Les radioisotopes jouent un rôle essentiel dans les études sur les ressources hydrauliques

L'une des conditions préalables à la bonne gestion des ressources hydrauliques est de posséder des données certaines sur la quantité, l'écoulement et la circulation des eaux que l'on exploite. Au cours des deux dernières décennies, le rôle des techniques isotopiques est devenu prépondérant dans l'évaluation qualitative et quantitative des ressources en eau.

Dans les études sur les eaux de surface, les techniques isotopiques servent à mesurer le ruissellement des eaux de pluie et de fonte des neiges, le débit des cours d'eau et des fleuves, les pertes des lacs, des réservoirs et des canaux par infiltration et la dynamique de diverses masses d'eau.

De nos jours, il est pratiquement impossible d'imaginer des études sur les ressources en eaux souterraines (sources, puits) sans les techniques isotopiques. Ces techniques sont fondamentalement simples et relativement rapides.

Parmi les questions posées aux hydrologues sur les eaux souterraines, la plus délicate est souvent celle qui concerne le débit d'extraction à respecter pour éviter que la source ne s'assèche, ou, pour une source appelée à être "épuisée", la capacité de production totale.

Les techniques isotopiques peuvent servir à résoudre des problèmes très variés: identification de l'origine des eaux souterraines, détermination de leur âge, vitesse et direction de l'écoulement, rapports entre les eaux de surface et les eaux souterraines, possibilités d'interconnections entre différentes nappes phréatiques, porosité locale, pouvoir de transmission et de dispersion d'une nappe. Ces recherches sont d'un coût souvent modeste par rapport à celui des techniques hydrologiques classiques et elles permettent en outre de recueillir des renseignements qu'il est parfois impossible d'obtenir autrement.

L'hydrologie isotopique se divise en deux branches: l'hydrologie fondée sur les isotopes naturels, qui a pris une place très importante dans les régions du monde où les données hydrologiques fondamentales sont insuffisantes, et l'hydrologie fondée sur des isotopes artificiels. La première se sert des variations des isotopes qui existent dans les eaux et proviennent de processus naturels, qu'elle observe et interprète pour résoudre certains problèmes hydrologiques en se fondant sur la connaissance générale des variations des isotopes dans la nature. Les isotopes naturels peuvent servir à l'étude des problèmes hydrologiques de régions entières si (comme c'est généralement le cas) les conditions naturelles s'accompagnent de variations mesurables de la concentration des isotopes de différentes eaux.

L'hydrologie fondée sur des isotopes artificiels se sert de radioisotopes injectés dans le système à étudier; elle consiste à suivre l'évolution de la concentration de ces isotopes. Les renseignements fournis par cette technique ne sont valables que dans un périmètre restreint autour du point d'injection et dans les conditions qui prévalent au moment de l'opération. Néanmoins, si les mesures sont pratiquées en un nombre suffisant de points et répétées à certains intervalles, elles permettent d'acquérir une bonne connaissance du système hydrologique étudié. La méthode dite à puits unique s'est révélée, parmi les techniques mises au point, jusqu'à présent, particulièrement sûre comme moyen de

déterminer de manière quantitative les paramètres des nappes aquifères qui interviennent dans l'alimentation en eaux souterraines.

Les radioisotopes naturels intéressants — tritium (hydrogène 3) et carbone 14 — sont produits naturellement par interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère et artificiellement par les explosions d'engins nucléaires. Les isotopes créés de la main de l'homme se sont dispersés dans l'atmosphère terrestre et leur rôle dans le cycle hydrologique est maintenant réglé par des processus naturels.

Les isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène, éléments chimiques qui constituent la molécule eau, sont, dans un certain sens, des indicateurs géochimiques idéaux pour l'eau parce que leurs concentrations ne sont pas susceptibles de changer sous l'effet d'interactions avec la matière des nappes phréatiques. En revanche, les composés carbonés des eaux souterraines peuvent réagir avec la matière des nappes phréatiques, ce qui complique l'interprétation des données.

De nombreux processus naturels font varier la composition isotopique des eaux naturelles. Les plus importants sont l'évaporation et la condensation. Pendant l'évaporation, les molécules légères de l'eau, $H_2{}^{16}O$, sont plus volatiles que celles qui contiennent un isotope lourd comme le deutérium (D) ou l'oxygène 18 (^{18}O). C'est pourquoi l'eau qui s'évapore de l'océan contient moins de deutérium et d'oxygène 18 que l'eau de l'océan elle-même.

Lorsque cette vapeur d'eau de l'atmosphère est successivement refroidie puis condensée, sous forme de nuages et de précipitations, les molécules lourdes se condensent les premières et il s'ensuit que les précipitations successives issues de la même masse de vapeur initiale contiennent de moins en moins de deutérium et d'oxygène 18.

Etant donné que le degré de condensation d'une masse de vapeur dépend de la température, on peut s'attendre à l'existence d'un rapport entre la composition isotopique de la précipitation et sa température de formation. Ce rapport donne lieu à des variations saisonnières de la composition isotopiques des précipitations (en hiver les précipitations contiennent moins d'isotopes lourds qu'en été), à des variations selon la latitude (la teneur en isotopes lourds des précipitations est plus faible lorsque le degré de latitude est plus élevé) et à des variations selon l'altitude (la teneur en isotopes lourds des précipitations diminue en fonction de l'altitude).

Ce dernier phénomène est particulièrement important pour l'étude hydrologique d'une région. C'est ainsi que des eaux souterraines dont l'alimentation provient de zones situées à diverses altitudes peuvent se différencier par leur teneur isotopique. L'effet de l'altitude peut varier d'une région à l'autre, mais en général, pour un accroissement d'altitude de 100 mètres, la teneur en oxygène 18 diminue d'environ 0,3% et la teneur en deutérium de 2,5%.

L'exploitation des données isotopiques permet de parvenir à de nombreux résultats dont certains seraient difficiles, voire impossibles à obtenir par d'autres méthodes. Toutefois, il y a lieu de souligner que l'emploi de ces méthodes exige une étroite collaboration entre les hydrologistes si l'on veut être sûr de parvenir à une interprétation exacte et optimale des données fournies par les isotopes. Il est essentiel de commencer par bien définir le problème, qui consiste à determiner à l'aide des méthodes de recherche hydrogéologiques communément utilisées, quelle est l'hypothèse la plus vraisemblable parmi un certain nombre de possibilités. L'emploi des isotopes peut alors servir à indiquer l'hypothèse la plus plausible ou, tout au moins, à éliminer certaines des hypothèses avancées.

Il faut ensuite décider si les techniques des isotopes naturels peuvent contribuer à la solution du problème. Aussi faut-il bien connaître les principes qui régissent la composition isotopique des eaux naturelles. Les considérations purement théoriques ne permettent pas

Prélèvement d'échantillons de l'eau d'un puits dans l'Altiplano (Bolivie). L'AIEA a fait l'analyse de la composition isotopique d'eaux souterraines dans le cadre d'un grand projet du PNUD visant à étudier l'origine et le mouvement des eaux souterraines de l'Altiplano. Photos: AIEA/Bryan Payne.

toujours de décider si la méthode isotopique pourra être appliquée et l'on fait donc généralement une petite analyse exploratoire des eaux du secteur intéressé pour s'assurer que la méthode est applicable.

L'AIEA fournit une assistance à certains pays dans l'application des techniques isotopiques à l'étude des ressources en eau et autres travaux hydrologiques. Les études énumérées ci-après à titre d'exemple donneront une idée de la manière dont ces techniques sont appliquées à des problèmes particuliers dans diverses régions du monde. La plupart des opérations sont décrites succinctement, mais certaines sont présentées plus en detail afin d'illustrer les applications des techniques fondées sur les isotopes naturels.

AMERIQUE LATINE

Nicaragua. Les variations de la teneur des précipitations en isotopes stables selon l'altitude, que l'on appelle effet d'altitude, ont servi à déterminer l'origine de certaines eaux.

La plaine de Chinandega s'étend sur quelque 1100 km^2 entre l'Océan Pacifique et la ligne de partage des eaux que forme la Cordillère de Marrabios. De la côte vers l'intérieur, le terrain s'élève progressivement jusqu'à une altitude d'environ 200 mètres sur une distance de 20 km, puis la dénivellation s'accentue jusqu'à la ligne de crêtes de la Cordillère dont l'altitude atteint 1745 mètres. On a recueilli des échantillons de précipitations et d'eaux souterraines en divers points situés à diverses altitudes le long d'une ligne allant de la côte vers l'intérieur. Les résultats ont montré que les eaux souterraines peu profondes sont

alimentées directement par la plaine, tandis que les eaux souterraines profondes qui approvisionnent les puits proviennent des précipitations tombant sur les montagnes situées à plus de 280 mètres d'altitude.

Equateur. Un projet récent, financé au moyen de fonds d'affectation spéciale et exécuté par la FAO, a pour objet de déterminer, avec l'assistance de l'AIEA, l'origine d'eaux souterraines au moyen de techniques fondées sur des isotopes naturels.

Guatemala. Un grand projet du PNUD, auquel participe l'AIEA, vise à étudier l'origine des eaux souterraines aux environs de la ville de Guatemala, dans le but d'améliorer l'approvisionnement en eau de cette ville.

Bolivie. Un grand projet du PNUD a permis d'évaluer des ressources en eau de l'altiplano au moyen des techniques fondées sur les isotopes naturels.

Mexique. L'origine de la salinité des eaux souterraines de la vallée de Mexicali est le sujet d'une étude effectuée conjointement par les autorités mexicaines et l'AIEA. Les techniques isotopiques sont aussi utilisées pour évaluer le potentiel géothermique de cette vallée. Une autre étude réalisée dans la plaine côtière au sud de Vera Cruz à l'aide d'isotopes naturels a permis d'établir que la plus grande partie des eaux souterraines provient de l'infiltration des pluies locales et non des infiltrations en provenance du fleuve qui traverse la plaine.

Cuba. L'AIEA aide actuellement le pays à appliquer les techniques du radiosondage pour la mise en valeur des ressources en eaux souterraines.

Jamaïque. L'Agence se charge des analyses isotopiques dans le cadre d'un grand projet du PNUD visant à mettre en valeur les eaux souterraines.

AFRIQUE

Algérie. Les techniques des isotopes naturels ont été utilisées dans une étude sur la plaine du Hodna, en Algérie, destinée à fournir des renseignements sur les mécanismes d'alimentation de deux nappes phréatiques situées à des niveaux différents. Une plaine salée, le Chott-el-Hodna, occupe le centre de la région où les eaux de ruissellement provenant de oueds en crue s'évaporent rapidement, laissant un dépôt de sel.

Les deux nappes sont essentiellement alimentées par les précipitations tombant sur les montagnes du Hodna, au nord. Les eaux de pluie sont également entraînées par les oueds vers la plaine où elles s'infiltrent en partie avant d'atteindre le Chott. Les concentrations relativement élevées de tritium relevées dans des échantillons d'eau de la région des oueds prouvent que l'alimentation de la nappe supérieure se fait par infiltration provenant des oueds. En principe, cette nappe peut aussi être alimentée par infiltration des précipitations qui tombent sur la plaine elle-même. Toutefois, l'analyse d'eau prélevée dans des puits de la plaine situés très loin des oueds a révélé une concentration de tritium beaucoup plus faible, ce qui laisse penser que l'infiltration des précipitations est minime.

Le projet portait aussi sur l'étude des rapports entre les deux nappes. On a constaté que les zones d'alimentation en montagne étaient essentiellement à la même altitude mais que la teneur en isotopes stables d'échantillons de la nappe la plus profonde prélevés dans les puits artésiens accusait des différences très sensibles. En mesurant le carbone 14, on est parvenu à la conclusion que cette nappe profonde devait être alimentée des dizaines de

Un enregistreur du niveau de l'eau sur un cours d'eau de la Jamaïque où l'AIEA procède à des analyses isotopiques dans le cadre d'un projet du PNUD.

Le Bassin blanc est un lac de cratère de l'île Maurice. Prélèvement d'échantillons d'eau aux fins d'analyse isotopique.

milliers d'années plus tôt que la nappe supérieure. Il y avait une correlation entre les concentrations d'oxygène 18 et de carbone 14 et la profondeur dans les eaux souterraines à proximité des puits artésiens. Cela indique très nettement que la couche profonde est alimentée par la couche supérieure à mesure que son eau est utilisée.

Soudan. L'intérêt exceptionnel de l'étude des teneurs en deutérium et en oxygène 18 des eaux naturelles est que leurs variations peuvent fournir des renseignements sur l'origine de l'alimentation des systèmes hydrographiques.

Aux abords du site choisi pour le nouvel aéroport de Khartoum, on se propose de créer une nouvelle zone de développement agricole et il a fallu étudier l'hydrographie de la région de manière à pouvoir assurer un approvisionnement suffisant en eau pour l'aéroport et les nouvelles zones agricoles. L'étude visait à distinguer quatre sources différentes: a) Nil bleu, b) Nil blanc, c) précipitations locales, d) apports d'eaux souterraines provenant des régions limitrophes.

La différence d'environnement entre les cours supérieurs du Nil bleu et du Nil blanc donne lieu à une différence importante de teneur en isotopes stables, cette dernière étant la plus faible dans le Nil bleu. Les résultats obtenus dans les deux cas étaient différents des estimations de la teneur en isotopes stables des précipitations locales. Les chiffres concernant les eaux souterraines de la région se sont aussi révélés différents des estimations relatives aux précipitations locales, ce qui indique que l'alimentation des eaux souterraines ne provient pas de ces précipitations.

Au sommet d'une grande chute d'eau de l'île Maurice, prélèvement d'échantillons d'eau en vue de l'analyse des isotopes de l'environnement.

Les échantillons d'eaux souterraines prélevés à l'est du Nil bleu avaient une composition comparable à celle du fleuve, témoignant d'un phénomène d'infiltration d'eau du fleuve jusqu'à une distance d'environ 10 km.

Plus à l'est, les données relatives aux isotopes stables ont laissé supposer que l'écoulement des eaux souterraines se faisait dans le sens contraire, c'est-à-dire venant du nord-est. Cette eau avait une teneur en isotopes stables beaucoup plus faible et une teneur minime en carbone 14, donnant ainsi à penser que l'alimentation avait eu lieu il y a quelques milliers d'années dans des conditions climatiques différentes de celles d'aujourd'hui. Entre ces deux régions, les eaux étaient mélangées et présentaient un degré de salinité beaucoup plus élevé.

A partir de ces constatations on a pu établir un levé de l'écoulement et de l'alimentation des eaux souterraines et déterminer ainsi les volumes d'eau disponibles pour les nouveaux projets de développement.

Ethiopie. Le niveau du lac Baseyk, à environ 200 kilomètres à l'est d'Addis-Abéba, s'est élevé de 20 mètres depuis 1972, mettant en danger les communications ferroviaires et routières vers la côte. Des travaux visant à surélever la voie ferrée de la route viennent d'être achevés. En collaboration avec l'AIEA, l'Administration des Eaux de l'Ethiopie étudie la possibilité d'employer les techniques isotopiques pour déceler la source responsable de l'augmentation de niveau du lac.

République Arabe Libyenne. L'étude du mouvement et de l'alimentation des eaux souterraines dans diverses régions fait l'objet d'un projet financé au moyen de fonds spéciaux

et exécuté par la FAO pour le compte de l'Administration des Eaux de la Libye. L'AIEA fournit son assistance pour l'application des techniques isotopiques dans les régions à étudier.

Maroc. Les techniques des isotopes naturels ont servi à étudier les différents modes d'alimentation de la nappe phréatique de la plaine du Sous au Maroc. Elles ont permis de dresser un tableau des teneurs en isotopes stables de chacune des sources possibles d'alimentation — nappes proches de la vallée, eaux de crue et précipitations. Les résultats ont montré que l'alimentation à partir des nappes situées en bordure du Haut Atlas ne s'étendent pas au-delà de 5 kilomètres environ dans la plaine. Pour l'Anti-Atlas, on a pu délimiter deux zones importantes de l'alimentation, l'une au sud-ouest d'Aoulouz, vers l'Oued Tangarfa, l'autre entre Tazermourt et l'Oued Assad. Les oueds du Haut Atlas ne deviennent vraiment des sources réelles d'alimentation que loin dans la plaine où leur pente est beaucoup plus faible. L'Oued Sous lui-même réalimente la région située au sud de manière discontinue, puis qu'il existe le long de son lit des zones d'infiltration et de résurgence de ses eaux. L'alimentation par précipitations est limitée essentiellement au versant nord de la vallée.

Nord du Sahara. En Algérie et en Tunisie, les techniques isotopiques ont été utilisées pour explorer les eaux souterraines du Nord du Sahara. Le Continental intercalaire est la plus

Ile Maurice — Un trou de sondage expérimental, cimenté pour éviter la chute de débris, est rouvert pour le prélèvement d'échantillons.

grande nappe phréatique du Sahara et s'étend sur une superficie de 600 000 kilomètres carrés. L'étude a confirmé l'hypothèse que l'eau du Continental intercalaire se déplace à l'intérieur du système de failles d'El-Hamra et de Médenine vers la nappe phréatique artésienne (Complexe terminal) du Golfe de Gabès. La composition de l'eau près de El-Hamra est la même que dans la partie orientale du Continental intercalaire. Plus à l'est, la teneur en oxygène 18 augmente progressivement, ce qui est l'indice d'un mélange avec l'eau d'alimentation locale.

Kenya. L'enrichissement caractéristique en isotopes stables des eaux évaporées peut servir á étudier l'existence éventuelle de communications entre les lacs et les eaux souterraines. On pensait que le lac Chala, lac de cratère volcanique situé sur le versant sud-est du Kilimandjaro et ne possédant ni affluent ni émissaire en surface, alimentait des sources dans la région. Ce lac a une superficie d'environ 4 kilomètres carrés et une profondeur de 100 mètres; une étude détaillée a révélé une teneur homogène en isotopes stables, caractéristique de l'eau evaporée, qui ne variait pas avec le temps.

On a constaté que la teneur en isotopes stables des sources de la région était très différente de celle des eaux du lac. On en a conclu que le lac n'était pas la source principale d'alimentation de ces sources. A partir de la différence des teneurs en isotopes stables du lac et

Enlèvement de la calotte du trou de sondage.

des sources, on a évalué la contribution de l'eau du lac à 6% au maximum du débit de chaque source.

Tchad. Les mêmes principes ont été appliqués dans une étude sur l'infiltration des eaux du lac Tchad vers les eaux souterraines proches du lac. Les données concernant les isotopes stables ont montré que le pourcentage d'eau du lac dans les eaux souterraines de la région des dunes diminue assez rapidement à mesure que l'on s'éloigne du lac à cause de leur alimentation par infiltration des précipitations. En outre, il se produit à l'intérieur de la nappe phréatique une stratification verticale due au fait que l'eau provient à la fois du lac et de l'infiltration des précipitations et le pourcentage d'eau venant du lac augmente avec la profondeur.

Maurice. Dans le cadre de son programme d'assistance technique, l'AIEA envisage la possibilité d'utiliser les techniques fondées sur les isotopes naturels pour étudier le mouvement des eaux souterraines dans cette île de l'Océan indien.

AUTRES PAYS

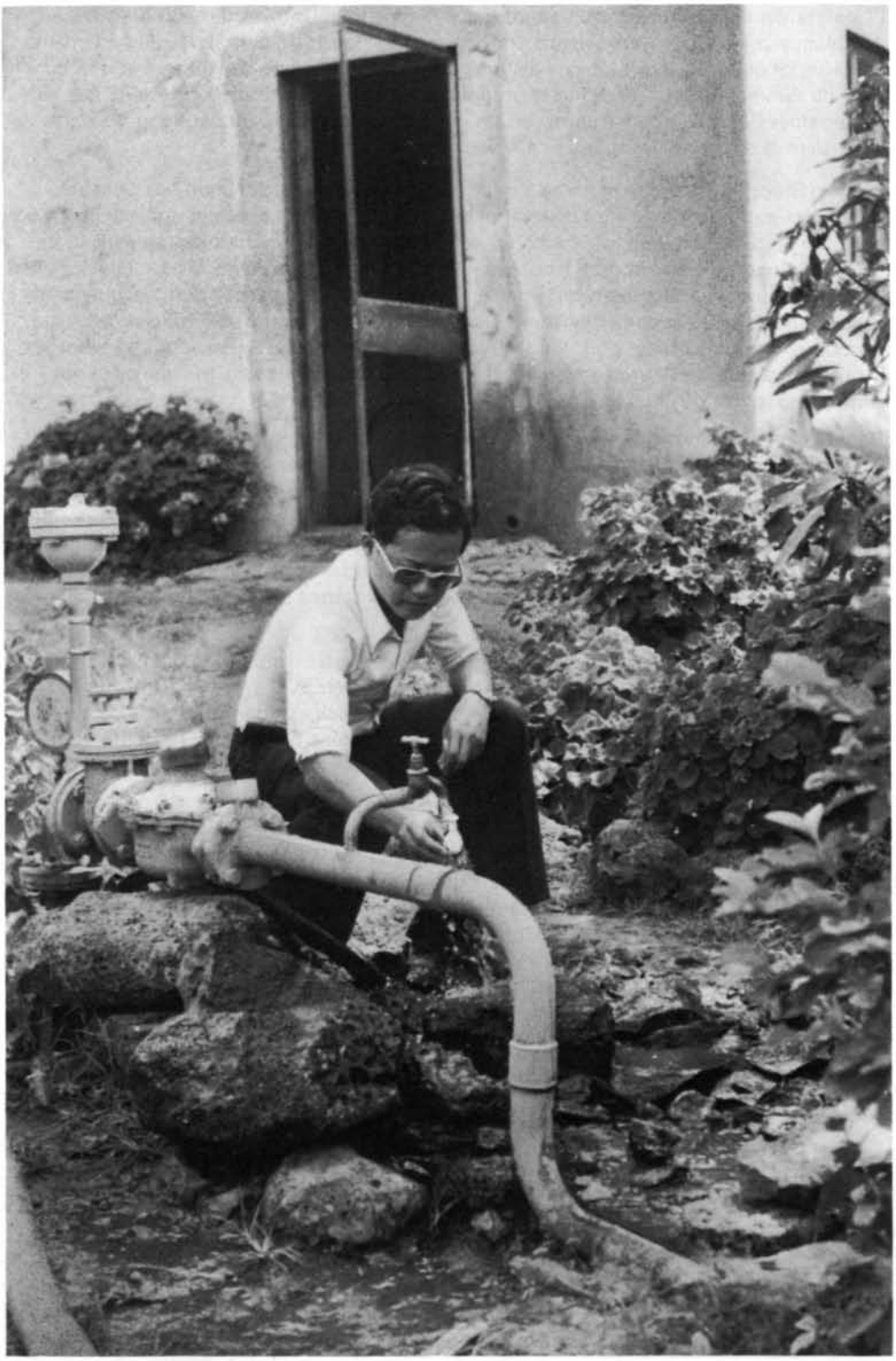
Qatar. L'Agence étudie, dans le cadre d'un projet PNUD/FAO le débit d'alimentation des eaux souterraines dans les nappes phréatiques du Qatar septentrionnal. On pense que les dépressions de la région constituent la principale source d'alimentation. Le but du projet est d'évaluer le volume des ressources d'eau disponibles et d'aider le gouvernement à planifier l'ensemble de son programme de développement et de gestion des ressources en eau destinées aux usages domestiques, industriels et agricoles. Les techniques isotopiques permettront d'obtenir des renseignements pour estimer le potentiel de ressources en eau assurées de manière à éviter leur épuisement et la pénétration d'eau saline provenant de zones plus profondes.

Inde. Dans le cadre d'un projet du PNUD, l'AIEA utilise les techniques fondées sur les isotopes naturels pour aider le gouvernement à évaluer les caracteristiques géothermiques de deux régions du pays.

Grèce. Le lac de Marathon près de Kalamos, en Attique, est situé entre le système métamorphique du Grammatikon et le système sédimentaire du Parnasse. Ce lac alimente en eau la ville d'Athènes qui se trouve à environ 20 kilomètres au sud-ouest. On a récemment exploré sur la côte au nord du lac plusieurs sources proches de Kalamos qui pourraient éventuellement venir compléter l'approvisionnement en eau de la capitale. Dans l'idée d'exploiter ultérieurement ce potentiel on a utilisé les techniques des isotopes naturels pour déterminer l'origine de l'eau douce de ces sources. Cette étude au moyen des radioisotopes a été réalisée conjointement par l'Agence internationale de l'énergie atomique, l'Institut national grec de recherche géologique et minière et le Centre "Demokritos" d'études nucléaires de la Commission grecque à l'énergie atomique.

Le problème consistait à déterminer si les sources de Kalamos sont alimentées par le système du Grammatikon ou celui du Parnasse. L'altitude du système du Grammatikon ne dépasse guère 590 mètres, tandis que celle du système du Parnasse atteint en certains endroits 1400 mètres. Vu cette différence, on a pensé qu'avec l'effet d'altitude la teneur en isotopes stables des eaux des deux systèmes devrait accuser une différence marquée.

Prélèvement d'échantillons de l'eau d'un puits de l'île Maurice en vue de l'analyse des isotopes de l'environnement.



L'analyse des échantillons d'eau a montré que la teneur en isotopes de l'eau des sources de Kalamos est analogue aux teneurs enrégistrées aux points les plus élevés du système du Parnasse, ce qui prouve que la zone d'alimentation est le système du Parnasse et non dans celui du Grammatikon. Les données isotopiques ont aussi permit de conclure que les eaux souterraines s'écoulent du Parnasse vers les régions voisines du Grammatikon et, à partir de là, dans la direction des sources de Kalamos.

Crète. (Grèce). Avant d'exploiter les eaux souterraines de couches aquifères calcaires, il faut souvent déterminer si les diverses masses d'eau d'un même secteur appartiennent ou non à un système commun. Ce problème fait l'objet d'une étude menée par l'Agence en Crète. A l'ouest d'Heraklion, se trouve la source d'Almyros; pendant les périodes de faible débit, cette source présente un certain degré de salinité dû à la pénetration d'eau de mer. On a creusé dans la région des puits expérimentaux avec l'intention d'y trouver des ressources supplémentaires pour l'industrie. L'eau des puits était aussi en partie saline, et la question à élucider était de savoir si cette eau venait du même système que celui qui alimente la source d'Almyros.

Dans le cas de la source d'Almyros, l'augmentation de salinité s'accompagne d'un enrichissement en oxygène 18 qui correspond tout à fait aux différences que l'on peut s'attendre à trouver dans des mélanges d'eau douce et d'eau de mer de proportions variables. Les échantillons prélevés dans les puits n'ont révélé aucune variation importante de la teneur en oxygène 18 en fonction du degré de salinité. Cela prouve que la salinité de l'eau des puits est due au mélange d'eau douce et d'eau saline provenant de la source et que l'eau douce des puits n'est pas la même que celle de la source d'Almyros, qui est alimentée à une altitude plus élevée.

Iles Canaries. (Espagne). L'Agence a procédé à des mesures isotopiques des eaux souterraines dans le cadre d'une étude patronnée par l'UNESCO et le PNUD sur les ressources en eau des Iles Canaries. La forte teneur en tritium des eaux souterraines de la partie centrale de la Grande Canarie montre que l'eau est d'origine récente. A Ténériffe, la teneur en tritium des eaux souterraines est faible, ce qui donne à penser que l'origine de l'eau actuellement exploitée date d'avant 1952.

République de Corée. L'analyse de la teneur en tritium et en isotopes stables des eaux de l'île volcanique de Cheju, a servi à déterminer l'époque et le lieu d'alimentation des eaux souterraines ainsi que la nature du mélange des diverses sources d'eaux souterraines et à estimer la durée de leur séjour. Après un échantillonnage préliminaire qui a porté sur 14 sources, 8 puits et 2 cours d'eau situés dans différentes parties de l'île, on a choisi 9 points d'échantillonnage périodique. Toutes les eaux prélevées contenaient des quantités non négligeables de tritium thermonucléaire, témoins d'une circulation rapide dans les divers systèmes aquifères souterrains. Les eaux ont été classées en un certain nombre de régimes d'écoulement, d'après leur contenu en tritium et en isotopes stables.