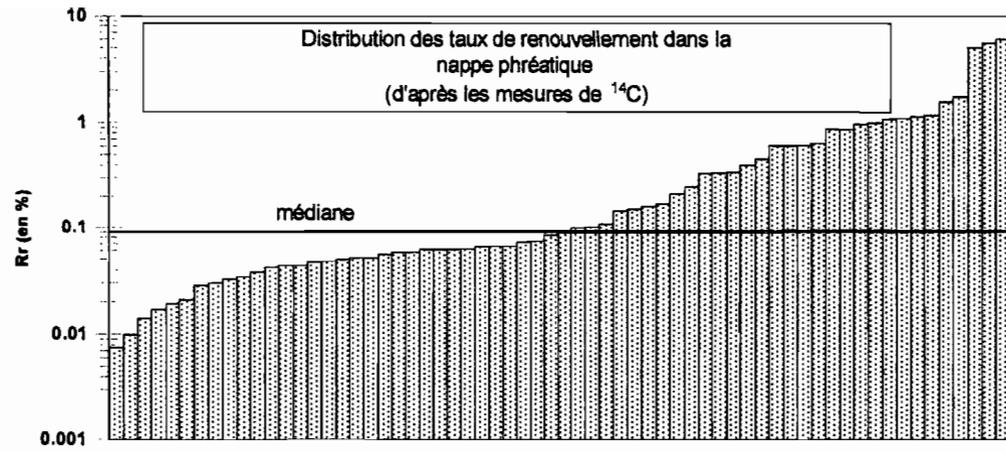


Fig. 4

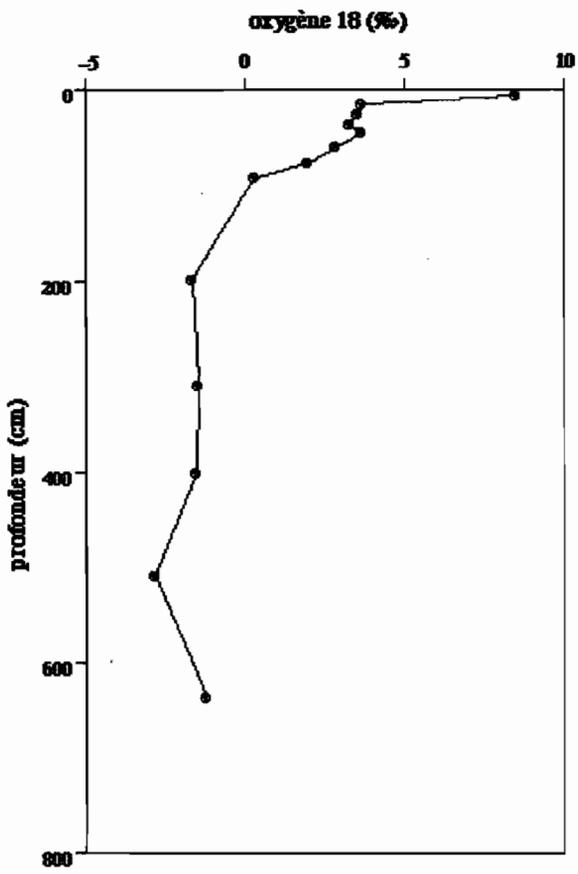


Fig. 3

INSU

BRGM

CEMAGREF

CIRAD

CNES

CNRS/SPI

INRA

IRD

LCPC

METEO FRANCE

*Colloque*  
**PNRH 2000**

**PROGRAMME NATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE**

Centre International de Conférences/METEO-FRANCE  
42, avenue Coriolis – 31 057 Toulouse Cedex

16-17 Mai 2000