

L'apport des isotopes de l'environnement à l'étude de la recharge et de la dynamique des aquifères

Input of environmental isotopes in the study of the recharge and the flow dynamic of aquifers

J.-F. ARANYOSSY, R. NJITCHOUA ET G. M. ZUPPI

RÉSUMÉ – Les exemples présentés dans cette note illustrent, sans prétention d'exhaustivité, un certain nombre de problèmes d'ordre hydrogéologique pour lesquels l'application des techniques isotopiques s'est révélée, depuis plusieurs décennies, particulièrement efficace.

Les contributions relatives des trois principaux mécanismes de recharge des aquifères sont aisément mises en évidence par l'étude des isotopes de l'environnement et des méthodes géochimiques : recharge directe par les précipitations (Sénégal) ; recharge indirecte par infiltration des eaux de surface (Italie, Nord-Cameroun) ; recharge par drainance ascendante d'un aquifère à l'autre (Algérie, Niger).

L'application des techniques isotopiques joue également un rôle primordial dans la reconstruction des variations des conditions de la recharge des aquifères au cours de l'Holocène sous conditions semi-aride (Niger), tempérée (Italie) ou tropical humide (Vietnam).

Quelques exemples sont enfin rappelés concernant la mise en évidence de la dynamique des aquifères : homogénéité isotopique due aux phénomènes de diffusion et du temps de résidence de l'eau (Continental Intercalaire du Sahara), hétérogénéité des caractères géochimiques et isotopiques due aux variations de faciès géologiques et aux discontinuités hydrauliques (Liptako, Mont-Blanc).

Mots clés : isotopes de l'environnement, hydrogéologie, recharge, dynamique, aquifères.

ABSTRACT – Several examples of hydrogeological studies have been selected in order to illustrate the input of environmental isotopic techniques in the general knowledge of aquifer systems : evaluation of the present aquifer recharge (Mali, Senegal, Italy, North-Cameroon, North-Sahara, Niger); evidence of the recharge variation with time (Niger, Italy, Vietnam); evaluation of the aquifer characteristics and hydraulic conditions (Chad, Niger). Most of these studies were carried out in collaboration with Professor Jean-Charles Fontes.

Keywords : environmental isotopes, hydrogeology, recharge, flow dynamic, aquifers.

*

(Abridged English Version)

INTRODUCTION

Nuclear and isotopic techniques have been widely used in hydrological studies during the last decades. These techniques, notably those applying environmental isotopes, provide useful information on the recharge mechanism and aquifer dynamics.

This paper is a selective review of some isotopic applications in groundwater studies carried out by the authors, in some cases in collaboration with Professor J.-Ch. Fontes.

PRESENT AQUIFER RECHARGE

The recharge of aquifers generally occurs through three major mechanisms (Simmers, 1988) : (i) direct infiltration of rain ; (ii) lateral percolation from rivers ; and (iii) leakage from surrounding aquifers.

Direct recharge

This term refers to the part of the rainwater that effectively reaches the groundwater reservoir (Castany and Margat, 1977). In temperate regions, this parameter can be determined by investigating the fluctuations of piezometric levels, of spring flows and regimes of rivers that drain the aquifer (Hamid *et al.*, 1989) ; detailed studies of water movement in the unsaturated zone using lysimeters (Aranyossy, 1991) may also provide estimation of the water budget and are also of great interest in studying the chemical behaviour of the interstitial water (Vachaud *et al.*, 1974, 1981 ; Dever *et al.*, 1982).

This evaluation becomes more difficult in semi-arid zones where the effective recharge may reach very low values and does not have the same significance as in temperate regions (Fig. 2). In the Sahel for instance, in natural places where the very flat topography does not allow deep vertical drainage of the superficial aquifer and where no water withdrawal occurs, the decrease

in the water table during the dry season can be attributed to evapotranspiration (Fig. 1). Depending on the soil type, the climatic conditions and the vegetation cover, this natural exfiltration may be higher than that of the seasonal recharge. The value of effective infiltration depends therefore on the time scale considered for the water balance evaluation. Tandia (1990) showed that annual effective infiltration estimated at the same site in Northern Senegal varied between 0 and 95 mm, depending on the methods employed (see Table). Such discrepancies may be partly attributed to the differences in both time and space scales used in the calculations.

Considering such a difficulty, the location of the thermonuclear tritium peak in the deep unsaturated zone may allow, in parallel with the chlorine distribution and balance, the estimation of the effective infiltration. For example, the tritium peak was found at depths of 12 and 20 m in two sand dune profiles in Northern Senegal (Fig. 3), corresponding to an annual infiltration of 22 and 26 mm, respectively (Aranyossy and Gaye, 1992). These results are consistent with those obtained from both the chloride budget and the chloride profile in the unsaturated zone (Edmunds *et al.*, 1992 ; Edmunds and Gaye, 1994).

Indirect recharge

The recharge of aquifers through lateral percolation of surface waters is an important process in both temperate and semi-arid regions. This mechanism was found to be the major recharge process in the Venetian plain (Fig. 4) where, on the basis of oxygen-18 contents, Bortolami *et al.* (1973) showed that groundwaters originating from both prealpine and alpine rivers. Another example of indirect recharge was found by Njitchoua *et al.* (1994) in the semi-arid regions of Northern Cameroon where, based on tritium measurements, these authors demonstrated the existence of hydraulic connections between the groundwater and the river system in the Garoua Sandstone Basin.

In arid areas, however, this mechanism is of minor importance in the recharge of regional aquifers. Recharge from rivers is usually limited to the alluvial aquifers adjacent to the rivers (Aranyossy, 1991 ; Gallaire, 1995).

Leakage of deep groundwaters

Available studies in the literature show that environmental isotopes are suitable for providing qualitative information about upward leakage from deep groundwaters. In the Northern Sahara for example, Gonfiantini *et al.* (1974) demonstrated a movement of water from the "Continental Intercalaire" aquifer towards the "Complexe Terminal" through a thick clay formation. The same phenomenon was recently shown by Andrews *et al.* (1994) in the Irhazer plain in Niger.

TEMPORAL RECHARGE VARIATIONS

Environmental isotopes, as well as dissolved chemical species and noble gases, are all of great importance for the reconstruction of the climatic conditions that prevailed at the moment of the recharge. Generally, very depleted stable isotope values are indicative of groundwaters recharged under cooler and more humid climatic conditions (Conrad and Fontes, 1970) than the prevailing ones. This distinction is not valid for a short time scale however; some rain events may display very depleted values (Gallaire, 1994; Njitchoua *et al.*, 1995).

Based on the oxygen-18 contents, it has been shown that deep groundwaters from the "Pô Delta" were recharged during the last glaciation (Fig. 5). In Niger, Joseph *et al.* (1990) and Andrews *et al.* (1994) showed that the last recharge of the sedimentary aquifers in the Irhazer plain occurred during the last humid of Holocene period.

In contrast, the remarkable homogeneity in stable isotope contents of the groundwaters between the recharge and the discharge areas of the confined aquifers in the Mekong Delta (Vietnam), indicates that the recharge conditions during the last 40,000 years have remained very stable (Ho *et al.*, 1992).

AQUIFER DYNAMIC

The homogeneity of the isotopic composition of large aquifers may reflect either very stable recharge conditions in time (Vietnam) or very long residence time of water during which diffusion processes occurred and smoothed any past fluctuations, as is the case in the great regional North African aquifer "*Continental Intercalaire*" (Gonfiantini *et al.*, 1974).

On a smaller time and space scale, isotopic homogeneity may be locally acquired with particular geological and geomorphological features such as the presence of a thick alteritic layer over a crystalline aquifer (i.e. in some parts of the granitic belt of the Sahelian region). Homogeneity then results from mixing of water from successive recharge episodes with that of the aquifer. Fontes *et al.* (1969) found that the annual mean stable isotope contents in the precipitation and groundwater from Kimi Kimi were quite identical.

Spatial heterogeneity in stable isotope contents of groundwaters may, on the contrary, result from rapid and direct infiltration of rainfall – as in the case of short residence time in the Liptako aquifer in Southern Niger (Ousmane *et al.*, 1984) – or indicate hydraulic discontinuities – as in the case of longer residence time in the aquifer of the Mont-Blanc tunnel (Fontes *et al.*, 1978).

Version française

INTRODUCTION

Face à la demande croissante et à la dégradation continuelle de la qualité des eaux de surface, le recours systématique aux réserves en eaux souterraines est devenu partout une nécessité. Et la même question revient continuellement aux hydrogéologues : les ressources exploitées sont-elles renouvelées ? Si oui, comment et à quel taux ?

Développée depuis plusieurs décennies (le premier colloque sur ce thème eut lieu à Tokyo en 1963), l'application des techniques nucléaires et isotopiques, notamment celles mettant en œuvre les isotopes de l'environnement, a largement contribué à répondre à ces questions en améliorant la connaissance des mécanismes de recharge et de la dynamique des aquifères. La mise en œuvre de ces techniques, jadis réservées à quelques initiés, s'est heureusement étendue au fil des années. Il ne peut être actuellement envisagé d'étude complète de systèmes aquifères sans faire appel, parallèlement aux méthodes de l'« hydrogéologie classique », aux techniques de la géochimie isotopique.

Les quelques exemples présentés dans cette note ont été sélectionnés pour leur côté démonstratif. Ils sont pour la plupart tirés d'études réalisées par les auteurs, souvent en collaboration avec le Professeur J.-Ch. Fontes.

**CARACTÉRISATION ET ÉVALUATION
DE LA RECHARGE ACTUELLE DES AQUIFÈRES**

On admet généralement que l'alimentation des aquifères s'effectue suivant trois mécanismes : (i) par infiltration directe des précipitations aux aires d'affleurement ; (ii) par percolation latérale à partir des eaux de surface ; et (iii) à travers la contribution d'eau en provenance d'autres aquifères (Simmons, 1988).

La recharge directe

La notion de « recharge directe » des aquifères est liée à celle de l'« infiltration efficace », généralement définie comme la part de la pluie qui échappe à l'évapotranspiration et au ruissellement pour rejoindre la nappe (Castany et Margat, 1977).

Dans les régions tempérées, la détermination de ce paramètre n'est certes pas aisée mais ne pose généralement pas, notamment en ce qui concerne les nappes libres, de problèmes particuliers (Hamid *et al.*, 1989). L'observation des fluctuations piézométriques, du débit des sources et du régime des cours d'eau qui drainent les aquifères permet d'effectuer des estimations satisfaisantes. L'emploi des lysimètres, sous réserve des précautions nécessaires⁽¹⁾

1. La création artificielle d'une zone à potentiel de succion nul (pour le drainage de l'eau), conduit à simuler la présence d'une nappe à la base du dispositif.

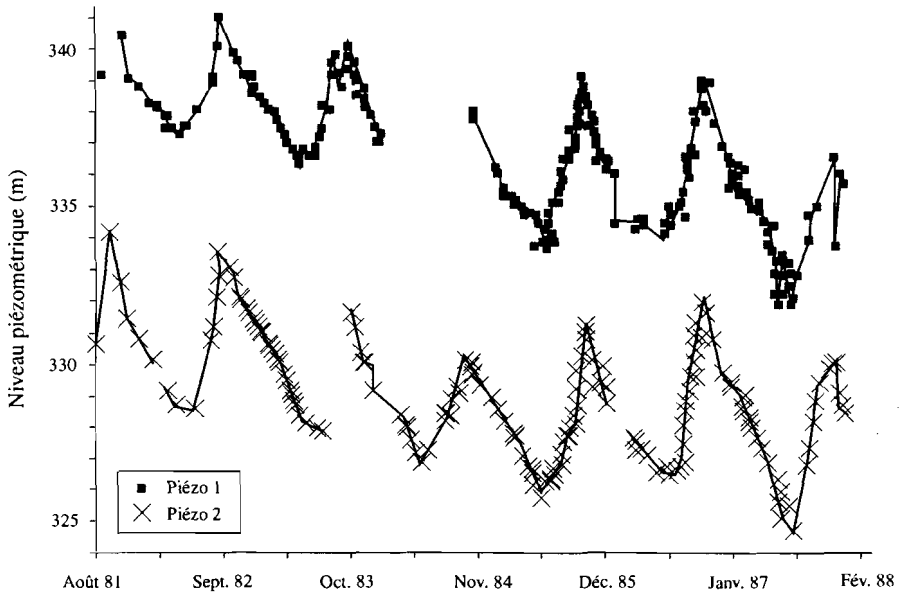


FIGURE 1.

Fluctuations piézométriques dans la région de Bougouni (Mali). In *DNHE/PNUD*, 1988.

Fluctuations of piezometric levels in the Bougouni region (Mali). From DNHE/PNUD, 1988.

(Aranyossy, 1991), concourt également à une meilleure estimation locale de l'infiltration et offre surtout un intérêt majeur dans le suivi des processus d'acquisition de la chimie des eaux dans la zone non saturée (Vachaud *et al.*, 1974, 1981 ; Dever *et al.*, 1982).

Sous conditions arides et semi-arides, la situation est fort différente. Le réseau hydrographique est réduit et ne fonctionne que temporairement pour collecter le ruissellement de surface pendant la saison des pluies. En l'absence de drainage profond (la topographie est généralement très plane en région sahélienne et ne permet pas le drainage vers des aquifères profonds), les baisses piézométriques observées (Fig. 1) pendant la saison sèche ne peuvent s'expliquer que par une importante reprise évapotranspiratoire qui peut annuler et même être supérieure à la recharge saisonnière. La valeur de l'infiltration efficace dépend donc là de l'échelle de temps considérée pour l'estimation du bilan hydrique (Fig. 2). Les différentes échelles de temps et d'espace adoptées dans les diverses études de bilan hydrique sous climat aride et semi-aride, expliquent en partie la disparité des résultats obtenus dans une même région. Les études comparatives menées dans le Nord-Sénégal (Tandia, 1990 ;

Aranyossy et Gaye, 1992) sont par exemple très significatives : elles fournissent des estimations de l'infiltration efficace variant, suivant les méthodes employées, entre 0 et 95 mm pour une même année (cf. Tableau).

Face à cette difficulté, la méthode basée sur la localisation du pic de tritium thermonucléaire reste, en zone non saturée profonde, une alternative pour estimer l'infiltration efficace. La mise en évidence du pic de tritium à 20 et 12 m de profondeur dans les sables dunaires non saturés au Nord-Sénégal (Fig. 3)

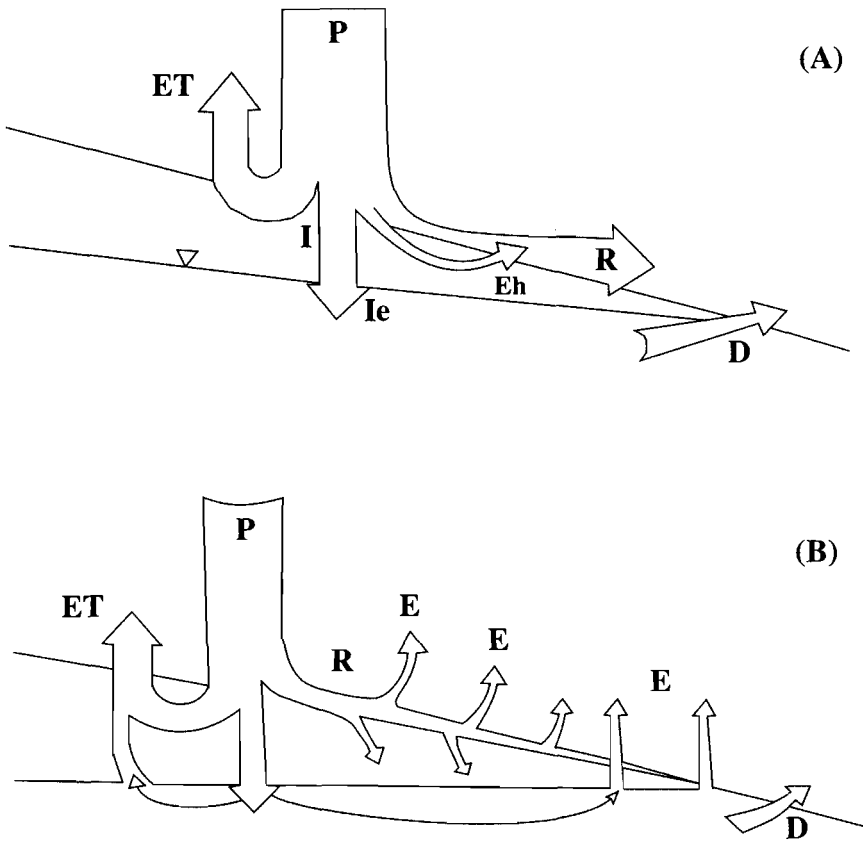


FIGURE 2.

Éléments du bilan hydrique sous climat tempéré (A) et sous climat semi-aride (B). D'après Knutsson, 1988, modifié. P – précipitations ; R – ruissellement + écoulements superficiels ; Eh – écoulement hypodermique ; ET – évapotranspiration ; I – infiltration, Ie – infiltration efficace ; D – drainage de l'aquifère.

Elements of water balance under temperate (A) and semi-arid (B) climates. From Knutsson, 1988, modified. P : precipitations, R : total runoff, Eh : underflow, ET : evapotranspiration, I : infiltration, Ie : efficient residual rainfall, D : groundwater drainage.

TABLEAU/TABLE
 Résultats comparatifs de l'estimation de l'infiltration efficace
 par différentes méthodes
*Comparative results of the estimation of the efficient residual rainfall
 using different methods (Tandia, 1990)*

| Méthodes de calcul | | | | | | | |
|---------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|--------------------------|
| | Variations piézométriques | | | Bilan hydrique | | Physiques | Simu- lations |
| | seuil de Hubert | méthode de Gaget | méthode directe | Thornth- waite | lysi- métrique | | |
| 1977 | 0 | 0 | 0 - 16 | 0 | 29 - 32 | 53 | 0 |
| 1978 | 58 | 0 | 0 - 12 | 0 | 52 - 71 | 95 | 0 |
| 1979 | 3 | 0 | 12 - 19 | 0 | 39 - 52 | 70 | 0 |
| 1980 | 0 | 0 | 0 - 3 | 0 | 34 - 45 | 61 | 0 |
| Année moyenne | 0 | 0 | 0 | 0 | 38 - 51 | 69 | 0 |

a par exemple permis d'estimer la valeur de l'infiltration directe locale à 22 et 26 mm/an respectivement, soit 6,5 et 8 % des précipitations depuis 1963 (Aranyossy et Gaye, 1992). Ces résultats sont d'ailleurs tout à fait concordants avec les études de la recharge basées sur le bilan des chlorures et leur distribution dans la zone non saturée (Edmunds *et al.*, 1992 ; Edmunds et Gaye, 1994).

Ces exemples soulignent en outre que la présence de tritium dans une nappe, témoin de l'apport d'eau récente, ne traduit pas automatiquement, en terme de bilan, une recharge effective. Inversement, l'absence de tritium ne signifie pas forcément une absence de recharge actuelle ; elle peut simplement correspondre à un temps de transit de l'eau dans la zone non saturée supérieur à 35-40 ans.

La recharge indirecte

On entend par « recharge indirecte », celle qui provient de la percolation latérale des eaux de surface.

En zones tempérées, au pied des chaînes montagneuses, la recharge (favorisée par le fort gradient hydraulique et la forte transmissivité des relais alluvionnaires) s'effectue principalement par ce mécanisme. L'étude isotopique de la basse plaine vénitienne (Fig. 4) a par exemple montré que les eaux souter-

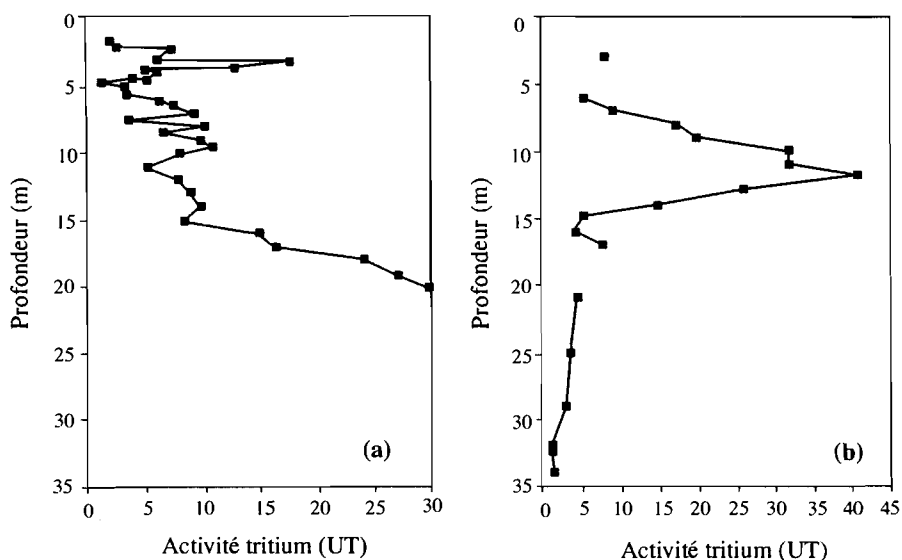


FIGURE 3.

Évolution du tritium dans deux profils de sables quaternaires à Louga (Nord-Sénégal).
D'après Aranyossy et Gaye, 1992.

*Tritium profile in pore water from the Quaternary sands at Louga (Northern Senegal).
From Aranyossy and Gaye, 1992.*

raines sont tributaires des rivières pré-alpines et alpines (Bortolami *et al.*, 1973). Dans les parties médiane et haute de la plaine, les eaux souterraines, caractérisées par une teneur en oxygène-18 homogène et voisine de -10‰ , proviendraient des rivières préalpines Brenta et Piave. Sous la lagune, les eaux souterraines, avec une teneur en oxygène-18 plus appauvrie et proche de -12‰ , correspondent à une recharge provenant de la rivière alpine Adige.

Ce mécanisme de recharge revêt également une grande importance en milieu semi-aride. Dans le bassin des « Grès de Garoua » au Nord-Cameroun, la présence de fortes teneurs en tritium décelées dans les forages localisés le long de la Bénoué et de ses affluents, témoigne de l'existence d'une relation hydraulique entre les eaux de surface et celles de la nappe des grès (Njitchoua *et al.*, 1994).

En milieu aride, les exemples de recharge de grands aquifères sédimentaires par les eaux du réseau de surface sont par contre extrêmement limités, voire inexistantes. La recharge à partir des rivières est limitée aux seules nappes alluviales contenues dans le lit majeur des cours d'eau (Aranyossy, 1991 ; Gallaire, 1995).

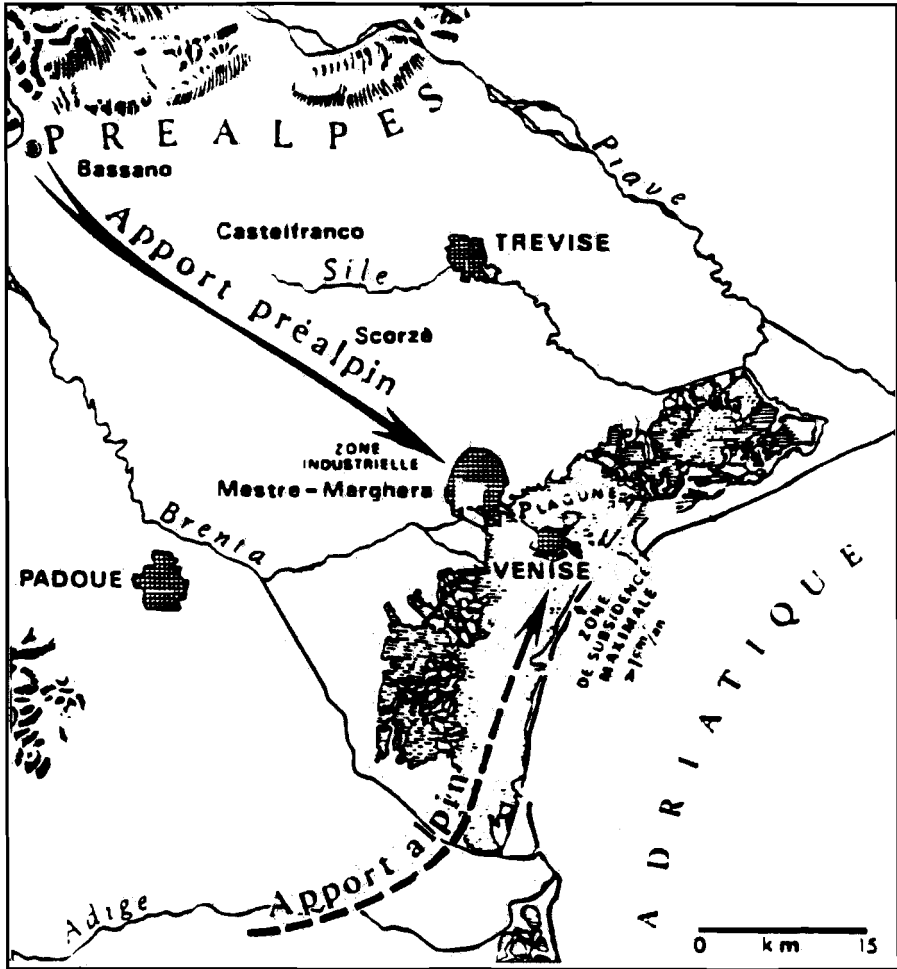


FIGURE 4.

Circulations profondes dans la plaine de Venise. D'après Bortolami *et al.*, 1973.

Deep circulations in the Venitian plain. From Bortolami et al., 1973.

La drainance

Les transferts d'eau entre aquifères sont difficilement révélés par les méthodes «classiques» de l'hydrogéologie. En revanche, ce phénomène a souvent été mis en évidence par l'étude des isotopes de l'environnement. L'un des exemples, sans doute le plus classique et le plus démonstratif, est celui de la drainance ascendante de la nappe du Continental Intercalaire vers l'aquifère du Complexe Terminal au Nord Sahara (Gonfiantini *et al.*, 1974). Cette drainance s'effectue non seulement à la hauteur de Gabès (zone d'exutoire

naturel dans le Sud-Tunisien), mais également à Ouargla (Algérie centrale) à travers une couche d'argile de plus de 400 m d'épaisseur. Plus récemment, le même phénomène a été observé au Niger par Andrews *et al.* (1994) dans la plaine de l'Irhazer le long de la faille majeure d'Inourarem.

VARIATIONS TEMPORELLES DE LA RECHARGE

En milieu semi-aride

Le premier indicateur de la présence d'eau ancienne dans les zones arides et semi-arides est la teneur en isotopes stables. Le cachet isotopique très appauvri de certains échantillons d'eau souterraine par rapport aux teneurs mesurées dans les eaux actuelles correspond en effet à des épisodes de recharge des nappes survenus sous des conditions climatiques plus froides et plus humides que celles régnant actuellement dans les régions considérées (Conrad et Fontes, 1970). Cette distinction n'est cependant plus vraie au niveau des événements pluvieux qui peuvent parfois présenter des teneurs très faibles, même en régions arides (Gallaire *et al.*, 1994 ; Njitchoua *et al.*, 1995).

La confrontation des données isotopiques (stables et radioactives) aux données géochimiques (éléments dissous et gaz rares) permet de reconstituer les variations des conditions de recharge aux limites du système hydrogéologique considéré. Au Niger par exemple, l'étude des aquifères sédimentaires de la plaine de l'Irhazer a permis de mettre clairement en évidence la contribution des dernières périodes humides de l'Holocène (30 000-23 000 ans ; 13 000-3 000 ans) à la recharge des nappes (Joseph *et al.*, 1990 ; Andrews *et al.*, 1994). Toutefois, les différences dans l'âge des eaux ne peuvent pas être interprétées en terme de vitesse de circulation dans l'aquifère. En effet, la répartition des charges et des perméabilités observée actuellement représente un état instantané de l'aquifère et ne peut donc pas être mise directement en parallèle avec la distribution des âges, résultat de l'historique des différents épisodes de recharge.

En milieu tempéré

Dans le Delta de Pô, les teneurs très faibles en oxygène-18 mesurées dans les eaux des aquifères profonds témoignent d'une paléorecharge datant de la dernière glaciation, il y a environ 20 000 ans (Fig. 5). L'appauvrissement des teneurs en oxygène-18 et en carbone-14 avec la profondeur rend compte de l'existence d'une stratification des eaux en rapport avec un système multicouche dont les aquifères n'ont pas été soumis à des phénomènes de drainage et de mélange. Cette stratification isotopique des eaux souterraines témoigne également d'une variation dans le temps des conditions climatiques dans le Delta de Pô.

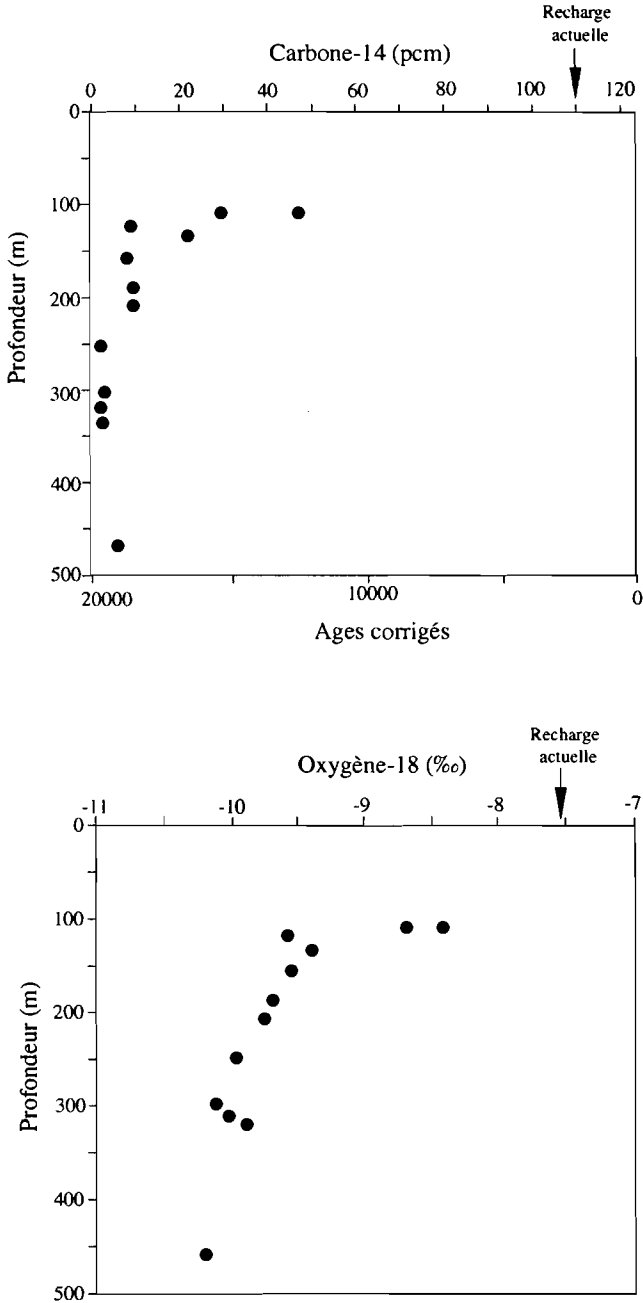


FIGURE 5.

Teneurs en oxygène-18 et en carbone-14 des eaux profondes du delta « del Pô ».
Oxygen-18 and carbone-14 contents of deep groundwaters from the delta « del Pô ».

En milieu tropical humide

Les aquifères captifs sous la plaine alluviale du delta du Mekong (Vietnam), montrent une remarquable homogénéité des teneurs en isotopes stables ($\delta^{18}\text{O} = -7,03 \pm 0,30\text{‰}$ pour la nappe du Pliocène, et $-7,35 \pm 0,19\text{‰}$ pour la nappe du Néogène) entre les zones d'alimentation situées plus à l'ouest dans la partie méridionale du Cambodge et les exutoires en mer de Chine. En tenant compte du fait que la circulation des eaux dans ces nappes est de type « piston », cette homogénéisation de la composition isotopique des eaux souterraines témoigne de la stabilité des conditions climatiques et de la régularité de l'alimentation durant les quarante derniers millénaires (Ho *et al.*, 1992) et, par conséquent, permet de considérer l'hydrodynamique des aquifères comme étant en « régime permanent ».

DYNAMIQUE DES AQUIFÈRES

La distribution géographique des teneurs en isotopes stables des eaux souterraines peut fournir des indications sur les conditions de recharge, les caractéristiques hydrauliques, la continuité et/ou la discontinuité hydraulique des systèmes aquifères.

Dans les grands aquifères, l'homogénéisation spatiale de la composition isotopique des eaux souterraines témoigne souvent d'un temps de résidence prolongé, ce qui permet aux processus de mélange et de diffusion d'effacer toutes traces des variations éventuelles dues à des épisodes successifs de recharge. L'exemple le plus frappant est sans doute celui du Continental Intercalaire d'Afrique du Nord (Gonfiantini *et al.*, 1974) dont les eaux souterraines montrent des teneurs en oxygène-18 très homogènes sur de très grandes étendues. A des échelles de temps et d'espace très réduites, des configurations géomorphologiques particulières (telle la présence d'une épaisse couche d'altérite sur un aquifère cristallin) peuvent contribuer à homogénéiser rapidement le signal isotopique des pluies avant que les eaux d'infiltration ne parviennent à l'aquifère sous-jacent. Fontes *et al.* (1969) ont par exemple montré l'existence d'une identité de faciès isotopique entre la teneur moyenne pluriannuelle des précipitations et la teneur moyenne des eaux souterraines à Kimi Kimi (Tchad).

L'hétérogénéité spatiale des teneurs en isotopes stables peut être en revanche le témoin, soit de recharges directes dont les cachets isotopiques n'ont pas été « tamponnés » par les processus de diffusion et de mélanges en relation avec des temps de résidence très courts ; soit de discontinuités hydrauliques qui ne favorisent pas les processus de mélanges, maintenant ainsi constants les signaux isotopiques même dans le cas de temps de séjour prolongés des eaux. Le premier cas peut être illustré par les hétérogénéités de recharge dans les aqui-

frères du socle cristallin au Niger, notamment dans le Liptako (Ousmane *et al.*, 1984), dans la région de Maradi et Zinder et dans l'Aïr (Joseph *et al.*, 1990). La variabilité de la géochimie et des teneurs isotopiques des eaux souterraines dans le tunnel du Mont Blanc fournit quant à elle un bon exemple de la mise en évidence de discontinuités hydrauliques au sein d'un massif cristallin dans lequel peuvent circuler des eaux récentes à proximité d'eaux très anciennes pratiquement stagnantes (Fontes *et al.*, 1978).

RÉFÉRENCES

- Andrews (J.N.), Fontes (J.-Ch.), Aranyossy (J.F.), Dodo (A.), Edmunds (W.M.), Joseph (A.), et Travi (Y.), 1994. « The evolution of alkaline groundwaters in the continental intercalaire aquifer of the Irhazer Plain, Niger ». *Water Res. Res.*, 30 (1) : 45-61.
- Aranyossy (J.F.), 1991. *L'apport des techniques isotopiques à l'étude de la recharge des aquifères sous contraintes techniques et climatiques extrêmes*. Diplôme d'habilitation à diriger des recherches en Sciences, Univ. Paris-Sud (Orsay), 576 p.
- Aranyossy (J.F.) et Gaye (C.B.), 1992. « La recherche du pic de tritium thermonucléaire en zone non saturée profonde sous climat semi-aride pour la mesure de la recharge des nappes : première application au Sahel ». *C.R. Acad. Sc.*, Paris, 315 (série II) : pp. 637-643.
- Bortolami (G.), Fontes (J.-Ch.) et Panichi (C.), 1973. « Isotopes du milieu et circulations dans les aquifères du sous-sol vénitien ». *Earth Planet. Sc. Lett.*, 19 (3) : 800-808.
- Castany (G) et Margat (J), 1977. *Dictionnaire français d'hydrogéologie*, BRGM.
- Conrad (G.) et Fontes (J.-Ch.), 1970. « Hydrologie isotopique du Sahara-Occidental ». *Isotope Hydrology 1970*, IAEA, Vienne, pp. 405-419.
- Dever (L.), Durand (R.), Fontes (J.Ch.) et Vachier (P.), 1982. « Géochimie des teneurs isotopiques des systèmes saisonniers de dissolution de la calcite dans un sol sur craie ». *Geochim. Cosmochim. Acta*, 4 (3) : 133-140.
- Edmunds (W.M.), Gaye (C.B.) et Fontes (J.-C), 1992. « A record of climatic and environmental change contained in interstitial waters from unsaturated zone of northern Senegal ». *Isotope techniques in water resources development 1991*, Proceed. Symp., IAEA, Vienna 1991, pp. 533-549.
- Edmunds (W.M.) et Gaye (C.B.), 1994. « Estimating the spatial variability of groundwater recharge in the Sahel using chloride ». *J. Hydrol.*, 156 : 47-59.

- Fontes (J.-Ch.), Bortolami (G.C.) et Zuppi (G.M.), 1978. « Hydrologie isotopique du massif du Mont-Blanc ». *Isotope Hydrology 1978*, AIEA, Vienne, pp. 411-440.
- Gallaire (R.), 1995. *Hydrologie en milieu subdésertique d'altitude, le cas de l'Air (Niger)*. Th. Doc. Sc., Univ. Paris-Sud (Orsay), 400 p.
- Gallaire (R.), Fontes (J.Ch.) et Zuppi (G.M.), 1995. « Isotopic characterization and origin of rainwater on the Air massif (Niger) ». *Application of Tracers in Arid Zone Hydrology* (Proceeding of the Vienna Symposium, August, 1994)». IAHS Publi., 232 : 293-302.
- Gonfiantini (R.), Conrad (G.), Fontes (J.-Ch.), Sauzay (G.) et Payne (B.R.), 1974. « Étude isotopique de la nappe du Continental Intercalaire et ses relations avec les autres nappes du Sahara septentrional ». *Isotope Techniques in groundwater Hydrology 1974*, Proceed. Symp., IAEA, Vienna, I : 227-241.
- Hamid (S.), Dray (M.), Ferhi (A.), Dorioz (J.M.), Normand (M.) et Fontes (J.-Ch.), 1989. « Étude des transferts d'eau à l'intérieur d'une formation morainique dans le bassin du Léman ». *J. Hydrol.*, 109 : 369-385.
- Ho (H.D.), Aranyossy (J.F.), Louvat (D.), Hua (M.Q.), Nguyen (T.V.) et Nguyen (K.C.), 1991. « Environmental isotope study related to the origin, salinization and movement of groundwater in the Mekong Delta (Viet Nam) ». *Isotope techniques in water resources development 1991*, IAEA, pp. 415-428.
- Joseph (A.), Aranyossy (J.F.) et Kanta (I.), 1990. « Recharge et paléorecharge des aquifères discontinus du socle de l'Air (Niger) ». *Geodynamica Acta*, 4 : 185-197.
- Njitchoua (R.), Aranyossy (J.F.), Fontes (J.-Ch.), Michelot (J.L.), Naah E. et Zuppi (G.M.), 1995. « Oxygène-18, deutérium et chlorures dans les précipitations à Garoua, Nord-Cameroun : implications météorologiques ». *C.R. Acad. Sci. Paris*, 321 (série II a) : 853-860.
- Njitchoua (R.), Fontes (J.-Ch.), Zuppi (G.M.), Aranyossy (J.F.) et Naah (E.), 1995. « Use of chemical and isotopic tracers in studying the recharge processes of the Upper Cretaceous aquifer of the Garoua Basin, Northern-Cameroon ». *Application of Tracers in Arid Zone Hydrology* (Proc. Symp. Vienna 1994). IAHS Publ. 232 : 363-372.
- Simmers (I.), 1988. « Estimation of natural groundwater recharge ». D. Reidel Publishing Company, *NATO ASI Series, C*, 222 : 510 p.
- Tandia (A.) 1990. *Revue critique des méthodes d'évaluation de la recharge des nappes. Contribution de l'approche géochimique et isotopique. Louga-Nord Sénégal*. Th. 3^e cycle, Univ. Dakar, 138 p.

- Vachaud (G.), Gaudet (J.P.) et Kuraz (V.), 1974. « Air and water flow during ponded infiltration in a vertically bounded column of soil ». *J. Hydrol.*, 50 : 191-200.
- Vachaud (G.), Vauclin (M.) et Colombani (J.), 1981. « Bilan hydrique dans le Sud-Tunisien. Caractérisation expérimentale des transferts dans la zone non saturée ». *J. Hydrol.*, 49 : 31-52.