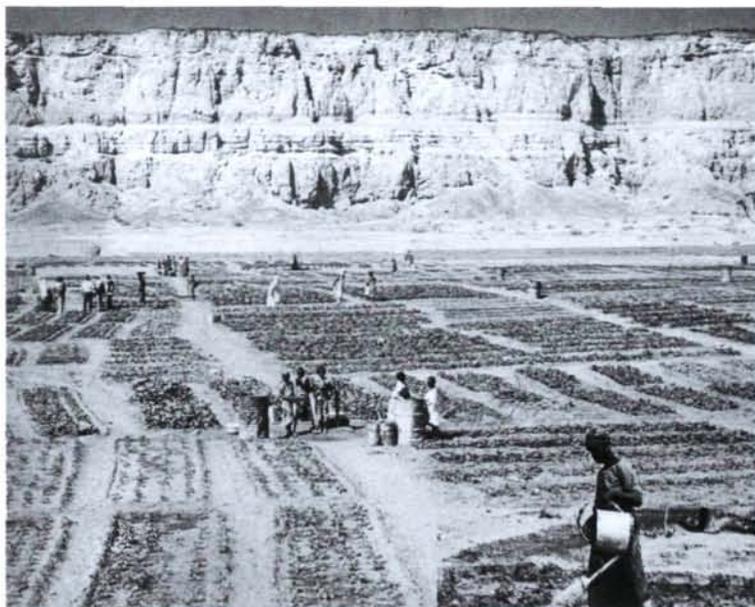


Les isotopes *in situ* au service des sciences de l'eau et de la terre

*Stables ou radioactifs,
ils contribuent
à définir et à résoudre
les problèmes hydrologiques*

par Roberto Gonfiantini et Gert Hut



Les techniques nucléaires fondées sur les isotopes sont des méthodes nouvelles dont la précision facilite l'étude des ressources en eau. Elles permettent de connaître l'origine, la répartition et les propriétés de l'eau dans un région donnée, notamment quand on les associe à tous les autres moyens dont disposent les hydrologistes, hydrogéologues et géochimistes.

La recherche moderne en hydrologie isotopique repose d'une part sur l'abondance naturelle du carbone 14 et du tritium, découverte en 1946 par W.F. Libby, et, d'autre part, sur les travaux expérimentaux et théoriques de H.C. Urey et J. Bigeleisen sur le fractionnement des isotopes stables, publiés en 1947. Les premières publications concernant l'abondance naturelle des isotopes dans l'eau ont paru quelques années plus tard, mais c'est seulement à partir de 1960 que l'hydrologie isotopique est devenue un domaine de recherche à part entière.

En juillet de cette année, il y aura trente ans que l'AIEA, encouragée par de nombreux savants renommés, s'est intéressée à ce domaine, décision qui a heureusement coïncidé avec le développement accéléré des applications des techniques isotopiques.

Cette évolution se manifeste aujourd'hui dans les comptes rendus de sept colloques sur l'emploi des techniques isotopiques pour la mise en valeur des ressources en eau, organisés par l'Agence, dont certains en coopération avec l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). Le premier s'est tenu à Tokyo en 1963 et le plus récent à Vienne, du 30 mars au 3 avril 1987, auquel plus de 160 chercheurs de 45 pays et trois organisations internationales ont participé.

MM. Hut et Gonfiantini font partie de la Section d'hydrologie isotopique, Division des sciences physiques et chimiques (AIEA).

L'évaluation des ressources hydrologiques des pays arides d'Afrique et d'autres régions est à l'ordre du jour. (Photo: BRGM, France)

Isotopes artificiels et naturels

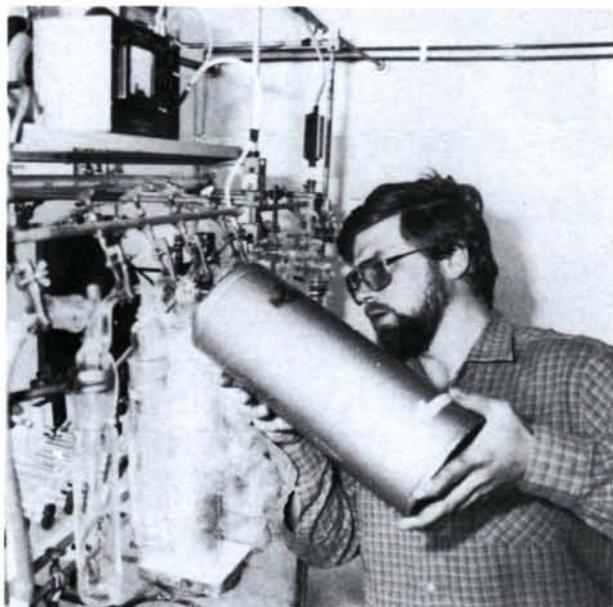
Un bon indicateur hydrologique doit avoir un comportement aussi proche que possible à celui de l'eau, tout en étant facile à détecter — si possible *in situ* — et à introduire dans de larges secteurs d'un système hydrogéologique.

Les isotopes artificiels émetteurs de rayons gamma présentent certaines de ces caractéristiques — ils sont faciles à détecter — tandis que les isotopes naturels — plus difficiles à mesurer — se répandent dans l'ensemble d'un système selon des processus naturels.

Par exemple le tritium, le deutérium et l'oxygène 18 font partie de la molécule d'eau et ont par conséquent un comportement identique — ou presque — à celui de la masse d'eau du système.

Un des aspects de l'hydrologie isotopique consiste à exploiter l'interaction entre le rayonnement et la matière. Un bon exemple est celui d'une source radioactive absorbée par les sédiments en suspension dans un cours d'eau. La radioactivité absorbée est proportionnelle à la concentration du sédiment transporté. Cette technique a permis de recueillir de précieux renseignements sur le transport des sédiments.

Trente années de recherches à l'aide des isotopes ont permis d'accumuler une somme considérable d'informations et de connaissances. Un bon hydrologue isotopique a donc les moyens de choisir les isotopes et les techniques les plus propres à résoudre le problème hydrologique qui l'occupe. La technique consiste à injecter des isotopes artificiels en un point donné d'un système hydrologique, que l'on guette en d'autres points, généralement pas trop éloignés, où l'on pense qu'ils apparaîtront. Le temps écoulé entre l'introduction et la détection, ainsi que la forme de la courbe de concentration aux points de détection, donnent des renseignements très précis sur le comportement du système au moment de l'expérience. L'opération exige une grande compétence.



La préparation du tritium, opération importante de la chaîne d'analyse dont dispose le laboratoire d'hydrologie isotopique de l'AIEA, à Vienne. (Photo: Katholitzky/AIEA)

Quand il s'agit d'isotopes environnementaux, la situation n'est pas la même. Qu'ils soient naturels ou artificiels (ou les deux à la fois), leur répartition dans le cycle hydrologique est régie par des processus naturels. Aussi se propagent-ils dans la totalité du système hydrologique, de façon continue ou tout au moins pendant des laps de temps prolongés. Les études effectuées au moyen d'isotopes environnementaux portent généralement sur de grandes masses d'eau — fleuves, lacs, nappes souterraines — et les conclusions qu'on en tire sur leurs principales caractéristiques restent longtemps valables. Les bases théoriques et l'interprétation des données ainsi obtenues sont d'ordinaire assez complexes; elles exigent une expérience considérable et des méthodes multidisciplinaires.

Quand il s'agit des nappes aquifères, c'est souvent la teneur en deutérium et en oxygène 18 (isotopes stables) qui permet de distinguer les divers compartiments et de déterminer l'origine des eaux, par comparaison avec la teneur correspondante en isotopes stables des précipitations qui s'infiltrent dans la zone d'alimentation. Il est parfois possible d'établir un rapport entre la teneur en isotopes stables de l'aquifère et l'infiltration au cours d'une période caractérisée par des conditions climatiques différentes.

Les différences de composition isotopique entre les eaux qui viennent de la montagne et les précipitations locales permettent de déterminer les proportions du mélange des eaux de rivière et des eaux météoriques dans les nappes. De même, les variations de la teneur des eaux stagnantes en isotopes stables, permettent de calculer le taux d'évaporation d'un lac.

Détermination de l'âge de l'eau

Il est intéressant de connaître le temps de séjour d'une eau dans une nappe, ce que l'on appelle son «âge». Plusieurs radio-isotopes peuvent, selon leur période,

aider à déterminer depuis combien de temps l'eau n'est plus en contact avec l'atmosphère. Si l'eau de la nappe est très jeune, cela signifie que l'alimentation de la nappe est étroitement liée aux précipitations et qu'après une saison sèche l'eau peut manquer. En revanche, quand l'eau est très vieille, cela peut signifier que la nappe n'est pas réalimentée et se comporte comme un gisement.

Le tritium, radio-isotope de l'hydrogène dont la période est de 12,43 ans, est présent dans le milieu à de très faibles concentrations, de l'ordre de quelques picocuries par litre. A la suite des essais de bombes thermonucléaires dans l'atmosphère, au cours des années 1950 et 1960, la teneur des précipitations en tritium a énormément augmenté, pour atteindre dans certains cas des niveaux près de mille fois supérieurs à la normale. Après le Traité sur l'interdiction des essais nucléaires, les teneurs en tritium sont retombées à des valeurs aujourd'hui presque égales à celles d'avant les essais. Si ce tritium a pénétré dans une nappe souterraine, il peut servir à établir si l'eau est antérieure ou postérieure à la bombe.

Le carbone 14, dont la période est de 5730 ans, est un isotope de l'environnement très souvent utilisé pour la datation. La difficulté, c'est que l'atome de carbone ne fait pas partie de la molécule d'eau mais de l'ion bicarbonate en solution dans l'eau. Il faut donc tenir compte de la composition chimique de l'eau.

On pense que le bicarbonate des eaux souterraines se compose de carbone provenant de deux sources différentes: d'une part, l'humus infiltré avec les précipitations et, d'autre part, les carbonates marins du terrain aquifère, dissous par l'eau souterraine. Le premier contient du carbone 14, puisqu'il est en équilibre avec l'anhydride carbonique du sol provenant de la respiration des plantes et de la décomposition des matières organiques, tandis que le carbonate marin n'en contient plus. Pour dater, il faut connaître la teneur en carbone 14 de l'eau récemment infiltrée. C'est pourquoi l'on a mis au point plusieurs modèles pour déterminer la teneur en carbone de la fraction «moderne» et de la fraction «ancienne». Ces modèles font intervenir, par exemple, les diverses teneurs en carbone de l'humus et le bicarbonate marin.

La période du carbone 14 limite à 50 000 ans environ la possibilité de datation. La teneur du carbone moderne en isotope 14 est déjà si basse (10^{-12}) que la mesure s'effectue d'ordinaire par calcul de la décroissance. Après une dizaine de périodes et avec une teneur en carbone 14 égale à 0,001 fois celle du carbone moderne, la technique analytique n'a plus la précision nécessaire. La spectrométrie de masse sur accélérateur, en permettant de compter directement les ions de carbone 14 grâce à l'accélérateur tandem Van de Graaff, rend possible en principe une datation plus lointaine avec un échantillon plus petit, mais en pratique la contamination de l'appareil a ramené la gamme de datation à des valeurs à peu près identiques à celles que donne le calcul de la décroissance.

Si l'on veut reculer la limite de datation, il faudra trouver un autre isotope de période plus longue. Le chlore 36, par exemple, a une période de 305 000 ans, et la chimie de l'eau et du sol n'a pas paru devoir poser de gros problèmes, mais la concentration de chlore 36

est si faible qu'il a fallu traiter d'énormes volumes d'eau avant de pouvoir procéder par calcul de la décroissance. La spectrométrie de masse sur accélérateur a permis d'améliorer la situation, car elle nécessite beaucoup moins de chlore. Les résultats obtenus depuis cinq ans environ montrent que, dans bien des cas, la composition chimique du sol est plus compliquée qu'on le croyait.

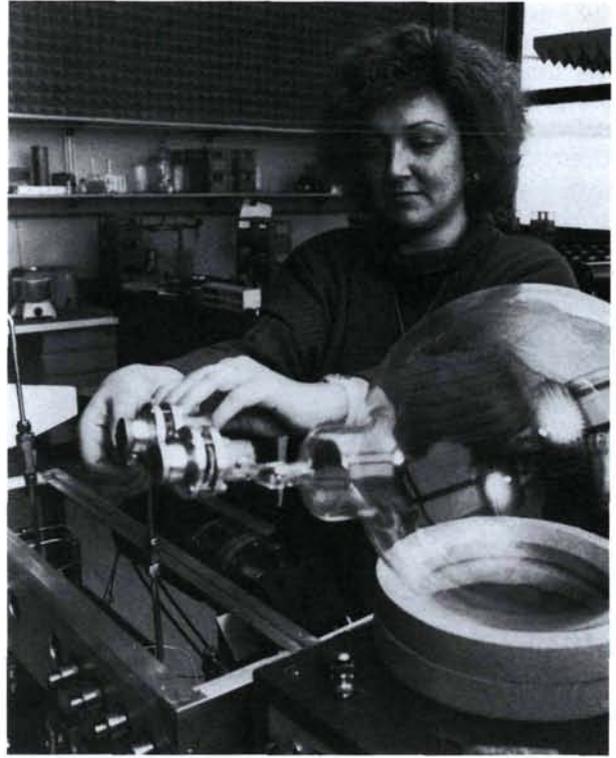
On a cependant obtenu des résultats encourageants dans certains cas, par exemple lors de l'étude au moyen du chlore 36 de la grande nappe artésienne d'Australie. Les progrès réalisés dans ce domaine permettront plus tard l'étude de grandes nappes comme celle du Continental intercalaire du Sahara (600 000 kilomètres carrés environ) ou celle de Botacatu au Brésil (un million de kilomètres carrés environ).

L'appui et l'action de l'AIEA

Dès le début de son programme, l'Agence a appuyé toutes les applications des techniques isotopiques en hydrologie en fournissant des services d'experts et du matériel et en assurant la formation ainsi que les services d'analyse nécessaires dans le pays intéressé. Toutefois, lorsqu'il s'agit des isotopes du milieu, quelques pays seulement possèdent des laboratoires capables de faire les analyses, lesquelles sont alors confiées au laboratoire d'hydrologie isotopique de l'Agence, à Vienne. L'AIEA encourage aussi l'élaboration de techniques nouvelles et le perfectionnement de celles qui sont en usage, tant en ce qui concerne les méthodes d'analyse que l'approche théorique de l'interprétation des données.

Les travaux exécutés avec l'appui de l'Agence sont innombrables. Certains des plus importants ont été exécutés au cours des quelques dernières années ou sont actuellement en cours.

● **Afrique du Nord.** Au début des années 1980, le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) a entrepris dans les trois pays du Maghreb, à savoir l'Algérie, le Maroc et la Tunisie, un inventaire des ressources en eau, et notamment des nappes souterraines, car ces pays sont en grande partie arides ou semi-arides. Dans le programme intervenaient aussi les techniques permettant d'augmenter les ressources en eau, telles l'alimentation artificielle des nappes, l'épuration et le recyclage des eaux usées, l'évaluation de l'érosion des sols et du transport des sédiments en suspension qui en résulte et risque d'abrèger très sensiblement la durée utile des lacs artificiels. L'Agence a alors décidé de lancer dans les trois pays en question un projet régional parallèle sur l'application des techniques isotopiques à l'étude de certains de ces problèmes, en profitant de l'importante infrastructure mise en place pour le projet du PNUD. Cette décision présentait des avantages pour les deux parties. Des études ont été entreprises au Sahara algérien et tunisien afin de déterminer l'ancienneté et les mouvements des eaux des deux principaux bassins aquifères, le Continental intercalaire et le Complexe terminal, ce qui pourrait en principe faciliter l'établissement de modèles mathématiques et la planification de l'exploitation. Vu le très grand âge de la nappe, qui a été remplie il y a plus de 30 000 ans, au cours du pléistocène, on envisage aujourd'hui de se servir du chlore 36 pour la datation.



Maria da Conceição Ribeiro Vieira, boursière portugaise en stage au laboratoire d'hydrologie isotopique de l'AIEA, à Vienne. (Photo: Katholitzky/AIEA)

Dans le lit de l'oued N'Fis, près de Marrakech, on a utilisé des isotopes artificiels pour étudier le mouvement des eaux dans un site expérimental d'alimentation de la nappe par infiltration. Ces études ont montré que la décantation et la précipitation des sédiments en suspension étaient insuffisantes dans le premier bassin en raison de courts-circuits dans la circulation de l'eau. On a alors modifié la configuration de ce bassin afin que les sédiments s'y déposent au lieu de gagner les bassins suivants et d'y ralentir l'infiltration.

Sur un site des environs de Tunis, on a réinjecté de l'eau tritiée avec des eaux usées afin de vérifier le pouvoir épurateur du sol et la propagation de l'eau réinjectée dans la nappe. Cette étude n'est pas encore achevée mais les résultats déjà obtenus suffisent à confirmer la validité de la méthode et, notamment, le fait que le tritium est un excellent marqueur de l'eau.

● **Asie et Pacifique.** Les Etats Membres financent dans plusieurs pays et régions des programmes de recherche coordonnée en hydrologie isotopique qui sont exécutés par l'Agence. L'un d'eux, financé par l'Australie, comprend des recherches en République de Corée, en Indonésie, en Thaïlande, en Malaisie et au Sri Lanka. Il s'achèvera cette année par une réunion de travail qui se tiendra en Chine.

● **Amérique latine.** Un autre programme de recherche coordonnée, cette fois financé par la République fédérale d'Allemagne, vise la promotion de l'emploi des techniques isotopiques en hydrologie en Amérique latine. Dix pays y participent: Argentine, Bolivie, Brésil, Chili, Colombie, Cuba, Equateur, Guatemala, Mexique et République Dominicaine. Il s'achèvera en

1987 par un séminaire à Mexico. Un autre programme, financé par l'Italie, a pour but de montrer les possibilités des techniques isotopiques et géochimiques dans la prospection géothermique. Il intéresse l'Argentine, la Bolivie, la Colombie, le Costa Rica, l'Equateur, le Guatemala, le Pérou et le Venezuela. La plupart des pays de ce continent possèdent d'importantes ressources géothermiques qui, pour le moment, ne sont exploitées qu'au Mexique et au Salvador. Le Mexique, qui doit prochainement se joindre au programme, est aujourd'hui le troisième en importance des pays producteurs d'électricité géothermique, après les Etats-Unis et les Philippines, et avant l'Italie.*

L'eau dans les pays arides

L'évaluation des ressources en eaux souterraines des pays arides a fait l'objet d'une attention particulière. Or, les isotopes sont au nombre des moyens les plus efficaces lorsqu'on veut savoir comment les nappes souterraines se réalimentent et repérer les eaux fossiles, c'est-à-dire celles des nappes qui ont été réalimentées dans le passé, alors que le climat était plus humide qu'aujourd'hui.** Des études ont été faites avec l'appui de l'Agence dans un grand nombre de pays arides d'Afrique et d'Asie. Deux projets régionaux ont été récemment entrepris, l'un dans trois pays d'Afrique de l'Ouest — Mali, Niger et Sénégal — et l'autre en Afrique de l'Est, notamment en Egypte et au Soudan. Ce dernier est financé par la République fédérale d'Allemagne.

Aide à la formation

L'Agence contribue aussi beaucoup à la formation. Cette année, la Section d'hydrologie isotopique a organisé pour la première fois un stage comportant des conférences, des travaux pratiques en laboratoire et des travaux scientifiques sur le terrain. Des boursiers venus

* Voir «Les isotopes dans l'exploration de l'énergie géothermique», *Bulletin de l'AIEA*, vol. 25, n° 2 (1983).

** Voir «Prospection des ressources hydrauliques du désert: rôle des isotopes» *Bulletin de l'AIEA*, vol. 23, n° 1 (1981).

d'Albanie, de Chypre, de Colombie, d'Egypte, d'Indonésie, de Jordanie, du Portugal, des Philippines et du Soudan participent à cette expérience. En cas de succès, elle sera répétée afin de permettre la participation d'un plus grand nombre de boursiers scientifiques.

Intéressant colloque sur l'eau

Pour résoudre les problèmes pratiques, les hydrologistes, géochimistes et autres spécialistes ont de plus en plus recours aux isotopes stables et radioactifs qui sont parfois les seuls moyens permettant d'étudier les aquifères, les lacs naturels et artificiels, les cours d'eau et les estuaires. Les isotopes naturels ou artificiels servent d'indicateurs pour déterminer les propriétés et les caractéristiques de l'eau et évaluer les ressources possibles dans diverses conditions climatiques et géographiques. Ils servent aussi à étudier les mouvements de l'eau et des sédiments, la salinité ou la pollution, par exemple. Les isotopes importants pour la recherche hydrologique sont le deutérium (hydrogène 2) et l'oxygène 18, tous deux stables, et le tritium (hydrogène 3) et le carbone 14 qui sont radioactifs.

Un colloque international organisé conjointement par l'AIEA et l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO), a réuni à Vienne, du 30 mars au 3 avril 1987, plus de 160 scientifiques et chercheurs de 45 pays et trois organisations internationales qui ont examiné les applications hydrologiques des techniques nucléaires et connexes. Les participants ont présenté des rapports et des communications sur les recherches et les travaux sur le terrain menés dans plus de 30 pays d'Afrique, d'Europe, d'Amérique latine et d'autres régions. Cette réunion était la septième depuis 1963 que l'AIEA organisait pour promouvoir l'échange d'informations et de résultats de la recherche dans cet important domaine. Par l'intermédiaire de son programme de coopération technique, de ses contrats de recherche et autres mécanismes, l'Agence a aussi fourni un appui financier direct et des services d'experts pour des travaux hydrologiques dans le monde entier. La coopération avec l'UNESCO s'inscrit dans le cadre d'un programme hydrologique international visant à aider les pays en développement à faire un bon usage des techniques et autres moyens nécessaires à la solution des problèmes de l'eau qui se posent à l'échelon régional et local.

Le compte rendu de ce colloque sera publié au courant de l'année.

