Communication
présentée au Comité technique
de la Société Hydrotechnique de France
le 12 juin 1969

EMPLOI DES TRACEURS RADIOACTIFS NATURELS ET ARTIFICIELS EN HYDROLOGIE SOUTERRAINE

PAR P. LÉVÊQUE *

En hydrologie aussi bien qu'en hydrodynamique, les mesures traditionnelles des débits et des rabattements, en milieu saturé ou non, ne permettent pas d'obtenir des renseignements suffisants sur l'origine de l'eau et son temps de cheminement. Ainsi, l'évaluation des bilans des nappes captives est difficilement abordable à partir de ces données traditionnelles. D'une manière générale, il manque, pour établir ce bilan d'une manière suffisamment approchée, la mesure précise du temps de parcours des nappes, depuis la surface ou depuis les affleurements jusqu'à l'aquifère.

Si les faciès hydrochimiques, c'est-à-dire les teneurs en éléments majeurs des eaux et en éléments traces, ainsi que leurs caractéristiques physico-chimiques, renseignent sur l'origine des nappes et parfois sur les faciès lithologiques traversés par les masses d'eau, l'âge de ces eaux est soumis à des approximations dues pour une large part à l'imprécision de la mesure du coefficient de Darcy et au manque de données exactes sur les effets de drainage.

Enfin, parmi les problèmes importants difficilement solubles, il convient de signaler la localisation exacte des aquifères stratifiés, qui ne peut être abordée que très imparfaitement par les méthodes courantes.

L'utilisation de moyens permettant d'approcher la recherche des précisions nouvelles, soit l'utilisation des traceurs naturels radioactifs ou stables et des traceurs artificiels radioactifs, fait l'objet des pages qui suivent.

Traceurs naturels

Conditions d'emploi et principaux traceurs.

Le tableau 1 résume les principales caractéristiques des traceurs naturels radioactifs actuellement utilisables avec des appareillages relativement courants.

Le tritium (^3_1H), découvert en 1939, dont la période est de 12,26 ans, est un émetteur β de très faible énergie : $E_{\max} = 18 \text{ keV}$. Il constitue l'un des meilleurs traceurs connus en hydrologie superficielle et souterraine. Il n'a pas été possible d'observer d'adsorption sur des argiles courantes, sauf dans des conditions particulières d'essais en laboratoire.

Quoi qu'il en soit, à l'échelle des utilisations dans la nature, on peut considérer le tritium comme le traceur naturel fournissant les vitesses de transfert les plus voisines de celles de la nappe elle-même. Il est, en effet, partie intégrante de la molécule d'eau et se déplace donc à la même vitesse que l'ensemble de la nappe. Dans les cas d'étude d'interactions atmosphère-hydrosphère, il est possible de déceler les effets de la séparation isotopique, au même titre que ceux que l'on peut observer pour l'oxygène 18 ou le deutérium. Un seul inconvénient pour ce traceur à peu près idéal, c'est la difficulté de sa détermination en faible concentration. Il nécessite dans ce cas un enrichissement préliminaire soit par voie électrolytique, soit par voie thermique, la première méthode étant la plus utilisée. Le comptage se fait en scintillation liquide ou en phase gazeuse, mais, dans les deux cas, avec un appareil nanti d'un très faible bruit de fond.

* Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux.

Tableau 1

Principaux isotopes radioactifs naturels utilisables en hydrologie

D'après M. C. Lederer, J. M. Hollander et I. Perlman.

ISOTOPE RADIOACTIF	TYPE D'ÉMISSION ET ÉNERGIES PRINCIPALES OU MAXIMALES (en MeV)	PÉRIODE	POIDS DU CURIE (en g)	FORME CHIMIQUE DANS LA NATURE
^3H	$\beta = 0,018$	12,26 années	$1,02 \cdot 10^{-4}$	H_2O
^{14}C	$\beta = 0,156$	5 730 années	0,22	dans les eaux CO_2 CO_3H CO_3Ca mat. organiques
^{222}Rn	$\alpha = 5,49$ $\gamma = 0,510$	3,8229 jours	$1,01 \cdot 10^{-9}$	gaz
^{238}U	$\alpha = 4,19$ $\beta = 0,25$	$4,5 \cdot 10^9$ ans	$3 \cdot 10^6$	oxydes minéraux
^7Be	$\gamma = 0,477$	53,6 jours	$2,9 \cdot 10^{-6}$	hydroxyde ou sulfate
^{32}Si	$\beta = 0,210$	650 à 710 ans suivant les auteurs		solution ou exceptionnellement forme colloïdale
^{40}K	$\beta = 1,314$ $\gamma = 1,460$ (CI)	$1,26 \cdot 10^9$ ans		chlorures et formes ionisées
^{36}Cl	$\beta = 0,714$ $\gamma = 0,511$	$3,08 \cdot 10^5$	32,2	chlorures

Actuellement, quatre ou cinq laboratoires étudient en France les variations de tritium dans les eaux de pluie, dans les surfaces libres, lacs et rivières et dans les nappes souterraines.

Les études à base de tritium dépendent étroitement des très fortes augmentations d'activité de cet isotope, à la suite des explosions à l'air libre effectuées lors des tests militaires russo-américains, entre les années 1958 et 1963 [1].

Alors que la valeur moyenne de l'activité en tritium était de l'ordre de 15 à 20 UT en 1949-50 (*), à la fin de 1963 ou 1964, on notait dans les zones septentrionales de l'hémisphère nord, des activités supérieures à 10 000 UT (fig. 1, 2, 3).

Toutefois, cet immense traçage à l'échelle de la planète, qui aurait pu être utilisé d'une façon intensive pour l'étude précise des relations entre précipitations et infiltrations, n'a été malheureusement que très peu exploité. Par ailleurs, depuis la fin des essais nucléaires en 1963 et à la suite des accords russo-américains sur l'obligation pour ces deux pays de ne procéder à des essais qu'en galeries souterraines, il n'y a plus eu, comme injections de tritium dans l'atmosphère, que les modestes pics d'activité dus aux bombes chinoises dans l'hémisphère nord et aux bombes françaises pour l'hémisphère sud, c'est-à-dire relativement peu, devant l'ensemble du stock tritié provenant de l'énorme quantité de cet isotope qui avait été lâchée en trois ou

quatre années, dans l'atmosphère, lors des essais militaires.

On a donc pu observer dans les eaux de pluie une décroissance de type climatique qui s'est superposée à la décroissance radioactive normale du tritium. La décroissance résultante des eaux de pluies montre une période de l'ordre de deux ans environ [2, 3]. Cette décroissance est telle qu'en 1969 par exemple, on n'observe plus, à la station de Cazaux à proximité du littoral atlantique proche de Bordeaux, que des activités de l'ordre de 30 à 40 UT, c'est-à-dire simplement le double de l'activité antérieure à la période des essais nucléaires intensifs.

Or, de nombreuses nappes superficielles manifestent encore une décroissance souvent notablement plus lente que celle des précipitations. Il est donc possible, dans certains cas, de calculer un temps et une vitesse de transfert des nappes, en fonction des pics d'activité de 1962-1963, notamment. C'est ce qui a été tenté avec succès en France et à l'étranger.

Les études actuelles des nappes de la Crau et de celle du calcaire de Champigny au sud-est de Paris, qui font l'objet d'une action concertée de la D.G.R.S.T., ne sont pas terminées, mais leurs résultats semblent déjà relativement nets : ainsi, la plus grande partie des eaux de la nappe de la Crau provient des irrigations à partir du nord et surtout du nord-est, confirmant ainsi des études antérieures et ajoutant une notion de temps de transfert, obtenu par mesure directe et non par calcul approximatif à partir de coefficients Darcy.

(*) L'unité tritium correspond au rapport de 1 atome de ^3_1H pour 10¹⁸ de ^1_1H .

- 1/ Activités moyennes en tritium des précipitations dans le monde, en avril 1963.
Average world precipitation tritium activity data for April 1963.

- 2/ Activités moyennes en tritium des précipitations dans le monde de mars à août 1963.
Average world precipitation tritium activity data for March to August 1963.

- 3/ Activités moyennes en tritium des précipitations dans le monde, en novembre 1965.
Average world precipitation tritium activity data for November 1965.

4/ Variations des activités en tritium dans la zone du Mont-Cenis de 1964 à 1968.
Variation of tritium activity in the Mont-Cenis area from 1964 to 1968.

De nombreuses études de nappes superficielles ont été effectuées en France depuis 1964 et, notamment, dans les alluvions de la terrasse 12-15 m de la vallée du Rhône qui constituent le principal stock d'eau facilement disponible dans la basse vallée. D'une manière générale, on a pu observer un maximum d'activité en 1965-66 et, actuellement, la moyenne des activités est en décroissance nette, mais à une vitesse et suivant une période inférieures à celles des activités moyennes des pluies dans la région étudiée. Les injections dans cette nappe à partir des eaux des grands axes de dérivation du Rhône, ont une influence bien plus marquée que celle due aux précipitations. On rejoint ainsi les constatations faites dans la Crau, notamment.

Bien que l'on observe en général une croissance de l'activité en tritium, des côtes atlantiques vers l'intérieur des terres, — effet dit de « continent » —, les indications fournies par le tritium ne sont pas seulement qualitatives. Qu'il s'agisse de nappes dans la Crau, de nappes dans les grands ensembles alluviaux de la vallée du Rhône, de la détermination des pourcentages d'eau ancienne intervenant dans le débit d'étiage des cours d'eau ou, d'une manière plus générale, de leurs bassins versants, l'utilisation d'un traceur naturel comme le tritium, qui n'exige aucune correction dans l'énoncé des résultats, correspond à une information primaire sur un système naturel à trois dimensions et sous un aspect non influencé par les actions éventuelles humaines en dehors, bien entendu, des irrigations. De plus, l'observation peut couvrir des surfaces importantes et n'est limitée que par le nombre de mesures que peut effectuer le laboratoire sollicité.

Ainsi, l'utilisation du tritium a été appliquée au cas des karsts et des systèmes karstiques. Une étude actuellement en cours sur la Fontaine de Vaucluse, également sous forme de contrat de la D.G.R.S.T., donne des résultats d'ores et déjà particulièrement intéressants, notamment sur l'origine de certains débits et leur temps de transfert.

Dans le cas d'aquifères karstiques de la région typique de la Béotie ou de la région du Péloponnèse en Grèce, on a pu observer l'intervention, au cours de l'étiage, de nappes anciennes totalement dépourvues de tritium, dans certaines sources ou résurgences [4] (fig. 4). Par ailleurs, les communications entre les deux lacs Yliki et Paralimni, envisagés pour l'alimentation en eau de l'agglomération d'Athènes, ont été confirmées à l'aide du tritium, ainsi que les cheminements les plus importants dans les systèmes karstiques calcaires et marno-calcaires, sur des distances de 5 à 10 km (fig. 5 a et 5 b).

Bien que l'on observe en général une croissance la période où cet isotope aurait pu rendre d'immenses services, l'utilisation du tritium a permis de se faire une idée générale sur un certain nombre de phénomènes que l'on avait soit ignorés, soit, au mieux, envisagés. Ainsi, on s'aperçoit que, sauf dans les cas de systèmes karstiques, les nappes alluviales des grands axes hydrographiques ou des grands bassins sédimentaires tels que le bassin d'Aquitaine, circulent à une vitesse relativement faible et sont souvent peu marquées en profondeur par les concentrations en tritium dues aux précipitations. Les sables quaternaires de la Gironde et des Landes par exemple n'ont indiqué de présence de tritium sur des vastes surfaces, que dans une frange superficielle dont l'épaisseur maximale est de l'ordre de 3 à 4 m [2, 6].

Par ailleurs, des circulations de type particulier, par exemple dans le cas des gorges du Verdon étudiées par Guizerix et al. [3], dans celui des lacs du littoral atlantique du sud-ouest ou enfin dans celui des bassins versants pyrénéens, les effets de contrastes entre les périodes où le cours d'eau est alimenté principalement par les pluies et celles où il est alimenté, uniquement ou presque uniquement, par les réserves anciennes, permettent de se faire une idée précise de la valeur des interventions

5 a/ Activités en tritium de sources karstiques en Grèce.
Tritium activity of karst springs in Greece.

5 b/ Situation des sources étudiées.
Positions of springs investigated.

de ces réserves dans le budget hydrologique annuel de ces bassins versants.

Une étude intéressante à ce sujet a été faite dans le cadre du bassin versant des sources d'Evian et cette étude a été publiée récemment à la Société Hydrotechnique (Blavoux [7]).

La zone du bassin versant du Mont-Cenis est étudiée depuis plus de quatre ans à partir d'échantillonnages effectués à des périodes variables. Les sources qui jaillissent dans la zone de Gran Scala présentent un intérêt particulier, car certaines sont issues de la nappe des cargneules triasiques et ont une teneur en tritium dont l'évolution a été différente de celle du lac (*). Par contre, quelques sources ont une évolution voisine de celle du lac. Aucun traceur artificiel n'a pu, jusqu'à maintenant, parvenir à fournir des différenciations, au moins chronologiques, sur les résurgences de cette zone du Mont-Cenis (fig. 4) [8].

D'autres études et notamment dans le bassin de Vienne, Autriche [9], ont permis de mettre en évidence des stratifications de nappes et une disparition assez rapide du tritium en profondeur, confirmant ainsi certaines de nos observations en France. Aux Etats-Unis, le tritium a été relativement peu utilisé. Un exemple intéressant parmi quelques autres a été fourni lors des premières études effectuées au Texas par Libby [10], précisément dans une zone de recharge artificielle de nappes. Libby et ses collaborateurs ont pu tirer des conclusions sur les conditions d'alimentation de ces nappes et ont observé des circulations préférentielles bien marquées et une individualisation nette des perméabilités remettant en question la notion de transmissivité appliquée sous forme de paramètre « compréhensif » d'un aquifère.

Nos observations et nos études sur la stratifica-

tion des aquifères à partir des traceurs artificiels, ont abondamment confirmé ces premières observations.

Dans bien des cas par ailleurs, l'utilisation du tritium se fait parallèlement aux exploitations des mesures d'oxygène 18 et de deutérium. Les études d'Antalya en Turquie [11], de la vallée de San Pedro en Jamaïque [12] sont typiques. Nous en reparlerons dans le cas de l'oxygène 18.

Enfin, deux exemples d'utilisation dans le cas de stratification d'eaux lacustres ont été tentés en France d'une part dans le lac de Genève [13], d'autre part dans le cas du lac Pavin dans le Massif-Central [14]. Dans ce dernier cas, on observe une stratification bien marquée qui se prolonge régulièrement depuis les trois dernières années d'observation. Ainsi, dans le lac Pavin, à partir de la profondeur de 65 m environ, on ne trouve plus de tritium et cette absence a été confirmée par le carbone 14 qui a fourni des âges particulièrement élevés, de l'ordre de 10 000 ans, pour les eaux les plus profondes de ce lac de cratère. Des études plus précises sont en cours, en vue de corrections d'âge à effectuer à partir du ^{13}C .

Ainsi, malgré sa période relativement faible, le tritium peut encore rendre des services importants du fait, d'une part, de la diminution très sensible de l'activité des eaux de pluie et, d'autre part, de la diminution bien plus lente de l'activité de certaines eaux de nappes. Le contraste apparaît de façon nette dans les eaux de nappes qui ont conservé pendant une période assez longue, le souvenir des infiltrations marquées par les grandes activités de 1960-1963 [15].

Les restitutions du « traçage » de 1960-63 sont observables en particulier pendant les périodes de tarissement.

Une étude effectuée par notre laboratoire en août 1968, a porté sur un prélèvement à peu près simultané de 80 échantillons caractéristiques depuis le littoral atlantique de la région du sud-ouest de la

(*) Les eaux sont, en général, très chargées en SO_4Ca qui masque les différences de provenance et de cheminement.

France, jusqu'à la haute vallée de l'Inn, à la frontière austro-helvétique.

Les résultats, non entièrement interprétés, montrent déjà les principales caractéristiques suivantes :

- les glaciers (Mer de Glace, glaciers de Bionnassay, des Bossons et glacier du Rhône) n'ont pas d'activité en tritium décelable (*) à une profondeur de 0,20 à 0,15 m, dans la zone d'ablation;
- les torrents sous-glaciaires ont une faible activité, sauf cas particulier du glacier du Rhône;
- les eaux de surface (grands axes hydrographiques) ont une activité comprise entre 150 et 300 UT, sauf à proximité du littoral atlantique où les valeurs ne dépassent guère 60 UT (effet « de continent »);
- les pluies du début d'août 1968 ont une activité inférieure à celle des torrents de haute montagne;
- les sources étudiées ont, ou bien une activité nulle, ou bien une activité assez largement supérieure à celle des pluies, rappelant, dans ce dernier cas, les hautes valeurs de 1963-65. Ce caractère n'est valable que pour la zone continentale et, surtout, pour les régions montagneuses (massif du Mont-Blanc).

Une application directe à un problème de génie civil a été faite dans le cas d'un barrage en terre.

Les fuites, minimes, aboutissant à une galerie de contrôle à partir de drains naturels ou artificiels disposés dans le terrain (granité altéré et diacisé), ont pu être aisément différenciées.

Certaines provenaient de nappes de faible importance, anciennes, sans tritium, donc issues d'infiltrations largement antérieures à la construction de l'ouvrage.

D'autres fuites provenaient d'une conduite en relation directe avec la retenue. Ces dernières ont été facilement identifiées, grâce à une activité de quelque 300 UT et ont pu être étanchées.

Dans un autre cas, le tritium a permis de déterminer l'ancienneté relative d'une nappe chargée en ClNa, sous les futures fondations d'un grand barrage en terre, indiquant ainsi que la dissolution de massifs de sel situés à proximité de l'ouvrage ne correspondait pas à un phénomène actuel.

Enfin, dans d'autres cas de travaux de reconnaissance de grands ouvrages ou de percements de galeries, la présence ou l'absence de tritium a fourni des indications semi-quantitatives sur l'ancienneté de résurgences, de nappes ou de fuites.

Bien entendu, le carbone 14 avec une période bien plus longue, permet d'obtenir des évaluations d'âges de nappes plus précises.

Il en est question dans ce qui suit.

Le carbone 14 (**).

Produit dans la haute atmosphère, suivant la réaction classique :

sa période admise actuellement est de 5 730 ans

± 30 d'après les dernières évaluations [15] et la conférence du ^{14}C de Cambridge en 1962.

Toutefois, une autre valeur, de $5\,568 \pm 30$, préconisée par Libby [16] est encore utilisée, la première étant la plus proche de la réalité. On utilise encore cette dernière valeur, en raison de la masse de documents déjà publiée sur la base de 5 570 ans.

Le ^{14}C est un émetteur β d'énergie assez faible de 0,158 MeV.

Le comptage s'effectue soit en phase gazeuse, sous forme de CH_4 , de C_2H_6 , de C_2H_2 ou de CO_2 , soit en scintillation liquide, sous forme de benzène ou d'éthylbenzène.

Dans le second cas, la quantité de carbone minimale nécessaire est supérieure, le volume optimal de benzène étant de l'ordre de 6 à 8 ml.

Dans tous les cas, et comme pour la mesure de l'activité du tritium, des appareils à bas bruit de fond et à haut facteur de mérite (350) sont nécessaires.

Le prélèvement dans les eaux s'effectue de deux manières :

- acidification, avec SO_4H_2 , N/10, d'une quantité de 50 à 100 l d'eau. Le CO_2 dégagé est recueilli dans une solution de NH_4OH , de NaOH ou de KOH , débarrassée de tout CO_2 actuel contaminant;
- précipitation du carbone des carbonates, bicarbonates ou CO_2 , sous forme de CO_3Ba , à partir de BaCl_2 , dans des cuves de 100 l en acier inox.

Quelle que soit la méthode, l'eau, une fois prélevée, doit être immédiatement soustraite au contact avec l'atmosphère. On utilise en général l'azote pour isoler le prélèvement. Ces précautions nous ont permis d'obtenir des coefficients de reproductibilité excellents (*).

L'ensemble du matériel autonome de prélèvement est contenu facilement dans une camionnette-laboratoire.

Nous n'entrerons pas dans le détail de la préparation chimique des fluides de comptage, les méthodes ayant fait l'objet de nombreuses publications, ainsi que les modalités de comptage. Il convient, toutefois, de parler quelque peu des corrections à effectuer sur l'âge des carbonates, donc, des eaux.

Les eaux de pluies ne contiennent que très peu de CO_2 immédiatement avant leur contact avec le sol et, avant leur percolation dans la couche superficielle, elles ne peuvent guère dissoudre plus de 0,8 mg/l de CO_2 dans les conditions normales.

C'est à l'occasion du parcours de cette couche superficielle que l'eau s'enrichit en CO_2 , donc en $^{14}\text{CO}_2$ et en $^{13}\text{CO}_2$, mais, dans ce dernier cas, avec un déficit de $\delta^{13}\text{C} = -25\%$ en moyenne, par rapport aux carbonates géologiques dont le $\delta^{13}\text{C}$ est voisin de zéro (**). Cette séparation isotopique dans le sol est due à l'action de la matière vivante.

(*) On observe une légère séparation isotopique du ^{13}C dans les deux méthodes. Une première correction minime est donc nécessaire (B.B. Hanshaw, Communication personnelle, 1968).

(**) Le $\delta^{13}\text{C} = [(R_{\text{échantillon}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 100]$ et est mesuré par rapport à un étalon constitué par une belemnite d'une série jurassique américaine, de la « P.D.B. formation » dont le $\delta^{13}\text{C}$ est de -19%

$R_{\text{échantillon}} = (^{13}\text{C})/(^{12}\text{C})$ de l'échantillon;
 $R_{\text{standard}} = (^{13}\text{C})/(^{12}\text{C})$ du standard P.D.B.

(*) Minimum décelé dans le cadre de cette étude : 3 à 5 UT.
 (**) Nous ne parlerons ici que du ^{14}C destiné à la datation des eaux.

L'eau pénètre ensuite dans le sol et, suivant sa teneur en CO_2 et CO_3H , dissout des quantités variables de CO_3Ca géologique, presque toujours présent dans les aquifères.

L'échange isotopique qui se fait alors entre le CO_3Ca des formations géologiques sans ^{14}C et le ^{14}C infiltré tend à vieillir l'âge réel de l'eau. Munnich et Vogel ont admis, dans leurs premières publications, que l'échange se limitant à une valeur moyenne de 15 %, soit 85 % du ^{14}C initial, resterait dans l'eau. Cette évaluation moyenne est difficile à admettre, les caractéristiques paléoclimatiques intervenant certainement dans les taux d'échange [17].

En fait, les corrections à appliquer sont aisées, notamment, celles de Pearson ($\delta^{13}\text{C}$) et de Pearson et White — évoquée plus loin — [18], qui font intervenir en plus du $\delta^{13}\text{C}$, la quantité de carbonate initialement obtenue à partir de l'atmosphère du sol et seulement par ce processus.

Les exemples d'utilisation du ^{14}C en hydrologie souterraine sont relativement nombreux à l'étranger, mais datent de moins de onze ans.

L'un des exemples classiques est celui de B.B. Hanshaw et al. [19] dans la région centrale de Floride. Les vitesses supposées de la nappe, à partir des affleurements, paraissent en bonne concordance avec les évaluations par les méthodes traditionnelles. L'âge des eaux est de l'ordre de 8 600 à 28 300 ans sans correction et les vitesses horizontales de 2 à 8 m/an.

Bennett [20] dans le bassin de Tuscon (Arizona) a observé des vitesses de 1,2 à 12 m/an dans différentes zones.

Pearson et White [18] ont étudié la nappe des sables de Carrizo, dans l'Atascosa County au Texas et ont utilisé la correction de l'âge des eaux basée sur le $\delta^{13}\text{C}$ et sur la quantité de carbonate initialement obtenue lors de la traversée de l'atmosphère du sol.

Les âges calculés après correction sont compris entre l'époque actuelle et 28 000 ans.

En France, le laboratoire de radiogéologie de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine (I.G.B.A.), mène des études de détermination de l'âge des nappes dont certaines dans le cadre d'un contrat avec la D.G.R.S.T.

Bien que ces études ne soient pas encore arrivées à leur terme, il apparaît que le ^{14}C donne d'excellentes corrélations avec le tritium pour des nappes récentes où le pourcentage de ^{14}C dépasse notablement l'étalon du N.B.S. (*) identifiant ainsi des nappes marquées par le pic d'activité dû aux tests militaires (nappe de la Crau).

Dans le cas de la nappe des calcaires de Champigny, au sud-est de Paris, la différenciation semble apparaître assez nettement entre les zones à priorité de fissures classiques et les zones à altération karstique.

Enfin, dans le cas de l'Aquitaine, un vaste inventaire des âges des eaux est en cours dont une partie est réalisée en liaison avec un autre contrat de la D.G.R.S.T.

Les âges apparents des nappes sont compris entre

5 000 et plus de 45 000 ans indiquant, dans le même temps, des anomalies hydrochronologiques qu'il est aisé d'expliquer par des accidents tectoniques ou des zones sédimentaires à caractère exceptionnel.

Les premières mesures ont, en particulier, montré que, dans le vaste bassin sédimentaire aquitain, l'âge apparent des eaux des nappes du Crétacé, à des profondeurs variant entre 350 et 1 000 m, ne manifestait aucune corrélation sensible avec la proximité des affleurements [21].

Il convient en outre de citer les premières études de Munnich et Vogel sur les « datations » d'eaux de nappes profondes en Egypte, en Hollande et en Afrique du Sud, appartenant à la littérature classique des bases de l'utilisation du ^{14}C [22, 23, 24, 25].

Enfin, B.B. Hanshaw et al. [26] ont réalisé une étude sur l'origine de l'eau salée dans une nappe de la région de Brunswick en Géorgie.

La concentration en ^{14}C dans l'eau océanique était de 28,5 % supérieure à celle de l'étalon N.B.S., donc bien marquée par les pics des tests militaires.

Par contre, dans les nappes envahies par le chlorure, le ^{14}C n'était qu'à 96,5 - 98,7 % de l'étalon.

L'origine de l'eau salée provient donc de la formation sous-jacente.

Le rôle que pourrait jouer le carbone 14 dans les études hydrochronologiques n'est, nous semble-t-il, qu'à son début.

Les phénomènes de drainance nous paraissent pouvoir être atteints directement et avec certitude par la datation et, probablement aussi, par les isotopes stables. Un outil incomparable est ainsi mis à la disposition des hydrogéologues et des spécialistes de la mise en valeur du territoire chargés de l'exploitation et de la gestion des ressources nationales.

Ajoutons enfin que les problèmes de pollution d'eaux profondes ou de stockage de déchets liquides chimiques ou radioactifs, ne pourront pas se passer de l'évaluation des risques de contamination.

L'hydrochronologie, notamment, à base de ^{14}C , pourra jouer un rôle capital.

Silicium 32.

Avec une période de 710 ans [27] ou de 650 ans [28] suivant les auteurs, cet isotope, émetteur β d'énergie $E = 0,210 \text{ MeV}$, représente une valeur intermédiaire entre le tritium et le ^{14}C .

En fait, sa mesure se fait indirectement à l'aide de son descendant, ^{32}P , de période 14 jours.

Malheureusement, la concentration en ^{32}Si est particulièrement basse : 0,48 désintégration par minute et par tonne d'eau de pluie, en moyenne.

Cette activité varie avec les zones géographiques.

Les premières études effectuées par Lal et al. [29] ont porté sur la concentration du ^{32}Si dans l'eau de mer. Par la suite, David R. Schink a étudié à nouveau cet isotope (*) également dans l'eau de mer et Nijampurkar et al. en ont fait la première application aux eaux souterraines [30].

Les échanges de ^{32}Si avec les aquifères devraient normalement procéder des mêmes phénomènes que ceux qui régissent les échanges de ^{14}C . Toutefois,

(*) Acide oxalique du National Bureau of Standard dont on compte 95 % de l'activité.

(*) Après traitement de 400 t d'eau de mer. Thèse scripps Inst. of Oceanography, San Diego, California, 1962.

les études ne semblent pas avoir abouti à des certitudes. D'autre part, les premières comparaisons entre les âges au ^{32}Si et au ^{14}C ne donnent pas de parallélisme parfait, bien que les ordres de grandeur soient respectés [12].

Autres isotopes radioactifs naturels.

Il resterait à parler du radon 222 dont les études sont en cours à notre laboratoire et qui semblent fournir des renseignements intéressants sur les nappes affectées par les grands accidents tectoniques de série profonde, en Aquitaine notamment.

L'uranium est considéré comme un élément-trace qui permet d'individualiser des aquifères avec une bonne précision (0,2 $\mu\text{g/l}$).

Le béryllium 7, de très courte période, est en cours d'étude mais surtout dans les domaines océaniques.

Enfin, le ^{40}K et le ^{36}Cl , dont les périodes sont très différentes (tableau 1), devraient donner lieu à des essais systématiques, l'un pour tenter de déterminer les aquifères traversés par les nappes, le second pour tenter des datations d'eaux très anciennes dépassant la limite du ^{14}C .

Isotopes stables.

Nous ne dirons enfin que quelques mots des isotopes stables, oxygène 18 et deutérium, ^2H .

Tous deux ont un sort sensiblement analogue dans les fractionnements isotopiques et leur utilisation dans les études hydrogéologiques est surtout le fait de chercheurs étrangers, hormis les recherches du laboratoire de géodynamique de la Sorbonne (Blavoux, *loc. cit.*).

Dans la nature, la molécule d'eau peut se présenter, outre sa forme normale $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ (*), principalement sous deux aspects dont la concentration moyenne est :

$$\begin{aligned} ^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O} &= 0,320 \cdot 10^{-3} \\ \text{H}_2^{18}\text{O} &= 2 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Les variations des variétés isotopiques dans la nature sont en général assez faibles, de l'ordre de 5 % pour H_2^{18}O et 30 % pour HDO.

Les exemples d'application sont nombreux [12, 31]. En Jamaïque, l'utilisation simultanée de ^3H , ^2H et ^{18}O a permis des différenciations précises d'alimentation de la plaine de San Pedro.

Au Kenya, l'étude du temps de renouvellement de l'eau du lac de cratère de Chala de 4 km², à 840 m sur le versant sud-est du Kilimandjaro, a montré que le temps est de l'ordre de 4 ans et qu'il n'alimente probablement aucune source des environs. Le tritium, le deutérium et l'oxygène 18 ont donné des résultats parfaitement concordants.

Une intéressante étude des conditions d'alimentation des sources d'Antalya en Turquie méridionale, par T. Dincer [11] a été basée également sur les mesures des trois isotopes, mais surtout du deutérium et de l'oxygène 18.

Par ailleurs, l'étude des nappes de la Crau, de Champigny et, surtout, d'Aquitaine, déjà citée, com-

prend des mesures de concentration de deutérium et d' ^{18}O (*).

Enfin, les études de Fontes et Gonfiantini [32] sur les évaporations de deux bassins sahariens, entrent dans le cadre des études paléoclimatiques que l'on peut atteindre à l'aide des isotopes stables.

Traceurs radioactifs artificiels

(tableau 2)

Les traceurs radioactifs artificiels ont été utilisés en hydrologie, dès que les radiochimistes ont pu proposer des formes manipulables de produits permettant des détections fines, précises, et garantissant une innocuité suffisante pour pouvoir être utilisés moyennant certaines précautions simples.

La première publication importante date de 1950. Kaufman W.J. et Orlob G. donnaient les principes de la mesure de la vitesse des nappes par les traceurs radioactifs (**). La première application importante a été publiée par Fox en 1952 [33]. Fox utilisa un dixième de curie de rubidium 86, sous forme de chlorure, pour tenter de déterminer le cheminement d'une fuite dans une retenue en cours d'étude sur le Nil, en Egypte. L'expérience fut un succès, puisque le traceur fut retrouvé, un peu plus de cinq jours après l'injection. Le parcours du traceur dans le terrain était de l'ordre de 11 km.

En France, la même année, sur l'emplacement du futur barrage de Serre-Ponçon, un curie de brome 82 et 5 kg d'entraîneur étaient injectés dans les alluvions pour rechercher les circulations entre deux points distants d'une centaine de mètres. Le traceur fit sa réapparition une journée après l'injection dans le puits de pompage.

En France, également, une deuxième expérience fut organisée en 1953 par Urbain [34] pour tenter de rechercher une alimentation possible entre une eau d'un lac et les sources thermales de Cauterets. Un curie d'iode 131 et 4 kg d'iodure inactif comme entraîneur furent injectés dans le lac. Aucune trace d'activité ne fut retrouvée à l'aval et, deux mois après, les recherches étaient abandonnées. Le parcours en ligne droite supposé étant de l'ordre de 20 km, il est fort probable que la durée de l'étude a été trop courte et que la période de l'iode était également mal adaptée à ce temps de transfert.

A partir de 1955, l'utilisation des traceurs radioactifs devient petit à petit une méthode classique.

En ce qui concerne les travaux réalisés en France dans ce domaine, le nom de R. Hours apparaît parmi les chercheurs qui ont joué un rôle de précurseur. Sa première publication dans *La Houille Blanche*, qui date de mai 1955, constitue, malgré 14 ans d'âge, une base toujours actuelle [34].

La définition d'un traceur radioactif peut être prise dans la publication de R. Hours : « à l'exception du tritium, un traceur radioactif de l'eau est une substance chimique soluble dans la molécule de laquelle un atome est radioactif ».

Les conditions d'emplois des radioéléments sont

(*) L'atome de deutérium est parfois symbolisé par la lettre D, notation non officielle.

(*) Mesures actuellement en cours à Isotopes Inc. Westwood, N.J., U.S.A.

(**) In [34].

D'après M. C. Lederer, J. M. Hollander et I. Perlman.

Tableau 2

ISOTOPE RADIOACTIF	TYPE D'ÉMISSION ET ÉNERGIES PRINCIPALES OU MAXIMALES (en MeV)	PÉRIODE	CMA DANS L'EAU (en μ Ci/cm ³)	POIDS DU CURIE (en g)	FORME CHIMIQUE
⁸² Br	$\beta = 0,44$ $\gamma = 0,78 \text{ à } 1,47$	35,9 heures	$3 \cdot 10^{-3}$	$9,38 \cdot 10^{-7}$	⁸² BrNH ₄ ⁸² BrNa
¹³¹ I	$\beta = 0,25 - 0,61$ $\gamma = 0,364 - 0,64$	8,05 jours	10^{-5}	$0,8 \cdot 10^{-5}$	¹³¹ INH ₄ ¹³¹ INa
⁵¹ Cr	$\beta = \text{C.I.}$ $\gamma = 0,32$	27,8 jours	0,02	$1,08 \cdot 10^{-5}$	⁵¹ CrEDTA
¹⁹⁹ Au	$\beta = 0,25 \text{ à } 0,46$ $\gamma = 0,158 - 0,208$	3,15 jours	$2 \cdot 10^{-3}$	$4,79 \cdot 10^{-6}$	chlorure
³ H	$\beta = 0,018$	12,26 ans	0,03	$1,02 \cdot 10^{-4}$	eau
⁶⁰ Co	$\beta = 0,31 \text{ à } 1,48$ $\gamma = 1,33 - 1,17$	5,24 ans	$5 \cdot 10^{-4}$	$8,88 \cdot 10^{-4}$	Co(CN) ₆ K ₃
²⁴ Na	$\beta = 1,39$ $\gamma = 1,61 - 0,40$	15 heures	$2 \cdot 20^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-7}$	ClNa
³² P	$\beta = 1,71$	14,3 jours	$2 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	Po ₄ HNa ₂
⁸⁶ Rb	$\beta = 1,77$ $\gamma = 1,08$	19 jours	$7 \cdot 10^{-4}$	$1,22 \cdot 10^{-5}$	ClRb
³⁵ S	$\beta = 0,167$	87 jours	$6 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	SO ₄ Na ₂

bien connues. Rappelons brièvement les principales :

— absence de toxicité ou faible toxicité pour l'homme ou les animaux, avec concentration maximale admissible aussi élevée que possible dans l'eau;

— bonne détectabilité. En général, les émetteurs γ d'énergie variable correspondent à ce critère d'emploi. Toutefois, on n'a pas toujours intérêt à utiliser des traceurs γ à haute énergie qui masquent souvent des détails précieux d'observation;

— les périodes de l'ordre de 36 h à 8 jours correspondent à la grande majorité des cas à traiter. Le tableau 1 donne les caractéristiques principales des traceurs radioactifs les plus utilisés.

— le traceur ne doit pas s'adsorber dans le terrain. Lors de certaines utilisations, on a constaté une fixation du traceur sur les matières organiques et sur les passées argileuses. D'une manière générale, on utilise des entraîneurs, c'est-à-dire des équivalents chimiques non radioactifs du traceur envisagé, en quantité infiniment plus importante que celle du traceur lui-même;

— la solution contenant le traceur ne doit pas changer la densité du liquide à tracer. C'est ce que l'on essaie d'éviter dans le cas d'utilisation dans les nappes libres et, notamment, lorsqu'on effectue un traçage dans des volumes d'eaux libres lacustres ou autres;

— l'échantillonnage doit, dans toute la mesure du possible, être évité, la manipulation d'un nombre important de flacons de prélèvements alourdissant notablement la méthode. Toutefois, dans le cas du tritium notamment, il n'est pas possible d'éviter cet écueil;

— nécessité de pouvoir disposer d'un matériel de mesures suffisamment précis, léger et robuste, sans dérive, dans des conditions d'utilisation sur le terrain parfois assez rudes;

— dans le cas de l'utilisation des traceurs en hydrodynamique souterraine, nécessité de pouvoir disposer de forages spécialement équipés : perforation régulière tout le long du tubage notamment, la forme de perforation important peu dans la plupart des cas. La surface perforée doit atteindre en principe 20 % de la surface totale du tubage qui peut être, dans les cas de piézomètres à faible profondeur (40 à 50 m), constituée de polyéthylène;

— enfin, il est bien évident que lorsque les traceurs colorés traditionnels du type de la fluorescéine notamment, peuvent être utilisés, il est inutile de faire appel aux traceurs radioactifs qui, dans la plupart des cas, aboutissent à un prix de revient supérieur.

Exemples :

Ils ont trait essentiellement à l'exploration des couches de l'aquifère. Quelques exemples applicables à l'exploitation sont également mentionnés.

Il ne peut être question de reprendre les études analytiques déjà faites sur l'utilisation des radioisotopes en hydrologie. Nous ne citerons ici que les travaux anciens qui nous paraissent particulièrement intéressants et surtout ceux plus récents qui apportent des données nouvelles.

Détermination de la porosité.

La méthode est utilisée surtout dans la zone saturée (12). Le traceur est injecté dans un premier

puits et pompé dans un second à 50 m de distance dans des calcaires. En première approximation, on néglige les effets de dispersion du traceur le long de la trajectoire du puits 1 au puits 2. L'arrivée au puits 2 signifie que le volume pompé est :

$$V = \pi r^2 h S$$

V = volume pompé;
 r = distance entre forages;
 h = épaisseur de l'aquifère;
 S = porosité efficace.

On doit admettre comme conditions initiales [35] que les vitesses radiales dues au pompage sont supérieures à celles de la nappe. Le système de pompage peut être considéré comme radial. Par ailleurs, h doit être plus petit que r . Enfin, le cône de rabattement est négligeable devant le volume pompé.

Si on néglige les effets de dispersion et d'adsorption, le volume correspondant au pic d'activité permet de déterminer S . L'adsorption de traceur sur les terrains lors de son parcours donne une valeur de S comprise entre la porosité totale et la porosité efficace (Todd, [36]).

Les essais ont été effectués à partir de $^{60}\text{Co}(\text{CN})_6\text{K}_3$ [37], d' ^{131}I , de ^3H [34] et de ^{82}Br , ^{51}Cr , ^{131}I par notre laboratoire.

Méthode du simple puits.

Mise au point en Israël en 1958, cette méthode est certainement l'une des plus intéressantes car elle peut renseigner sur la vitesse réelle d'une nappe dans un volume important d'aquifère.

Elle consiste à injecter à plusieurs reprises dans un forage réalisé dans des calcaires, un volume d'eau marqué par un traceur $^{60}\text{Co}(\text{CN})_6\text{K}_3$ en l'occurrence, et à laisser le système en repos pendant des temps variables — de 15 mn à 94 h dans l'exemple — puis à tenter de récupérer le traceur par pompage.

La courbe de récupération de l'activité en fonction du temps ou du volume pompé est très asymétrique, en raison des transformations géométriques de l'injection initiale, du nuage de traceur, par le terrain, ce qui ne facilite pas l'interprétation des mesures. Néanmoins, Mandel et al. ont pu tirer de leurs essais des valeurs de la vitesse de la nappe [37]. Borowczyk et al. ont abouti à des résultats semblables [12].

Plus récemment (1968-69), dans des alluvions anciennes de la Garonne, au nord de Bordeaux, nous avons pu effectuer des études semblables qui nous ont donné satisfaction sur l'ensemble des cinq sondages soumis aux essais, avec ^{82}Br , ^{131}I et ^{51}Cr .

Dans l'un d'eux, la récupération de l'iode 131 après 12 h d'attente, n'a été que de 37 %, ce qui correspond bien à une vitesse locale importante de la nappe. Nous tentons actuellement de déterminer porosité et conductivité hydrauliques.

A ces résultats, ont été ajoutées d'autres observations dont il est question plus loin.

Détermination de la transmissivité.

Ce paramètre est certainement l'un des plus utiles à connaître avec précision lorsqu'il s'agit d'exploiter un aquifère. Sa détermination, classi-

que avec les essais de pompages habituels, est souvent suffisamment précise par ces procédés et a le grand avantage d'intéresser un volume important de terrain. L'utilisation de traceurs artificiels n'apporte probablement que peu de progrès sur le principe lui-même.

Mercado et Halevy ont décrit un exemple particulier composé de deux aquifères superposés [38]. Le traceur utilisé était le $^{60}\text{Co}(\text{CN})_6\text{K}_3$.

Détermination de la diffusion.

L'importance des contaminations des nappes d'eau douce par l'eau de mer constituerait à elle seule la justification de l'étude du phénomène (Shamir et Harleman).

Le cheminement des pollutions de tout ordre entre également dans ce cadre d'études.

Bachmat et Bear [39] ont étudié le phénomène d'un point de vue pratique. L'utilisation des traceurs est toute indiquée dans ce cas.

Détermination des fuites d'un réservoir.

Il s'agit là d'une utilisation des traceurs qui a trouvé des applications auprès des grands services qui ont la responsabilité d'installer et de gérer des retenues de barrages. Dans le cas où des fuites interviennent sous des fondations d'ouvrages, il est toujours utile de reconnaître leur origine et leur cheminement. Les traceurs radioactifs ont été utilisés avec un succès particulier en France et à l'étranger [40].

Détermination et localisation des séries perméables dans les aquifères stratifiés.

Il s'agit là de l'un des procédés qui ont été utilisés depuis une quinzaine d'années en France et dont les premiers essais remontent à l'une de nos premières études. La méthode consiste à effectuer une injection semblable à celle du simple puits [41, 42].

Dans un piézomètre crêpiné suivant les normes générales données plus haut, c'est-à-dire sur 20 à 25 % de la surface totale du tube, on injecte une certaine quantité d'eau contenant le traceur, 2 à 3 m³ pour des forages assez courts, de l'ordre de 20 m et jusqu'à 0,12 m³/m dans des forages plus profonds. Ces chiffres correspondent à l'ordre de grandeur des quantités d'eau contenant le traceur, en fonction de perméabilités élevées comme celles des terrains alluviaux. Le traceur est injecté à raison de 1,5 m³ à 2 m³ à l'heure environ. Suivant les cas, on peut ou non pousser le traceur à l'intérieur du terrain, avec un volume d'eau normale non marquée.

Deux cas sont à considérer :

Cas d'une nappe immobile ou à vitesse très lente.

Dans le terrain, l'eau marquée a naturellement pénétré dans les couches perméables. La différence des perméabilités des couches alluviales est en général assez bien marquée et on constate que les zones où le traceur a pénétré le plus profondément, correspondent bien à des horizons à perméabilité élevée. Suivant les cas, les modalités de l'expérience peuvent varier. Ainsi, dans le cas où l'on désire simplement reconnaître l'ensemble de la disposition et de la localisation des couches perméables, il

suffit d'injecter une faible quantité de traceur qui permet d'identifier ensuite les couches perméables en mesurant, à l'aide d'une sonde, les variations d'activités le long de l'axe du forage.

Dans le cas où l'on désire des renseignements plus précis sur les perméabilités relatives, le fait d'injecter un certain volume d'eau non marquée, à la suite de l'eau radioactive, a pour but de pousser le traceur à une distance plus grande de l'axe du forage et, par conséquent, permet, lors du repompage de l'eau, de déceler l'arrivée de la radioactivité couche par couche, depuis une valeur très faible qui est voisine du bruit de fond initial, jusqu'à la fin de l'activité injectée, correspondant à la queue du nuage radioactif plusieurs heures ou plusieurs jours après l'injection.

Cas d'une nappe animée d'une certaine vitesse.

Le nuage se différencie rapidement — pratiquement dès l'injection, dans la plupart des cas — en sous-multiples qui obéissent au mouvement propre de chaque couche perméable.

En suivant, dans le temps, la disparition des plus importantes activités du traceur le long de l'axe, dans les couches qui ont absorbé le plus grand volume d'eau marquée lors de l'injection, il est possible de déterminer, avec plusieurs injections de volumes différents de traceur, la vitesse moyenne de l'eau dans chaque horizon perméable.

On rejoint ainsi les observations des premiers essais de Begeman et Libby [10] avec le tritium.

Les figures 6 à 10 donnent une idée des formes des courbes obtenues avec différents traceurs.

L'interprétation quantitative des courbes d'activité (fig. 10) lors du repompage pose toutefois des problèmes délicats qui ne sont pas encore entièrement résolus (*).

Une autre méthode essayée récemment avec succès au cours d'une reconnaissance de site de barrage (**), consiste à remplir un forage d'eau marquée et à déterminer les différences de radioactivité qui apparaissent à la suite du mouvement de la nappe. Les couches perméables se manifestent très rapidement par une baisse très nette de l'activité.

On peut accélérer cet effet en pompant dans un forage voisin. Le rabattement provoque un réseau de mise en vitesse de l'eau suivant une symétrie radiale et accentue le départ de traceur dans le forage-piezomètre.

L'arrivée du nuage de traceur dans le forage soumis au pompage permet d'obtenir, d'une part, la ou les vitesses suivant les couches perméables et, d'autre part, leur localisation dans chacun des forages.

Dans le même temps, des essais comparatifs des conditions optimales d'emploi des traceurs sont en

(*) Ces problèmes font l'objet d'un contrat de la D.G.R.S.T. auquel nous avons associé notamment Y. Emsellem, Ingénieur en chef des Mines, la Section d'Application des Radioéléments du C.E.A. (M. Guizerix) et M. Fried, maître de conférences à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

(**) Site de barrage de Montendre, Charente-Maritime.

6/ Injection de ^{82}Br . Forage 6, Aménagement de Bordeaux-nord.

^{82}Br injection at well 6, Bordeaux-nord project.

7/ Activité à l'issue du pompage après injection de ^{82}Br . Forage 6, aménagement de Bordeaux-nord.

Activity of water pumped after injection of ^{82}Br at well 6, Bordeaux-nord project.

8/ Activité à l'issue du pompage. Injection de ^{131}I . Forage 6, aménagement de Bordeaux-nord.

Activity of water pumped after injection of ^{131}I at well 6, Bordeaux-nord project.

9/ Injection de ^{51}Cr EDTA. Forage 6, aménagement de Bordeaux-nord.

^{51}Cr EDTA injection at well 6, Bordeaux-nord project.

10/ Activités en fonction des volumes pompés pour différents horizons perméables. Forage 6, aménagement de Bordeaux-nord.

Activity vs. pumped volume, for various permeable layers, at well 6, Bordeaux-nord project.

cours, dans un même terrain, avec des traceurs différents et inversement. Ces essais de traceurs *in situ* complètent l'une des études les plus larges effectuées en laboratoire par A. Lallemant [43], sur une série d'éléments radioactifs comprenant : ^{51}Cr , ^{59}Fe , ^{45}Ca , ^{110}Ag , ^{137}Cs , ^{24}Na , ^3H , ^{32}P , ^{35}S , ^{14}C , ^{82}Br et ^{131}I (*).

En résumé, l'utilisation des traceurs naturels ou artificiels, radioactifs ou stables, que les pages qui précèdent passent trop brièvement en revue, a déjà aidé hydrologues et hydrogéologues à résoudre des problèmes que les méthodes classiques ne permettaient pas d'aborder.

Une voie de recherches encore nouvelle, conduit à des domaines de possibilités dont certaines restent encore à défricher et nous sommes persuadé que ces méthodes interviendront de plus en plus activement en hydrologie, comme elles l'ont déjà fait dans d'autres domaines, le génie chimique par exemple.

Leur coût est d'un ordre de grandeur raisonnable, le matériel est actuellement fabriqué couramment et ses versions françaises conviennent très bien aux tâches qui lui sont demandées. Les techniciens spécialisés sont toutefois en trop petit nom-

(*) Dans le cadre d'un contrat Euratom.

bre, ainsi que les laboratoires ou bureaux d'études équipés à cet effet.

Il resterait à convaincre les responsables d'études et de travaux des grandes possibilités de ces méthodes d'investigation, basées sur les isotopes, radioactifs ou non, en ne perdant toutefois pas de vue que les études de type traditionnel doivent être encore largement sollicitées.

Bibliographie

- [1] A.I.E.A. — The measurement of hydrogen and oxygen isotopes in natural waters and its application to meteorology and hydrology. Final report contract AT (30-1) - 3162. Division of Biology and Medicine U.S.A. Energy Commission, 1967.
- [2] LÉVÊQUE (P.), VIGNEAUX (M.), ALVINERIE (J.). — Evolution de l'activité en tritium dans le sud-ouest de la France. *Proc. Symp. Isotopes in Hydrology*, p. 417-432, A.I.E.A., Vienne, 1967.
- [3] GUIZERIX (J.), MARGHRITA (R.), LAUNAY (M.), RUBY (P.). — Tritium et hydrogéologie. *Proc. Symp. Isotopes in Hydrology*, p. 433-450, A.I.E.A., Vienne, 1967.
- [4] LÉVÊQUE (P.), PAPAKIS (N.). — Etude de l'activité en tritium de quelques résurgences karstiques en Grèce méridionale. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 268, série D, p. 1023-1025, 1^{er} février 1969.
- [5] LÉVÊQUE (P.). — Etude, à l'aide du tritium, du karst des lacs Yliki et Paralimni (Béotie, Grèce). *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 268, série D, p. 1686-1689, 31 mars 1969.
- [6] LÉVÊQUE (P.), VIGNEAUX (M.). — Résultats de mesures d'activité en tritium de certaines eaux du sud-ouest. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 261, p. 4168-4171, 9, 15 novembre 1965.
- [7] BLAVOUX (B.). — Les sources minérales d'Evian. *La Houille Blanche*, n° 1, 1969, p. 21-30, Prix Henri Milon, 1968.
- [8] ALVINERIE (J.), DEGOT (B.), LÉVÊQUE (P.), VIGNEAUX (M.). — Etude de l'activité en tritium du bassin versant du Mont-Cenis. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 262, série D, p. 32-35, 3 janvier 1966.
- [9] DAVIS (G.H.), PAYNE (B.R.), DINCER (T.), FLORKOWSKI (T.), GATTINGER (T.). — Seasonal variations in the tritium content of groundwaters of the Vienna Basin, Austria. *Proc. Symp. Isotopes in Hydrology*, p. 451-473, A.I.E.A., Vienne 1967.
- [10] BEGEMAN and LIBBY. — Continental water balance, groundwater inventory and storage times, surface ocean mixing rate and world-wide water circulation pattern from cosmic ray and man-made tritium. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 12 (1957), 277.
- [11] DINCER (T.). — The use of oxygen 18 and deuterium concentrations in the water balance of lakes.
- [12] Guidebook on nuclear techniques in hydrology. Technical reports, séries n° 91, A.I.E.A., Vienne 1968.
- [13] BLAVOUX (B.), OLIVE (P.). — Premiers résultats sur la teneur en tritium des eaux du lac Léman. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 262 (13 juin 1966), série D, p. 2445-2448.
- [14] ALVINERIE (J.), DEGOT (B.), LÉVÊQUE (P.), VIGNEAUX (M.). — Activité en tritium et caractéristiques chimiques des eaux du lac Pavin. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 262, p. 846-849, série D, 21 février 1966.
- [15] BUTTLAR (H.V.), WOHLFART (D.), FARZINE (K.). — Tritium concentration of German river waters measured with the proportionnal counting technique. *Proc. 6 Internat. Conf. Radiocarbon and tritium dating*. Pullman wash, 1965.
- [16] LIBBY (W.F.). Radiocarbon dating. *University Chicago Press*, 1952.
- [17] MUNNICH (K.O.), VOGEL (J.C.). — ¹⁴C Alkylbestimmung von Süßwasser Kalkablagerung. *Naturwissenschaften* 46, 168, 1959.
- [18] PEARSON (Jr.) (F.J.), WHITE (D.E.). — Carbon 14 ages and flowrates of water in Carrizo Sand, Atascosa County, Texas. *Water Ressources Research* 3 (1), 251, 1967.
- [19] HANSHAW (B.B.), BACK (W.), MEYER RUBIN. — Radio-carbon determinations for estimating groundwater flow velocities in Central Florida. *Science*, 148, 494, 1965.
- [20] BENNETT (R.). — Carbon 14 dating of groundwater in an arid basin. *Proceed. of Sixth Intern. Conf. Radiocarbon and tritium dating*, Pullman, p. 590, 1965.
- [21] LÉVÊQUE (P.), SEVERAC (J.), VIGNEAUX (M.). — Premiers résultats d'activité en ¹⁴C d'eaux de nappes superficielles et profondes en Aquitaine. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 268, p. 17-19, 6 janvier 1969.
- [22] VOGEL (J.C.), EHRLICH (D.). — The use of the carbon isotopes in groundwater studies. *Proc 1st Symp. Isotopes in Hydrology*, Tokyo 1963, A.I.E.A., p. 383-395, Vienne 1963.
- [23] VOGEL (J.C.), EHRLICH (D.), ROETHER (W.). — A survey of the natural isotopes of water in South Africa. *Proc. 1st Symp. Isotopes in Hydrology*, Tokyo 1963, A.I.E.A., p. 407-415, Vienne 1963.
- [24] VOGEL (J.C.). — Investigations of groundwater flow with radiocarbon. *Proc. 2nd Symp. Isotopes in Hydrology*, A.I.E.A., Vienne nov. 1966.
- [25] MUNNICH (K.O.), VOGEL (J.C.). — *Naturwissenschaften* 45, p. 327, 1958.
- [26] HANSHAW (B.B.), BLACK (W.), RUBIN (M.). — Relations of carbon 14 concentrations to saline water contamination of coastal aquifers. *Water Ressources Research* 1, 109, 1965.
- [27] LINDNER (M.). — *Phys. Rev.* 91, 642 et 89, 1150, 1953.
- [28] GEITHOFF. — *Radiochim. Acta*, 1, 3, 1962 et *Nuclear Sc. Abst.* 17, n° 11 738, 1963.
- [29] KHARKAR (D.P.), NIJAMPURKAR (V.N.), LAL (D.). — The global fallout of ³²Si produced by cosmic rays. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, vol. 30, p. 621, août 1965.
- [30] NIJAMPURKAR (V.N.), AMIN (B.S.), KHARKAR (D.P.), LAL (D.). — Dating groundwaters of ages younger than 1000-1500 years using natural ³²Si. *Nature*, 210, 478-80, 1966.
- [31] PAYNE (B.R.). — Contribution of isotopes techniques to the study of some hydrological problems geophysical monograph n° 11. Isotopes techniques in the hydrology cycle. *American Geoph. Union*, Washington 1967.
- [32] FONTES (J.C.), GONFIANTINI (R.). — Comportement isotopique au cours de l'évaporation des deux bassins sahariens. *Earth Plan. Sc. Lett.* 3, 258, 1967.
- [33] FOX (C.S.). — Using radioisotope to trace movement of underground water. *Municipal utilities* 90, p. 30-32, 1952.
- [34] HOURS (R.). — Les traceurs radioactifs en hydrologie. *La Houille Blanche*, mai 1955, numéro spécial A/1955, p. 14-24.
- [35] WIEBENGA (W.A.). — Radioisotopes as ground water tracers. *J. Geophys. res.* 72, 4081, 1967.
- [36] TODD (D.K.). — Ground water. Section 13 in *Handbook of applied hydrology*, Ven te Chow, édit. McGraw Hill, New York 1964.
- [37] NIR (A.), HALEVY (E.), MANDEL (S.), HARPAZ (Y.). — Research on the use of radioactive isotopes in hydrology. Rep. n° 1, *Tahal water planning*, Tel-Aviv, sept. 1959.
- [38] MERCADO (A.), HALEVY (E.). — Determining the average porosity and permeability of a stratified aquifer with the aid of radioactive tracers. *Water Ressources Research* 2, 525, 1966.
- [39] BACHMAT (Y.), BEAR (J.). — The general equations of hydrodynamic dispersion in homogeneous isotopic porous media. *Journ. Geoph. res.*, 69, 2561, 1964.
- [40] GUIZERIX (J.), MOLINARI (J.), GAILLARD (B.), SANTOS-COTTIN (H.), MORNAS (A.), CORDA (R.). — Localisation des fuites sur un grand réservoir à l'aide de traceurs radioactifs. *Isotopes in hydrology*, Proc. Symp. 14-18 nov. 1966, p. 587-599, A.I.E.A., Vienne 1967.

- [41] DEGOT (B.), LÉVÊQUE (P.Ch.), COURTOIS (G.), GASNIER (M.), GODAR (S.). — Deux utilisations du brome 82 en hydrodynamique souterraine. *Radioisotopes in hydrology*. Proc. Symp. Tokyo 5-9 mars 1963, A.I.E.A., Vienne 1963.
- [42] SZYMANSKI (J.). — Détermination des zones perméables dans les puits d'injection d'eau à l'aide de traceurs

radioactifs. *Geofiz. Jadrowa, Prace zjazdu geofizikow Jadrow*. Krakow 1962. Warszawa Osrodek Inform. nauk. tech. ekon., p. 942-957, trad. B.R.G.M., 1963.

- [43] LALLEMAND (A.). — Contribution à la sélection de traceurs radioactifs pour l'hydrologie. 1968. Contrat Euratom 008-65-5 WASF.

Discussion

Président : M. A. HOUEURT

En ouvrant la séance, M. le Président présente, en ces termes, les communications qui figurent à l'ordre du jour de l'après-midi.

« Mesdames, Messieurs, je suis très sensible à l'honneur que vous m'avez fait en me confiant la présidence de vos travaux de cet après-midi.

« J'éprouve à vrai dire quelques difficultés à établir des liaisons valables entre les quatre communications qui vont vous être faites, tant est vaste la mécanique des fluides, même restreinte au seul domaine souterrain.

« Il est toujours difficile de prévoir la circulation des fluides dans les milieux poreux, faute de savoir quelle est exactement la distribution spatiale de leurs propriétés, si pauvrement échantillonnées par les rares puits qui les pénètrent. Mais il convient d'ajouter à cette ignorance particulière notre ignorance assez générale de nombreux phénomènes subtils susceptibles d'influer grandement sur cette circulation.

« Or, les communications que vous allez entendre sont, au fond, inspirées par le souci d'améliorer nos connaissances dans ces deux domaines; vous entendrez d'abord M. le Professeur LEVEQUE de la Faculté des Sciences de Bordeaux vous expliquer le parti que l'on peut tirer des mesures de radioactivité des eaux. Il évoquera l'âge de certaines de nos réserves vieilles de plusieurs dizaines de milliers d'années, l'usage inattendu mais combien astucieux de l'émission des rayonnements due aux expériences atomiques de surface pour en apprendre plus sur certaines circulations et enfin l'emploi que l'on peut faire des traceurs artificiels. Il se trouve que c'est une technique que je connais un peu, pour avoir, avec mes collaborateurs, organisé, en particulier, le repérage du mouvement des gaz injectés dans le gisement de pétrole d'Hassi-Messaoud; j'ai donc pu apprécier, en le lisant l'exposé de M. LEVEQUE.

Les deux communications qui suivent sont consacrées à cette difficile question qui a été débattue ce matin sous la présidence de M. ESCANDE, celle des sols non saturés. Il s'agit ici seulement, de la mesure de la quantité d'humidité. Nous ne parlerons pas, au demeurant, des sondes neutroniques bien connues et dont l'étalonnage ne présente de réelles difficultés que dans les milieux argileux. Celui des tensiomètres se rattache à une technique très familière à tous les ingénieurs spécialistes des réservoirs pétroliers, qui consiste précisément, suivant un schéma vieux de trente ans et conforme à celui que dessinait ce matin devant nous M. THURRIOT, à étudier la désaturation des échantillons en fonction de la pression résiduelle — disons la succion — qui s'exerce sur l'eau.

« Au-delà de ces effets purement mécaniques, on trouve les effets osmotiques dont M. VACHAUD nous entretenait ce matin. M. VACHAUD a, je crois, fait le tour des moyens sur lesquels on pouvait espérer fonder des mesures de saturation en eau. Depuis l'usage du psychromètre qu'il présentait en octobre 1967 à une réunion tenue sous les auspices du Secrétariat permanent pour l'étude des problèmes de l'eau, en passant par la description des tensiomètres osmotiques (présentés à une réunion de mai 1968), M. VACHAUD et M. SORMAIL ont étudié d'une façon très rigoureuse et dans une optique que je qualifierai de « cybernétique » le fonctionnement des tensiomètres à membrane de type purement capillaire.

« On sent leur regret de constater que les tensiomètres osmotiques soient d'une réalisation aussi délicate. Des membranes de type comparable sont recherchées pour réaliser des piles à combustibles ou la désalinisation de l'eau

de mer, et je sais, pour avoir surveillé de loin, je dois le dire, les activités de ma Société dans ce domaine, quelles sont les difficultés qui se présentent dans la réalisation de pareilles membranes.

« Nous terminerons par les communications de M. Emsellem, dont chacun connaît à la fois la position à l'Arrondissement minéralogique de Bordeaux et la remarquable activité. Mettant au service de la mécanique des fluides et de son expression mathématique une peu ordinaire facilité, M. Emsellem s'est penché sur ce que nous appelons le « problème inverse », c'est-à-dire, la restitution des perméabilités des nappes à partir de l'observation de leur comportement (problème déjà abordé voici quelques années dans un cycle d'échange de vues organisé par l'Ecole des Mines de Paris.

« Il va nous expliquer que ce problème, susceptible à vrai dire de recevoir un nombre indéterminé de solutions, se laisse traiter en acceptant certaines contraintes de régularité. M. Emsellem présentera les travaux accomplis par une très importante équipe groupant le Bureau de Recherches géologiques et minières, le Centre Hydrogéologique de Bordeaux, le Centre Géohydraulique et le Centre d'Information géologique de l'E.N.S.E.M. et d'autres organismes encore, pour l'étude des nappes multicouches du tertiaire du bassin d'Aquitaine.

« La schématisation des problèmes doit certainement aller en diminuant, au fur et à mesure que les ordinateurs se perfectionnent. On peut dire que, dès maintenant, la qualité et le nombre de nos observations de terrain, notre connaissance scientifique des phénomènes fondamentaux des écoulements fluides en milieu poreux, ne sont pas à l'échelle de la puissance des ordinateurs de la troisième génération. N'attendons pas, cependant, pour adapter nos habitudes à ces moyens qui transcendent la capacité de travail des moyens naturels de l'espèce humaine.

« A ce propos, je dois dire que je suis très heureux de voir aborder un sujet tel que celui de la seconde communication de M. Emsellem. Il est certain qu'une perméabilité de 1 millidarcy s'étendant sur un certain nombre de kilomètres carrés peut, avec un gradient de pression très modeste — (une différence de pression de 1 bar de part et d'autre d'une couche de 10 m) — donner des débits annuels de l'ordre de 300 000 m³/km²; la filtration à travers les argiles est une filtration dont on ne doit souvent pas négliger l'importance: s'agissant de savoir quel sera le comportement des nappes auxquelles on demande des efforts de plus en plus grands pour alimenter de façon convenable les industries et les villes qui se développent de plus en plus, il est nécessaire de tenir compte des mouvements transversaux qui dépendent des variations de la sédimentation avec la cote.

« Il faut cesser d'éliminer, au nom de critères insuffisamment étudiés, certaines « communications » qui peuvent être extrêmement efficaces en dépit de la petitesse des coefficients de filtration en raison du caractère transversal de l'écoulement.

« J'ai déjà trop pris du temps que les conférenciers vont maintenant épuiser; mais je crois pouvoir terminer en faisant un appel à une action commune. Nous disposons actuellement d'outils de travail qui sont d'une exceptionnelle puissance et qui, on peut le dire, transcendent littéralement les capacités du meilleur expert: je voudrais que l'on tirât des conclusions de la puissance de ces moyens.

« Nous devons reconnaître qu'actuellement, nous som-

mes capables de décomposer un espace poreux en quelque 10 000 blocs élémentaires, mais que nous avons les plus grandes peines à attribuer à chacun de ces 10 000 blocs des caractéristiques physiques convenables.

« Celles que nous leur attribuons s'inspirent du sens de la mesure mais il nous faut, néanmoins, reconnaître que nous ne savons pas remplir ces 10 000 cases avec les paramètres qu'il serait nécessaire de leur attribuer pour pouvoir tirer le meilleur parti des ordinateurs.

« Je crois donc que nous avons une action commune à entreprendre auprès de ceux qui détiennent les cordons de la bourse afin de les persuader que, désormais, nous disposons de moyens qui justifient qu'on dépense de l'argent pour améliorer la reconnaissance des nappes.

« Il était évidemment difficile, il y a dix ans, de convaincre, par exemple, un directeur de Société pétrolière d'approfondir un puits pour étudier l'aquifère sur laquelle reposait l'huile qu'il avait découverte, faute de pouvoir lui montrer le parti qu'on pourrait tirer de ces informations.

« Aujourd'hui, nous pouvons introduire ces données d'observation directe dans nos calculateurs et améliorer ainsi la prévision du comportement des nappes; c'est là l'objectif essentiel et commun de toutes vos communications et je pense qu'est d'actualité cet appel à une amélioration de l'observation des nappes et à une amélioration de nos connaissances fondamentales sur la physique des phénomènes qui interviennent dans leur évolution.

« Je vais donc passer la parole à M. le Professeur LEVEQUE pour sa communication sur : *L'emploi des traceurs radioactifs naturels et artificiels en hydrologie souterraine.* »

M. le Professeur LEVEQUE expose sa communication en soulignant, au préalable, son caractère descriptif.

M. le Président remercie M. LEVEQUE et ouvre la discussion.

« Pensez-vous, demande M. VACHAUD, qu'il soit possible, à partir d'une injection à la surface du sol d'eau « tracée » artificiellement, d'obtenir des données quantitatives sur l'évolution des teneurs en eau dans la zone non saturée durant l'infiltration: ceci en utilisant, par exemple, des détecteurs, correctement « collimatés » dans des tubes de sondage ? »

C'est ce que nous tentons de réaliser actuellement, répond M. le Professeur LEVEQUE, dans une série de forages courts effectués dans les séries sableuses du Quaternaire d'Aquitaine en utilisant comme traceur un radioisotope du brome.

M. DEGALLIER pose les questions suivantes:

« Qu'est-ce que les injections radioactives dans des forages donnent de plus que les carottages électriques classiques interprétés au point de vue de ce qui se passe en zone envahie ?

« Comment obtient-on autre chose qu'une certaine mesure de la dispersivité ? »

Nous cherchons, répond M. LEVEQUE, à obtenir par notre méthode de « traçage » des résultats quantitatifs plus précis (et intéressant de plus grands volumes de terrain) que ceux donnés par les carottages électriques classiques. Nous pourrions vraisemblablement, mesurer une valeur vraie de la porosité, élément que les méthodes électriques ne permettent pas d'appréhender.

D'un échange de vue entre M. DEGALLIER et M. LEVEQUE, il résulte que l'étude, au moyen de traceurs, des perméabilités et des flux en milieu non saturé pourrait s'inspirer de la procédure d'injection suivie pour la mesure des débits par dilution (ex-méthodes chimiques).

En raison de la nécessité de ne pas trop s'écarter de l'horaire prévu, M. le Président clôt, à regret, la discussion en remerciant tous ceux qui y sont intervenus.