

Revue des sciences de l'eau

Estimation pratique de l'âge des eaux souterraines par le tritium

P. Hubert, P. Olive et S. Ravailleau

Volume 9, numéro 4, 1996

URI : id.erudit.org/iderudit/705265ar
<https://doi.org/10.7202/705265ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN 0992-7158 (imprimé)
1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Hubert, P., Olive, P. & Ravailleau, S. (1996). Estimation pratique de l'âge des eaux souterraines par le tritium. *Revue des sciences de l'eau*, 9(4), 523-533. <https://doi.org/10.7202/705265ar>

Résumé de l'article

Le tritium, isotope radioactif de l'hydrogène, est considéré comme un élément dateur des eaux souterraines. Il permet à l'hydrogéologue d'estimer le temps de séjour moyen des eaux d'un aquifère. Produit naturellement dans l'atmosphère, les teneurs dans les précipitations ont tout d'abord augmenté, suite aux essais thermonucléaires aériens de 1952 à 1963, pour ensuite diminuer et se stabiliser des industries nucléaires, supérieure à la teneur naturelle de 5 UT. Actuellement, la teneur moyenne se situe entre 10 et 30 UT. Grâce au suivi des teneurs en 3H des précipitations, il est possible de déterminer le temps de séjour moyen des eaux souterraines d'un aquifère à l'aide de modèles mathématiques qui, à partir d'un signal d'entrée (teneurs en 3H dans les précipitations) et d'un signal de sortie (teneurs en 3H dans les eaux souterraines d'un aquifère), calculent le meilleur ajustement possible entre les sorties calculées et les valeurs mesurées. De cet ajustement, on en déduit le temps de séjour moyen. Ces études isotopiques utilisent classiquement trois types de modèles suivant la façon dont les eaux se mélangent en traversant un milieu poreux: le modèle mélange ou exponentiel, le modèle piston et le modèle dispersif. Cet ensemble de modèle peut être généralisé en différenciant temps de séjour moyen et âge d'une molécule d'eau. Ces modèles ont été utilisés pour étudier les systèmes des sources minérales de la Versoie et d'Evian (Haute-Savoie, France) en appliquant un modèle mélange à la source de la Versoie et un modèle dispersif à la source d'Evian, ce qui a permis d'estimer leur temps de séjour.

Tous droits réservés © Revue des sciences de l'eau, 1996
Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter en ligne. [<https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>]

Érudit

Cet article est diffusé et préservé par Érudit.

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. www.erudit.org

Estimation pratique de « l'âge » des eaux souterraines en Europe par le tritium

Practical estimation of european groundwaters
age with tritium

P. OLIVE^{2*}, P. HUBERT¹ et S. RAVAILLEAU²

Reçu le 16 novembre 1995, accepté le 4 octobre 1996*.

SUMMARY

Tritium, hydrogen radioactive isotope, is considered as a dating element of ground-water and allows the hydrogeologist to evaluate the aquifer waters *average transit time T*. This parameter is important for questions about evaluation, exploitation and protection of water resources.

Naturally produced in the atmosphere by the neutronic component of cosmic radiation on nitrogen, ³H is present in precipitations with about a 5 tritium units (TU) value. With the thermonuclear aerial tests, from 1952 to 1980, the ³H content has increased to reach a top in 1963 with about a 2500 TU value and so has decreased to 1980 to reach a 50 TU value. Since 1980, the thermonuclear aerial tests have stopped but the civil thermonuclear stations have influenced the ³H content which is actually between 10 and 30 TU.

Thanks to the regular analysis of the precipitations ³H contents, it's possible to evaluate the aquifer ground-water transit time *T* with mathematical models. This kind of models use an "in signal" (³H contents in precipitations) and an "out signal" (³H contents in aquifer ground-water) and so calculate the best fitting between the calculated output and the measured values. This best fitting is obtained for this time *T*.

According to the way of which the waters mix themselves going across a porous media, three kind of models are used: the *good mixing* or *exponential* model which suppose that the efficient water introduced into the system is completely and uniformly mixed to the aquifer water, so the waters output from the system are the representation of the aquifer waters; the *piston flow* model which suppose that the efficient water is going across the aquifer with a constant velocity and the *dispersion* models which suppose a dispersion phenomenon owing to the crossing system heterogeneity. The piston flow model and the exponential

1. URA CNRS 1367, Ecole des Mines de Paris, 77305 Fontainebleau, France.

2. Université Pierre et Marie Curie, Centre de Recherches Géodynamiques, 74203 Thonon-les-Bains, France.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 29 août 1997.

model are the two possible extreme cases of this dispersion model: effectively, greater the dispersion is the more the calculated output tend to the exponential model output and smaller the dispersion is the more the calculated output tend to the piston flow model output.

To generalize this models a distinction can be introduced between the *age* of a water molecule equivalent to the *residence time* and the *transit time*. The residence time is the time elapsed since any element has entered into a system in opposite to the transit time wich is the time spent by an element between entry and outflow from the system.

This distinction implies three cases: the residence time is smaller than the transit time so according as there is mixing or not we have the dispersion or piston flow model; the residence time is equal to the transit time so we have the exponential model; the residence time is greater than the transit time which is an unutilized case in classical modelisation and which may be qualified as a *short-circuit model*.

This models have been applied on the Versoie and Evian mineral water systems (Haute-Savoie, France), for that which we have long time series of ^3H measures. The Evian mineral water system uses a dispersion model for that wich the average transit time is between 40 and 80 years. The Versoie mineral water system uses a mixing model for that wich the average transit time is between 2 and 9 years.

In conclusion, the long series of ^3H measures realized on France, Switzerland, Italy and Spain ground-water for 1990 to 1993 allow to distinguish four category of results: the ^3H contents smaller than 2 TU which characterize an old ground-water of wich average transit time is greater than 2000 years; the ^3H contents between 2 and 10 TU wich characterize a ground-water of wich average transit time is between 200 and 300 years or a mixing between an old and a recent water; the ^3H contents between 10 and 40 TU wich caraterize a recent ground-water; the ^3H contents greater than 40 TU wich charaterize a ground-water near a nuclear station.

Key-words : tritium, groundwaters, dating, average transit time, mathematical models.

RÉSUMÉ

Le tritium, isotope radioactif de l'hydrogène, est considéré comme un élément dateur des eaux souterraines. Il permet à l'hydrogéologue d'estimer le *temps de séjour moyen* des eaux d'un aquifère.

Produit naturellement dans l'atmosphère, les teneurs dans les précipitations ont tout d'abord augmenté, suite aux essais thermonucléaires aériens de 1952 à 1963, pour ensuite diminuer et se stabiliser à une teneur, due aux rejets des industries nucléaires, supérieure à la teneur naturelle de 5 UT. Actuellement, la teneur moyenne se situe entre 10 et 30 UT.

Grâce au suivi des teneurs en ^3H des précipitations, il est possible de déterminer le temps de séjour moyen des eaux souterraines d'un aquifère à l'aide de modèles mathématiques qui, à partir d'un signal d'entrée (teneurs en ^3H dans les précipitations) et d'un signal de sortie (teneurs en ^3H dans les eaux souterraines d'un aquifère), calculent le meilleur ajustement possible entre les sorties calculées et les valeurs mesurées. De cet ajustement, on en déduit le temps de séjour moyen.

Ces études isotopiques utilisent classiquement trois types de modèles suivant la façon dont les eaux se mélangent en traversant un milieu poreux : le modèle *mélange* ou *exponentiel*, le modèle *piston* et le modèle *dispersif*. Cet ensemble de modèle peut être généralisé en différenciant *temps de séjour moyen* et *âge* d'une molécule d'eau.

Ces modèles ont été utilisés pour étudier les systèmes des sources minérales de la Versoie et d'Evian (Haute-Savoie, France) en appliquant un modèle mélange à la source de la Versoie et un modèle dispersif à la source d'Evian, ce qui a permis d'estimer leur temps de séjour.

Mots clés : tritium, eaux souterraines, datation, temps de séjour moyen, modèles mathématiques.

1 – POURQUOI DATER LES EAUX SOUTERRAINES ?

Il y a près de 30 ans, J. MARGAT notait que « Loin de représenter un caractère purement spéculatif les techniques de datation basées sur les radio-isotopes naturels en hydrologie touchent d'assez près les questions d'évaluation, d'exploitation et de protection des ressources en eau, pour retenir toute l'attention des hydrogéologues praticiens et des responsables de l'action publique dans le domaine de l'eau » (MARGAT, 1966).

En effet, si l'hydrogéologue peut mesurer ou estimer assez précisément les précipitations P , l'écoulement de surface Q et l'évapotranspiration E , l'estimation du volume d'eau souterraine V est beaucoup plus problématique. Seule la mesure de leur temps de séjour T , par un radioélément comme le tritium, lui permet d'estimer le volume d'eau souterraine. Dans l'hypothèse stricte d'un régime permanent, le bilan hydrique se réduit à :

$$Q = P - E \text{ (en } L^3.T^{-1}\text{)}$$

soit en divisant par V (en L^3) :

$$Q/V = (P - E)/V = \alpha \text{ en } (T^{-1})$$

Ce rapport α est le taux de renouvellement des eaux souterraines lié ainsi au temps de séjour moyen T : $T = 1/\alpha$ (en T).

Donc, ayant mesuré Q (ou $P - E$) et T on peut en déduire V .

2 – LE TRITIUM DANS LES PRÉCIPITATIONS EN EUROPE

Le tritium (3H), isotope radioactif de l'hydrogène, peut être considéré comme un élément traceur et surtout dateur de l'eau (HTO).

La période ou demi-vie du 3H est de $12,43 \pm 0,05$ ans (UNTERWEGER *et al.*, 1980) et sa teneur s'exprime généralement en unité tritium ou UT. Une unité tritium correspond à 1 atome de 3H pour 10^{18} atomes d'hydrogène soit $3,193 \text{ pCi.l}^{-1}$ ou $0,118 \text{ Bq.l}^{-1}$.

Le tritium est produit naturellement par la composante neutronique du rayonnement cosmique sur l'azote atmosphérique avec une teneur dans les précipitations, sous les latitudes moyennes de l'hémisphère Nord, de l'ordre de 5 UT (ROETHER, 1967), soit $0,59 \text{ Bq.l}^{-1}$.

Suite aux essais thermonucléaires aériens qui ont débuté le 31 octobre 1952 et qui se sont poursuivis jusqu'en 1963, les teneurs des précipitations ont atteint quelques milliers d'UT (fig. 1).

De 1963 à 1966 il y a eu un arrêt total des essais et les teneurs ont décliné avec une pseudo période voisine de l'année.

De 1967 à 1980 les essais thermonucléaires aériens sont de très faible puissance : moins de 3 % du tritium produit artificiellement de 1952 à 1967.

Depuis 1980, aucun essai aérien n'a eu lieu et la teneur aurait dû atteindre, avec une pseudo période de 1 an, le niveau naturel (~ 5 UT) vers 1985. Or, il se maintient depuis cette époque entre 10 et 30 UT (1,18 et 3,54 Bq.l⁻¹), ce qui semble dû à l'influence des industries nucléaires civiles (LÉTOLLE et OLIVE, 1983 ; PALLY *et al.*, 1993) (fig. 1).

Sur la figure 1 sont reportées les teneurs mensuelles en ³H des précipitations mesurées à Thonon depuis juin 1963 et les moyennes annuelles pondérées par les hauteurs des précipitations.

Pour la période antérieure à 1963, une régression est établie avec les teneurs mesurées à Ottawa, station située à la même latitude que Thonon et ayant fonctionné depuis 1954 (AIEA, 1981) :

$$[\text{Thonon}] = 0,892 \cdot [\text{Ottawa}]$$

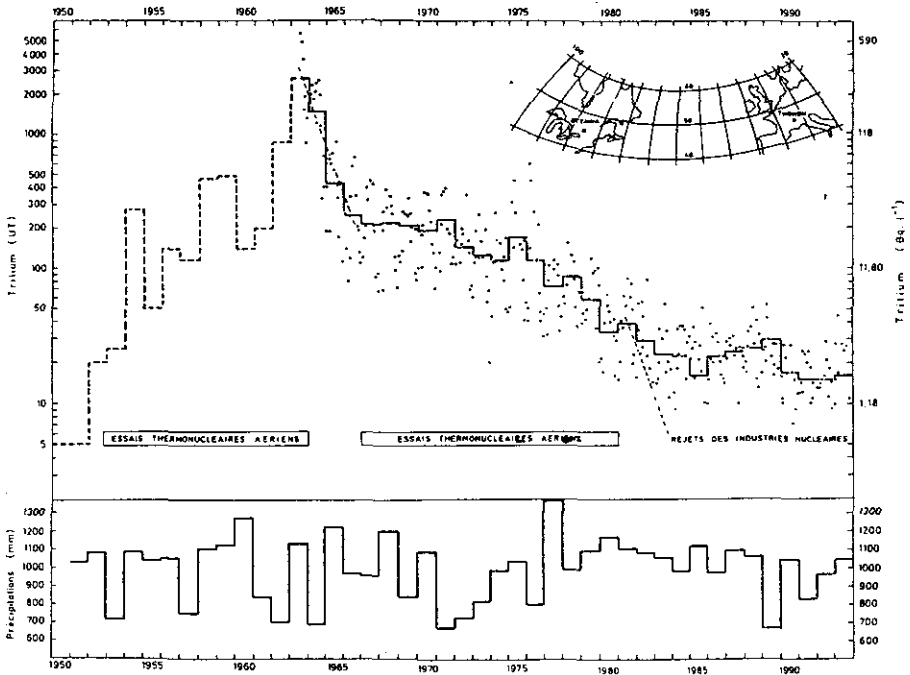


Figure 1 Teneurs en ³H mensuelles (●) et annuelles (–) dans les précipitations à Thonon de 1963 à 1993 ainsi que les hauteurs annuelles des précipitations.

Monthly (●) and yearly (–) ³H contents in the Thonon's precipitations for 1963 to 1993 and also the yearly precipitation depth.

Sous les latitudes moyennes, la recharge R des nappes d'eau souterraines par les pluies efficaces ($R = P - E$) a lieu essentiellement en automne et en hiver. Ainsi, pour l'année 1993 à Thonon, la teneur moyenne annuelle de la recharge est de 10 UT ($1,18 \text{ Bq.l}^{-1}$) tandis que celle des précipitations est de 16 UT ($1,89 \text{ Bq.l}^{-1}$) (fig. 2).

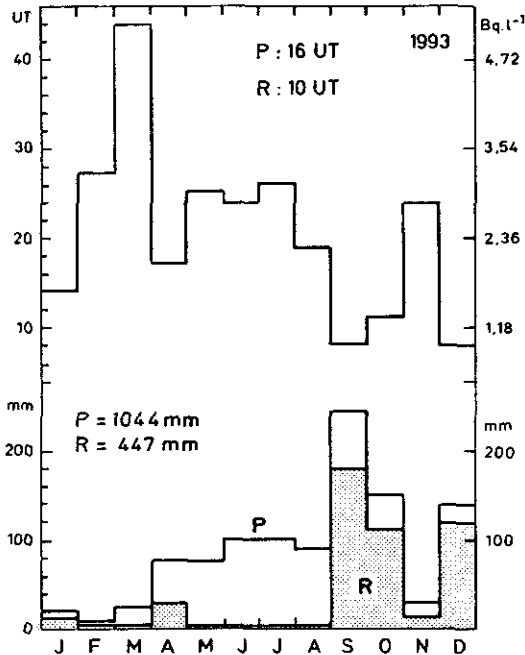


Figure 2 Teneurs en ^3H dans les précipitations mensuelles et hauteurs mensuelles des précipitations P et de la recharge R ($P - E$) à Thonon en 1993.

^3H contents in the monthly precipitations and the monthly precipitations depth P and recharge R ($P - E$) at Thonon in 1993.

3 – LE TRAÇAGE DES EAUX SOUTERRAINES PAR LES PRÉCIPITATIONS TRITIÉES

Les études isotopiques distinguent classiquement (DANCKWERTS, 1953) trois types de modèles selon la façon dont les eaux se mélangent en traversant un milieu poreux.

a) Ou bien la pluie efficace se mélange complètement à l'eau de l'aquifère et la teneur en ^3H à la sortie du système est identique à celle répartie uniformément dans tout l'aquifère : le modèle est de type mélange ou exponentiel. Ceci implique que toute section du réservoir contient, dans les mêmes proportions, des molécules d'eau de tous les âges et que les eaux à l'exutoire sont représentatives de celles de l'aquifère (fig. 3).

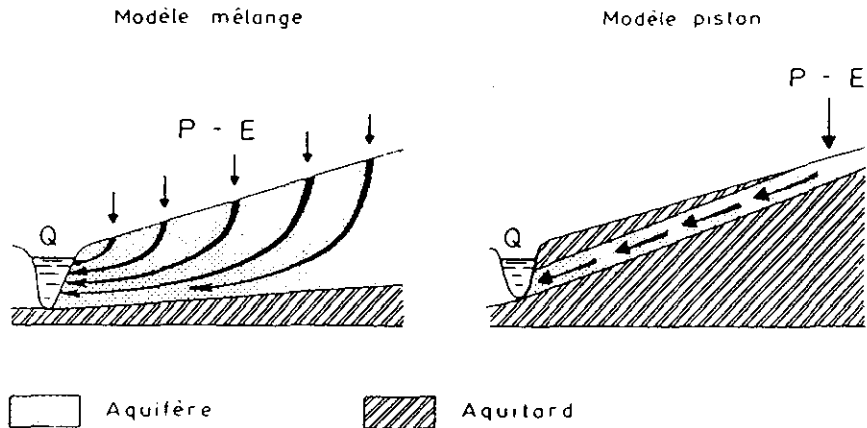


Figure 3 Représentation schématique des écoulements souterrains de types mélange et piston.

Schematic representation of ground-water flow with piston flow and exponential models.

b) Ou bien la pluie efficace traverse l'aquifère à vitesse constante comme un écoulement d'eau dans un tuyau et toutes les molécules d'eau ont le même temps de séjour : le modèle est de type piston (fig. 3).

c) Compte tenu de l'hétérogénéité du milieu entraînant des différences de vitesses entre les pores et entre plusieurs couches de l'aquifère, il peut résulter une dispersion du signal tritié de la pluie par rapport à la direction principale de l'écoulement. Plus la dispersion augmente et plus le signal de sortie tend vers celui du modèle de mélange parfait. Inversement, si la dispersion diminue le signal se rapproche du modèle piston. Les modèles mélange et piston constituent donc les cas limites du modèle dispersif.

Cet ensemble de modèles est en fait incomplet mais il peut être généralisé en distinguant avec BOLIN et RODHE (1973) le temps de séjour d'une molécule d'eau dans l'aquifère, c'est-à-dire le temps passé par celle-ci depuis son entrée jusqu'à sa sortie du système, de l'âge d'une molécule d'eau, c'est-à-dire le temps écoulé depuis le moment où elle est entrée dans l'aquifère.

a) *Age moyen inférieur au temps de séjour moyen.* Cela signifie qu'une molécule d'eau entrée dans le système a peu de chances d'en sortir rapidement. Si l'on recourt à une analogie démographique, on peut reconnaître une population dont la mortalité infantile est très basse. Dans un système hydrogéologique, cela se traduit par une zone de vidange éloignée de la zone d'alimentation.

Le cas général implique un mélange partiel des eaux et correspond donc au modèle dispersif.

Si aucun mélange ne se produit, on est en présence du modèle piston où l'âge moyen est égal à la moitié du temps de séjour moyen.

b) *Age moyen égal au temps de séjour.* Dans ce cas les eaux de la recharge se mélangent totalement avec les eaux de l'aquifère : modèle mélange.

c) *Age moyen supérieur au temps de séjour moyen.* Ce cas, négligé par les modèles classiques, est caractérisé par une tendance à la sortie de nombreuses molécules d'eau peu de temps après leur entrée. Le temps de séjour moyen de ces molécules est donc court, tandis que l'âge moyen des molécules d'eau qui échappent aux sorties immédiates est relativement important. Pour reprendre la comparaison démographique, on dira que la mortalité infantile est très élevée. On peut qualifier ce cas de modèle court-circuit.

Cela peut correspondre au modèle mélange de la figure 3 où un pompage n'intéresserait que la partie superficielle de l'aquifère en prélevant les eaux les plus récentes et les plus superficielles.

L'ensemble de ces modèles peuvent s'exprimer comme des cas particuliers d'un modèle général où la fonction densité de probabilité des temps de séjour est décrite par une loi gamma à deux paramètres (HUBERT et OLIVE, 1995).

APPLICATION AUX EAUX D'ÉVIAN ET DE THONON

Nous disposons pour les eaux d'Evian et de Thonon d'une chronique de 30 années de mesure du tritium. Pour les calculs, nous avons programmé le modèle de la loi gamma (HUBERT et OLIVE, 1995) dont les résultats ont été confirmés par le logiciel Multis (RICHTER et SZYMPCZAK, 1992) que nous avons utilisé pour déterminer leurs temps de séjour.

Le complexe d'Evian (BLAVOUX, 1978) a été constitué durant l'englaciation du Würm récent. Les dépôts sont constitués d'une succession d'alluvions silto-sableuses à graveleuses séparées par des moraines de fond. Les ressources en eau souterraine captive sont contenues dans chaque horizon perméable.

Pour l'eau de cette nappe captive (*fig. 4*), le meilleur accord entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées est obtenu grâce au modèle dispersif avec un temps de séjour moyen compris entre 40 et 80 ans (le calage automatique fournit la valeur 51 ans).

On constate des valeurs mesurées plus élevées dans les années 1965/66, 1971/72 et 1975/76 que celles proposées par le modèle dispersif. On peut y voir une très faible participation de circulations préférentielles plus rapides, de l'ordre de la dizaine d'années, correspondant aux pics de 1954, 1958/59 et 1963 (*fig. 1*).

Le complexe de Thonon (BLAVOUX, 1978) a été édifié lors de la décrue glaciaire finale du Würm récent. Les sédiments, disposés en terrasses de kame, sont glaciolacustres puis fluvioglaciaires. Chaque terrasse est aquifère et les niveaux d'eau sont proches du sol.

Pour cette nappe libre (*fig. 5*), le meilleur accord a lieu pour le modèle mélange avec un temps de séjour moyen compris entre 2 et 9 ans (le calage automatique fournit la valeur 4 ans).

La fourchette d'estimation des temps de séjour est large. Ceci est probablement dû au fait que la modélisation est établie pour un régime permanent alors qu'en réalité les précipitations annuelles varient largement, par exemple à Thonon de 600 à 1 200 mm (*fig. 1*).

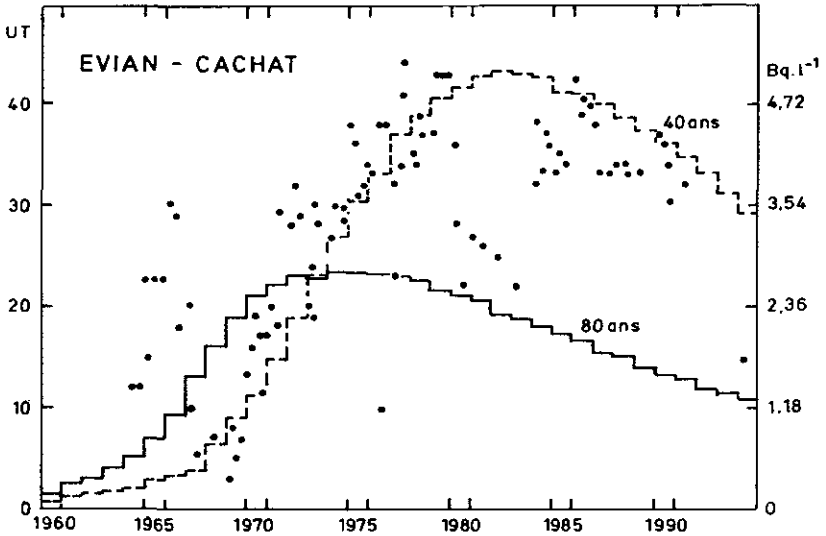


Figure 4 Teneurs mesurées (●) en ^3H des eaux de la nappe captive d'Evian-Cachat de 1965 à 1993 et teneurs calculées selon le modèle dispersif pour des temps de séjour moyens de 40 (- -) et 80 (—) ans.

Waters ^3H measured contents (●) in Evian-Cachat confined ground-water table from 1965 to 1993 and calculated contents according to the dispersion model for the 40 (- -) and 80 (—) years average transit time.

CONCLUSIONS PRATIQUES

Il est toujours possible d'obtenir une première estimation des temps de séjour moyens grâce à ces différents types de modèle.

Les teneurs mesurées les plus fréquentes permettent de distinguer actuellement quatre catégories de résultats.

a) Teneurs inférieures à 2 UT (0,24 Bq.l⁻¹)

Il s'agit essentiellement d'eaux provenant d'aquifères profonds.

Une teneur inférieure à 0,2 UT (0,024 Bq.l⁻¹), seuil de mesure en comptage par scintillation liquide après enrichissement électrolytique, indique que l'on est en présence d'une eau ancienne dont le temps de séjour est supérieur ou égal à environ 2 000 ans.

Une teneur comprise entre 0,2 et 2 UT (0,024 Bq.l⁻¹ et 0,24 Bq.l⁻¹) peut avoir trois origines. Il peut s'agir d'une eau dont le temps de séjour est de l'ordre de 1 000 à 2 000 ans. Ou bien il peut y avoir, pour les eaux des nappes profondes au contact de roches cristallines riches en uranium, thorium, lithium et bore, production in situ de ^3H qui peut atteindre jusqu'à 2 UT (0,24 Bq.l⁻¹) dans les cas les

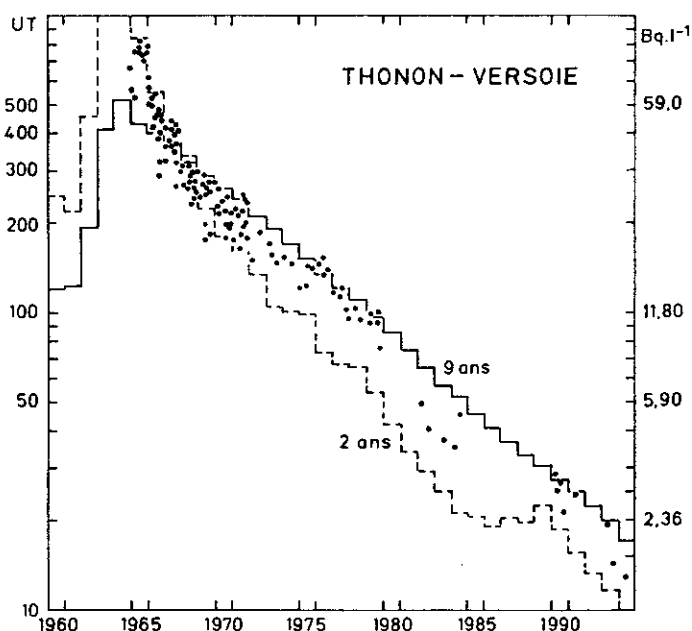


Figure 5 Teneurs mesurées (●) en ^3H des eaux de la nappe libre de Thonon-Versoie de 1965 à 1993 et teneurs calculées selon le modèle de mélange pour des temps de séjour moyens de 2 (- -) et 9 (—) ans.

Waters ^3H measured contents (●) in Thonon-Versoie free water table from 1965 to 1993 and calculated contents according to the exponential model for the 2 (- -) and 9 (—) years average transit time.

plus favorables (ANDREWS *et al.*, 1982). Enfin, il peut se produire un très léger mélange, bien inférieure au pourcent, par des eaux de surface actuelles dont la teneur est voisine de 15 UT (1,77 Bq.l⁻¹). Cette « contamination » peut résulter du tubage défectueux d'un forage profond ou d'une drainance per descensum suite à une exploitation intensive de l'aquifère profond.

Dans tous les cas une datation par le radiocarbone s'impose.

b) Teneurs comprises entre 2 et 10 UT (0,236 et 1,18 Bq.l⁻¹)

Deux possibilités. Il s'agit soit d'une eau dont le temps de séjour est compris entre environ 200 et 300 ans, soit d'un mélange entre une eau ancienne (< 2 UT) et une eau de surface actuelle (≈ 15 UT). Ce mélange d'eaux est fréquent dans les aquifères (MAZOR et NATIV, 1992). Il résulte de remontées d'eaux le long d'accidents géologiques ou, comme précédemment, d'un tubage défectueux.

Le contexte hydrogéologique permet souvent de conclure.

c) Teneurs comprises entre 10 et 40 UT (1,18 et 4,72 Bq.l⁻¹)

C'est le domaine le plus fréquemment observé dans les mesures réalisées actuellement sur les eaux souterraines peu profondes d'Europe. Il s'agit d'eaux

actuelles bien marquées par le pic de 1963 (*fig. 1*). Le temps de séjour moyen est compris entre environ 5 et 10 ans pour les nappes libres et 50 et 100 pour les nappes captives.

d) Teneurs supérieures à 40 UT (4,72 Bq.l⁻¹)

Ces fortes teneurs, qui dépassent exceptionnellement 1 000 UT (118 Bq.l⁻¹), indiquent que les aquifères sont en relation avec une industrie nucléaire.

Citons par exemple les eaux de la nappe phréatique située à l'aval du Centre de Marcoule au Nord d'Avignon dont les teneurs allaient, en 1992/1993, de 100 à 2 500 UT (11,8 à 295 Bq.l⁻¹) (données CRG, Thonon-Les-Bains). Citons aussi le champ captant de la Grande Paroisse en aval de Montereau qui prélève environ 20 000 m³.j⁻¹ dans la nappe des alluvions de la Seine. Les teneurs en ³H, en 1991, étaient de l'ordre de la centaine d'UT (11,8 Bq.l⁻¹) (données CRG, Thonon-Les-Bains) et résultaient de rejets d'HTO dans la Seine par la centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine située à 40 km en amont.

Notons que nous sommes très loin de la teneur maximum admissible pour l'eau destinée à la consommation humaine qui est de 2,5 millions d'UT (295 000 Bq.l⁻¹).

Ainsi, bien que les teneurs en ³H de la recharge des eaux souterraines varient chaque année (*fig. 1*) et durant l'année (*fig. 2*) et bien que des mélanges complexes d'eaux aient lieu dans les aquifères, il n'en reste pas moins qu'une première estimation du temps de séjour moyen des eaux souterraines superficielles par le tritium reste possible.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE, 1981. Statistical Treatment of Environmental Isotope Data in Precipitation, *Technical Reports Series*, 206, Vienne, 22-23.
- ANDREWS J.N., KAY R.F.L., 1982. Natural production of tritium in permeable rocks, *Nature*, 298, 361-363.
- BLAVOUX B., 1978. Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée, Thèse d'Etat, Paris.
- BOLIN B., RODHE H., 1972. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. *Tellus*, XXV, 1, 58-62.
- DANCKWERTS P.W., 1953. Continuous flow systems. Distribution of residence times. *Chem. Eng. Sc.*, 2, 1, 1-18.
- HUBERT P., MARCE A., OLIVE Ph., SIWERTZ E., 1970. Etude par le tritium de la dynamique des eaux souterraines, *C.R.Acad. Sc. Paris*, 270, 908-911.
- HUBERT P., OLIVE Ph., 1995. Modélisation par une loi gamma de la distribution des temps de séjour de l'eau dans des systèmes hydrologiques en régime permanent. *Tracer Technologies for Hydrological Systems*, I.A.H.S., 229, 211-217.
- LETOLLE R., OLIVE Ph., 1983. Isotopes as pollution tracers. Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology. *Technical Reports series*, 91, I.A.E.A., Vienne, 411-422.
- MARGAT J., 1966. Age des eaux souterraines et renouvellement des réserves des nappes. Réflexions sur les bases de l'hydrochronologie. *Bull. BRGM*, 6, 37-51.

- MAZOR E., NATIV R., 1992. Hydraulic calculation of groundwater flow velocity and age : examination of the basic premises. *J. of Hydrology*, 138, 211-222.
- PALLY M., BARRE A., FOULQUIER L., 1993. Tritium associé à la matière organique de sédiments, végétaux et poissons des principaux cours d'eau français. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 25, 285-289.
- RICHTER J., SZYMPCZAK P., 1992. Multis : a computer program for the interpretation of isotope hydrogeologic data based on combined lumped parameter models, Mining Academy of Freiberg.
- ROETHER W., 1967. Estimation of the tritium input to groundwater from wine samples. *Isotopes in hydrology*, AIEA, Vienna, 73-91.
- UNTERWEGER M.P., COURSET B.M., SCHIMA F.J., MANN W.B., 1980. Preparation and calibration of the 1978 National Bureau of Standards tritiated water standards. *Intern. J. of Applied Rad. and Isotopes*, 31, 611-614.
- ZUBER A., 1986. Mathematical models for the interpretation of environmental radioisotopes in groundwater systems. *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Fritz P. et Fontes J.C., Eds, 2, 1-59.