

EMPLOI DES RADIOISOTOPES EN HYDROLOGIE

Beaucoup de régions du monde manquent d'eau. Etant donné l'accroissement de la population et le développement des entreprises agricoles et industrielles, les besoins en eau augmentent rapidement; aussi de nombreux pays ont-ils élaboré des projets destinés à mettre en valeur leurs ressources hydrauliques. En fait, bon nombre des plans de développement économique en cours d'exécution risquent de ne pouvoir être menés à bien que si ces ressources sont utilisées d'une façon efficace et judicieuse. Ainsi, l'hydrologie est devenue une science d'une extrême importance pratique.

Cependant, les problèmes d'hydrologie ne se limitent pas à ceux que posent les besoins en eau. Le comportement de l'eau a des incidences considérables sur diverses activités agricoles et industrielles, telles que la construction d'un barrage ou d'une centrale hydraulique. C'est pourquoi les études hydrologiques revêtent de nombreux aspects et servent à de nombreuses fins, les techniques appliquées variant nécessairement d'un cas à l'autre.

Grâce à l'emploi des radioisotopes, ces techniques ont pu être étendues au cours de ces dernières années et, dans certains cas, sont devenues plus efficaces et plus précises. L'emploi des radioisotopes a aussi permis de mettre au point certaines techniques nouvelles pour l'étude des problèmes hydrologiques. Leur rôle peut être expliqué à l'aide de quelques exemples fort simples.

On peut utiliser les radioisotopes comme indicateurs, par exemple pour la mesure du débit dans les canalisations et les cours d'eau naturels et artificiels. Depuis bien longtemps, on se servait à cette fin de produits chimiques; cependant, les radioisotopes - dont l'emploi repose sur le même principe - sont beaucoup plus faciles à détecter et ont, de ce fait, rendu les mesures plus commodes et plus précises. D'autre part, on peut tirer parti des radio-indicateurs pour étudier l'envasement des cours d'eau, des estuaires et des ports; c'est ce qu'on fait d'ailleurs dans beaucoup de pays depuis plusieurs années. Pour l'étude des ressources hydrogéologiques, qui présentent une grande importance dans les régions arides ou semi-arides, l'emploi des radioisotopes offre des possibilités nouvelles, non seulement pour suivre le mouvement des eaux souterraines, mais encore pour évaluer le volume de nappes déterminées.

En hydrologie, les radioisotopes servent aussi à plusieurs autres usages et diverses applications

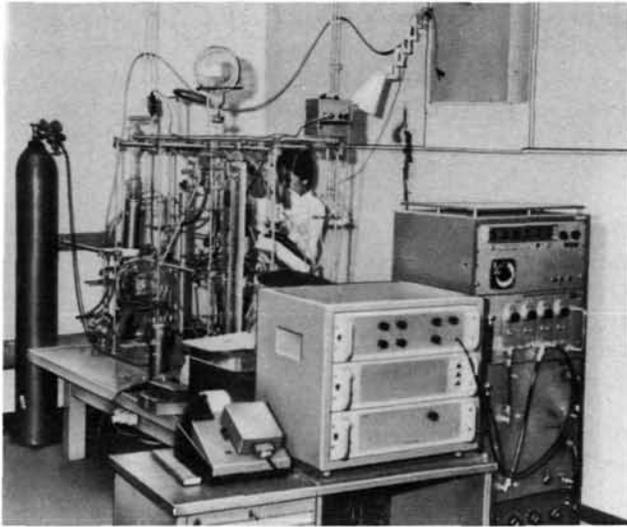
pourront encore être mises au point. Les emplois effectifs ou possibles des radioisotopes constituent un des principaux domaines scientifiques où l'Agence internationale de l'énergie atomique peut jouer un rôle utile; en fait, elle a, d'ores et déjà, commencé à mettre en oeuvre un vaste programme de travail à cet égard.

Mesures à l'aide du tritium

Un des premiers grands projets qui ait été entrepris par l'Agence est une étude sur la concentration des isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène dans l'eau. Ce projet vise à étudier le mode de circulation de la vapeur d'eau à l'échelle du globe et à mesurer la teneur de l'eau de pluie en tritium dans les différentes parties du monde, ce qui est nécessaire pour résoudre certains problèmes d'hydrologie locaux, en se fondant sur le tritium présent dans le milieu ambiant. Le tritium se forme dans la nature à la suite de certaines réactions provoquées dans l'atmosphère par les rayons cosmiques, et il est ramené au sol par les précipitations. Etant donné qu'il est possible de calculer la quantité de tritium normalement contenue dans l'eau à la suite de ce processus, l'absence de tritium ou sa présence à une concentration inférieure à la normale dans une masse d'eau donnée indiquerait que le tritium initial s'est désintégré et qu'il n'y a pas eu injection de tritium nouveau apporté par l'eau de pluie. En d'autres termes, il s'agirait d'une eau ancienne. Et comme on connaît la vitesse de désintégration du tritium (dont la période est de 12,5 ans), la mesure du tritium peut révéler l'âge d'un échantillon d'eau donné.

En plus du tritium naturel, une quantité considérable de tritium artificiel a pénétré dans l'atmosphère au cours des dernières années, à la suite des explosions thermonucléaires. Lors des essais de bombes à l'hydrogène, du tritium est libéré dans l'atmosphère et il s'introduit, également par l'intermédiaire des précipitations, dans les masses d'eau du globe. La présence ou l'absence de ce tritium peut aussi être utilisée pour la datation de l'eau, c'est-à-dire pour déterminer l'âge d'un échantillon donné.

On peut donc s'attendre que les mesures à l'aide du tritium fourniront des renseignements très utiles sur l'âge de différentes masses d'eau et sur le rythme auquel ces masses sont alimentées par les précipitations. Ces renseignements seraient très utiles pour l'élaboration des plans de mise en valeur des ressources hydrauliques, soit à des fins d'irrigation, soit à des fins industrielles.

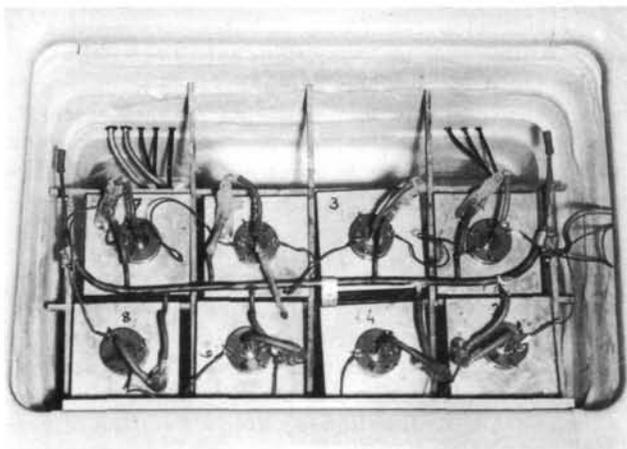


Comptage du tritium au Laboratoire de l'AIEA

L'enquête sur le tritium, que l'Agence a entreprise avec le concours de l'Organisation météorologique mondiale, a déjà fait d'excellents progrès. Tous les mois, une centaine de stations réparties dans le monde entier recueillent des échantillons d'eau de pluie; la concentration du tritium est ensuite déterminée par un certain nombre de laboratoires hautement spécialisés, ainsi que par celui de l'AIEA. L'Agence a fourni aux laboratoires des étalons de tritium pour favoriser l'exactitude des analyses.

Dans beaucoup d'expériences, le tritium est artificiellement ajouté à l'eau pour servir de radio-indicateur. L'eau tritiée, c'est-à-dire marquée au tritium, est un indicateur extrêmement précieux pour toute une série d'études hydrologiques. Ainsi, dans les régions où l'eau disparaît de la surface terrestre pour réapparaître ensuite en résurgence à une certaine distance, il est souvent nécessaire de savoir si une source donnée - ou un groupe de sources - est

Cellules d'électrolyse pour la concentration du tritium au Laboratoire de l'Agence



alimentée par telle ou telle eau, devenue souterraine. L'emploi du tritium comme indicateur permet de résoudre des problèmes de ce genre et de déterminer, par exemple, le débit et la direction de l'écoulement, ainsi que la quantité d'eau emmagasinée. Dans le cadre d'un projet financé par le Fonds spécial des Nations Unies, l'Agence a procédé en Grèce à une étude d'hydrogéologie à l'aide du tritium; les échantillons d'eau recueillis ont été analysés au Siège de l'Agence à Vienne, et l'on a pu, dès à présent, aboutir à certaines conclusions importantes.

L'Agence organise ou subventionne des projets analogues en octroyant des contrats de recherche. Aux termes d'un de ces contrats, des expériences dans lesquelles le tritium servait d'indicateur ont été effectuées dans la région de Trieste. Plusieurs autres contrats de recherche ayant trait à l'emploi des radioisotopes en hydrologie ont été passés avec des laboratoires ou des instituts scientifiques de plusieurs pays. L'intérêt croissant que suscitent les études de ce genre ressort du fait que les sommes affectées par l'Agence aux contrats de recherche portant sur l'emploi des radioisotopes en hydrologie, qui étaient de 30 000 dollars en 1962, s'élèvent cette année à environ 40 000 dollars.

En 1961, l'Agence a organisé une réunion internationale sur l'emploi du tritium en physique et en biologie.

Groupes d'étude

Pour aider à mettre au point son programme général relatif à l'emploi des radioisotopes en hydrologie, l'Agence a créé deux groupes d'étude, dont le premier s'est réuni en 1961 et le second en 1962. Lors de leurs réunions au Siège de l'Agence, à Vienne, les membres de ces groupes ont examiné tous les aspects essentiels de la question; ils ont fait le point de la situation et étudié les moyens qui permettraient d'améliorer et de développer les travaux actuels. A la suite des réunions du premier groupe, les experts ont estimé qu'il serait bon de récapituler les divers problèmes techniques examinés dans un rapport d'ensemble destiné à leur propre usage. On s'est rendu compte, par la suite, que le rapport - qui représentait la somme de l'expérience acquise par les spécialistes des radioisotopes, relativement peu au courant des questions d'hydrologie, et celle des hydrologistes ne s'intéressant pas directement à l'emploi des isotopes - présentait un intérêt beaucoup plus large. En conséquence, l'Agence vient de le publier dans sa collection "Rapports techniques".

Ce premier rapport traite les principaux sujets suivants : i) radioindicateurs employés en hydrologie, ii) isotopes stables employés en hydrologie, iii) détermination de l'âge des nappes d'eau souterraines à l'aide de radioisotopes, iv) emploi de la méthode des impulsions en hydrologie, v) méthodes ra-

diotopiques d'exploration des eaux souterraines, vi) mesures de débit, vii) emploi des radioisotopes pour la solution de problèmes d'hydraulique, viii) quelques problèmes d'hydrologie auxquels les méthodes isotopiques pourraient être appliquées. Sous chacune de ces rubriques sont d'abord posés les problèmes, puis résumés les renseignements fournis et les avis émis par les membres du groupe. Enfin sont formulées, pour chacun des sujets traités, certaines "conclusions et recommandations" qui font le point de la situation actuelle et esquissent l'orientation à donner aux travaux futurs. Le dernier chapitre du rapport traite de certains problèmes hydrologiques compliqués, à la solution desquels les méthodes isotopiques pourraient apporter une contribution très précieuse.

Une grande partie des travaux du premier groupe d'étude a consisté à procéder à un examen général des problèmes essentiels et des techniques que l'on applique ou que l'on pourrait appliquer pour les résoudre; le groupe a étudié les techniques isotopiques actuellement employées et la façon dont on pourrait les mettre au point pour s'attaquer aux problèmes hydrologiques. Le deuxième groupe, qui s'est réuni en décembre dernier, a insisté plutôt sur les applications pratiques, notamment sur les techniques utilisées dans l'étude des eaux souterraines.

Les experts ont estimé que l'hydrogéologie constituait le domaine où l'emploi des méthodes isotopiques était le plus prometteur. Ils ont cependant constaté que si, dans l'étude des eaux de surface, ces techniques sont suffisamment perfectionnées pour permettre aux hydrologistes de les utiliser aisément, on ne saurait en dire autant pour l'étude des eaux souterraines. Certains ont pensé qu'il pourrait être utile de rédiger des manuels qui exposeraient les techniques isotopiques applicables à l'hydrogéologie et étudieraient leurs possibilités d'application.

Le groupe a passé en revue les techniques actuellement connues et examiné les divers radioindicateurs qui pourraient servir à la datation des nappes d'eau souterraines. En dehors de l'emploi du tritium, il a étudié celui du carbone-14 (radiocarbone résultant de réactions provoquées par les rayons cosmiques dans l'atmosphère), du silicium-32 et du sodium-22, ainsi que l'utilisation de la radioactivité naturelle des isotopes de la série de l'uranium et de celle du thorium. Le groupe a également discuté de l'emploi des radioisotopes pour l'étude des eaux de surface, par exemple pour les mesures de débit. Il a aussi examiné la possibilité de se fonder sur la proportion d'isotopes stables dans l'eau pour certaines études hydrologiques; cette proportion variant avec l'altitude, on pourrait en tirer parti pour déterminer l'origine d'un échantillon d'eau.

La partie technique des délibérations du groupe figurera dans le deuxième rapport d'ensemble actuel-

lement en préparation. Pour ce qui est du rôle de l'Agence, le groupe a souligné qu'il était nécessaire d'intensifier les efforts pour encourager les applications des radioisotopes en hydrologie, notamment par la mise au point de techniques susceptibles d'un emploi courant.

Le colloque de Tokyo

Trois mois après la réunion du deuxième groupe d'étude, l'Agence a organisé un colloque international sur l'emploi des radioisotopes en hydrologie. A ce colloque, qui s'est réuni à Tokyo du 5 au 9 mars, assistaient une centaine de spécialistes venus de 14 pays (République fédérale d'Allemagne, Australie, Etats-Unis, France, Indonésie, Iran, Israël, Italie, Japon, Pays-Bas, Philippines, Royaume-Uni, Suède et Thaïlande). Y participaient également des représentants de la Commission économique pour l'Asie et l'Extrême-Orient (CEAEO), de l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), de l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI) et de l'Organisation météorologique mondiale (OMM).

Les participants ont présenté et discuté vingt-sept mémoires relatifs à l'emploi des techniques isotopiques pour la solution des problèmes d'hydrologie et d'hydrogéologie. Parmi les sujets étudiés figuraient notamment les mesures du débit fluvial, les processus de mélange dans les cours d'eau et les lacs, le débit solide et les phénomènes d'alluvionnement, la vitesse et la direction de l'écoulement des eaux souterraines, ainsi que l'âge et la vitesse de renouvellement des eaux souterraines.

Débit des cours d'eau et brassage

Deux spécialistes britanniques, G. C. Clayton et D. B. Smith, ont présenté un mémoire sur la comparaison de diverses méthodes radioisotopiques de mesure du débit fluvial. Les trois méthodes examinées - dilution, échantillonnage continu et comptage total - sont déjà d'un emploi courant pour la mesure du débit dans des canalisations, mais leur application au débit des rivières n'a pas encore fait ses preuves. Les auteurs décrivent les résultats obtenus à l'aide de ces méthodes lors de mesures faites dans un ruisseau et deux petits cours d'eau du Royaume-Uni.

Chacune des trois méthodes comporte l'introduction d'un indicateur radioactif en un certain point du cours d'eau et la mesure de l'activité de l'eau en un autre point situé en aval. Dans les méthodes de dilution et d'échantillonnage continu, on prélève des échantillons d'eau pour y mesurer leur teneur en radioisotopes et la comparer avec la concentration originale de l'indicateur; la différence est que dans la première on injecte l'indicateur selon un rythme connu et constant pendant un temps donné, alors que dans la deuxième on injecte en une seule fois et rapidement une quantité connue. Il y a aussi quelques différences

dans les techniques d'échantillonnage et de mesure. La troisième méthode est caractérisée par le fait qu'on place des compteurs dans le cours d'eau au point de contrôle, au lieu de prélever des échantillons.

Pour les trois méthodes, il est important de choisir correctement le point de contrôle. S'il est trop près du point où l'indicateur est introduit pour qu'un brassage latéral complet ait eu le temps de se faire, l'analyse des échantillons ne peut donner une mesure correcte du débit. En revanche, si le point de contrôle est trop éloigné, la dispersion est excessive et l'indicateur est trop dilué pour permettre des mesures optimums. En ce qui concerne le choix de l'indicateur, le principal facteur limitatif est l'adsorption possible du radioisotope par les matières en suspension dans l'eau ou constituant le lit du cours d'eau. L'adsorption est fonction à la fois du choix de l'indicateur et de la nature géologique du lit.

Après avoir discuté les diverses exigences techniques à la lumière de leurs expériences, MM. Clayton et Smith ont exprimé l'opinion que la méthode de l'échantillonnage continu est préférable aux deux autres, notamment à cause de sa commodité et de sa souplesse. Pour ce qui est des indicateurs, ils recommandent d'employer le sodium-24 et le brome-82, le phosphore-32 étant sujet à une forte adsorption. A beaucoup de points de vue, le tritium est idéal ; il n'est pas sujet à l'adsorption, d'activité spécifique élevée, on peut se le procurer sous forme d'eau tritiée et il ne coûte pas cher. Malgré sa longue période de radioactivité, c'est l'un des radioisotopes les moins toxiques. Il émet des particules bêta de faible énergie et par conséquent ne peut être mesuré avec précision qu'au moyen d'appareils de laboratoire spécialisés. De l'avis des deux auteurs, il ne doit être utilisé pour la mesure du débit des cours d'eau que lorsqu'on ne peut pas employer d'émetteurs gamma.

Un mémoire présenté par cinq spécialistes français (J. Guizerix et d'autres) décrivait des expériences d'application de la méthode du nombre total de coups pour la mesure du débit de rivières et de conduites forcées. Ils ont procédé par prélèvement d'une partie du courant au passage de la vague d'activité, à l'aide de jauges et cuves à niveau constant.

Des spécialistes britanniques et français ont aussi fait état d'expériences exécutées au moyen d'indicateurs radioactifs pour déterminer les processus de brassage dans des cours d'eau et des lacs. Parmi les études décrites figurent des mesures de radioactivité due à la retombée dans le lac de Genève et une étude des mouvements de l'eau dans une nappe souterraine naturelle soumise à l'influence des marées et partiellement salée. Cette dernière étude permettra aux ingénieurs de mettre au point une méthode pour extraire de l'eau potable de cette nappe.

Cinq spécialistes japonais (M. Kato et d'autres) ont présenté un mémoire sur des expériences faites à l'aide de sodium-24 sur le cours du Sorachi au Japon pour réunir des renseignements précis sur la vitesse et le régime d'écoulement de l'eau depuis la sortie d'un barrage à fins multiples. L'étude a donné des résultats qui seront précieux pour l'utilisation de l'eau aux fins d'irrigation.

Mouvement des sédiments

L'un des sujets les plus importants qui aient été examinés au cours du colloque est l'emploi des radio-indicateurs pour l'évaluation du débit solide et de l'alluvionnement des cours d'eau. Il y a une dizaine d'années qu'on a commencé à utiliser les radioisotopes pour étudier l'envasement des ports, des cours d'eau et des estuaires. On peut placer du sable marqué sur le lit de la rivière et en suivre le mouvement à l'aide de compteurs immergés, suspendus aux embarcations. Cependant, cette méthode ne donne qu'une indication purement qualitative sur le sort du sable marqué. Les études actuelles mettent l'accent sur l'aspect quantitatif du problème et visent à mesurer la quantité de sable qui a été transportée, par exemple, le long du lit du cours d'eau. Pour comprendre les services que peuvent rendre ces études, il suffit de songer, par exemple, au fait que la vitesse d'accumulation des alluvions au pied d'un barrage est un facteur qui limite la durée de vie de cet ouvrage.

Dans un mémoire présenté par G. H. Lean et M. J. Crickmore (Royaume-Uni) sont décrits certains efforts actuellement déployés pour mettre au point une méthode quantitative de mesure du mouvement du sable. Comme une des conditions essentielles, les auteurs font tout d'abord ressortir que l'indicateur choisi pour représenter le mouvement en cause doit se comporter de la même façon que le sédiment dans les processus hydrauliques. Certains chercheurs ont utilisé des particules de sable dont la surface avait adsorbé un radioisotope après séjour dans une solution radioactive. Cependant, étant donné que ce marquage superficiel risque beaucoup de disparaître par abrasion, on donne bien souvent la préférence - lorsqu'il s'agit d'expériences prolongées - aux particules de verre contenant un élément qui, sous irradiation, possède les propriétés radiologiques voulues.

D'après MM. Lean et Crickmore, il y a quatre méthodes principales qui permettent de mesurer, à l'aide d'indicateurs, les débits solides de charriage dans un chenal. On peut les appeler respectivement : méthode d'intégration dans l'espace, méthode d'intégration dans le temps, méthode du palier et méthode de la vitesse du "nuage". A l'exception de la première, ces méthodes sont également employées pour la mesure du débit liquide.

Dans la première méthode, l'échantillon est injecté en un point donné; après un laps de temps suffisant pour que les particules aient pu "oublier" leur situation de départ et se disperser dans l'ensemble du champ, on détermine la vitesse de leur centre de gravité par des mesures successives de leur concentration dans l'espace. Dans la deuxième méthode, la concentration est mesurée en un point fixe, situé suffisamment en aval pour que les conditions initiales de l'injection aient disparu et que les particules injectées aient pu reprendre la vitesse moyenne de déplacement des particules charriées. La méthode du palier est une variante de la deuxième méthode, l'injection étant continue à une vitesse constante. La méthode de la vitesse du "nuage" est essentiellement la même que la première méthode, mais lorsqu'on l'applique au débit liquide, on ne mesure généralement pas les distributions successives du diluant dans l'espace mais la durée moyenne de son passage d'un point à un autre.

Certaines des méthodes susmentionnées ont été essayées à l'aide de grains de sable de différentes dimensions dans un canal de laboratoire à lit de sable ridé. L'expérience a fait ressortir les énormes obstacles auxquels on se heurte lorsqu'on veut mesurer, à l'aide d'indicateurs, le débit solide de charriage des cours d'eau; bien qu'il soit possible d'appliquer les quatre méthodes, chacune d'elles présente des difficultés particulières. Il est probable que le choix de la méthode - ou des méthodes appliquées conjointement - dépendra dans une large mesure des exigences et des caractéristiques d'une situation déterminée.

Certaines méthodes permettant de mesurer le débit solide de charriage ont été exposées dans un mémoire de J. E. Chabert et d'autres (France). Ils signalent que les premiers essais, de caractère purement qualitatif, ont été faits sur le Niger au Mali et sur la Loire en France. Il s'agissait d'obtenir des indications sur l'évolution des zones de charriage en fonction des débits liquides, sur la formation de seuils et sur la vitesse d'avancement des dunes. Par la suite, on a cherché à mettre au point des méthodes quantitatives permettant de déterminer d'une façon précise les quantités de sédiments transportés par charriage; des expériences ont été faites sur le Rhône et sur la Loire.

Contribution à l'étude des eaux souterraines

Le rôle des méthodes radioisotopiques dans l'étude des eaux souterraines a été examiné dans un mémoire présenté par quatre spécialistes israéliens (Y. Harpaz et d'autres). Ceux-ci ont établi un classement des différentes techniques isotopiques; ils les ont comparées aux méthodes classiques et démontré que, dans certains cas, les premières non seulement pourraient avantageusement remplacer certaines des méthodes existantes, mais aussi permettraient d'ap-

porter des solutions plus immédiates à certains problèmes d'hydrologie.

Les diverses techniques peuvent être classées, soit d'après les radioisotopes utilisés, soit d'après les principes d'application. On utilise surtout à l'heure actuelle :

- a) certains isotopes stables contenus dans l'eau, tels que l'hydrogène lourd (deutérium) et l'oxygène-18;
- b) le tritium;
- c) d'autres radioisotopes formés dans l'atmosphère et qui ont pénétré dans l'eau à la suite de processus naturels;
- d) les radioisotopes, existant à l'état naturel, de la série de l'uranium ou de celle du thorium;
- e) les radioisotopes injectés artificiellement (autres que le tritium).

Pour ce qui est des principes d'application, on peut répartir les méthodes en trois catégories : datation, méthode des indicateurs et analyse isotopique. Les méthodes de datation, qui se fondent sur le phénomène très particulier de la désintégration radioactive, consistent à faire des mesures comparées du changement que la radioactivité spécifique d'un isotope subit entre le point d'injection et le point de contrôle. Le point d'injection peut être une zone où une nappe d'eau souterraine est réapprovisionnée par la pluie, ou le point de passage à une nappe adjacente. L'isotope qui jusqu'ici s'est révélé le plus utile pour la datation des eaux souterraines est le tritium provenant des rayons cosmiques, qui marque la pluie à raison d'une teneur qui est caractéristique d'une localité déterminée. D'autres isotopes, tels que le carbone-14, ont également été envisagés comme moyens de datation des eaux souterraines. La méthode des indicateurs repose sur la modification de la concentration d'un isotope entre le point et le moment de l'injection et le point et le moment de la mesure. Quant à l'analyse isotopique, elle consiste à faire le rapport entre la concentration d'un élément identifiable d'une masse d'eau et la concentration caractéristique de cet élément dans une certaine source. On peut utiliser à cet effet tout élément constitutif de l'eau qui soit caractéristique et identifiable, tel qu'un sel dissous, un élément présent à l'état de traces, un isotope stable de l'oxygène et de l'hydrogène, ainsi qu'un isotope radioactif servant à la datation.

En ce qui concerne la contribution que ces méthodes apportent à la recherche hydrologique, on peut dire que :

- a) les moyens d'analyse nucléaire, tels que l'analyse par activation des substances présentes à l'état de traces dans l'eau ou

dans les roches, et le sondage au moyen des neutrons ou des rayons gamma, ont complété utilement les méthodes de recherche classiques ;

- b) les isotopes ont permis d'ajouter une méthode nouvelle - la datation - aux méthodes de recherche appliquées par les hydrologistes, et ils ont ouvert des possibilités nouvelles concernant les techniques des indicateurs ;
- c) dans beaucoup de cas, les trois principales méthodes isotopiques ont permis de résoudre directement des problèmes technologiques sans exiger une étude hydrodynamique complète du système considéré.

Ce qui vient d'être dit peut être illustré par quelques exemples. Lorsqu'il s'agit de déterminer l'existence et l'étendue de nappes d'eau souterraines, les méthodes habituelles de dépistage par forage ou prospection géophysique détaillée sont lentes et coûteuses ; les méthodes isotopiques peuvent donc présenter des avantages au stade de l'enquête préliminaire. La datation et l'analyse isotopique peuvent, elles aussi, aider à déceler l'origine d'une masse d'eau. Parmi d'autres applications utiles, on peut signaler la détermination des interconnexions entre une source et une nappe d'eau contiguë, l'évaluation de la dispersion d'une nappe d'eau se déplaçant dans un milieu poreux et la mesure de la direction et de la vitesse de l'écoulement dans une nappe.

Presque toutes ces applications supposent l'emploi d'isotopes comme indicateurs et cet emploi présente de nombreux avantages. Outre qu'il existe des isotopes dotés de propriétés chimiques et radioactives différentes convenant à chaque situation particulière, et que l'on dispose, pour les identifier, de méthodes de détection extrêmement sensibles, le phénomène de la désintégration radioactive dans le temps pourvoit tous les radioisotopes d'une mémoire, de sorte qu'une opération de mesure unique peut remplacer des observations hydrologiques multiples pendant des périodes considérables. Un autre avantage résulte du fait que le tritium, l'hydrogène lourd et l'oxygène-18, étant des isotopes d'éléments constitutifs de l'eau, sont des indicateurs idéaux permettant d'identifier des nappes aquifères sans les perturber.

En résumé, on peut dire que les isotopes ne contribuent que dans une mesure limitée à la détermination des paramètres hydrauliques ; que, néanmoins, ce sont les méthodes des indicateurs en général et celles des radioindicateurs en particulier qui permettent de déterminer de la façon la plus directe les caractéristiques du mouvement des eaux ; enfin, que seuls les radioindicateurs permettent d'évaluer les caractéristiques pour l'étude desquelles il est nécessaire de suivre l'itinéraire effectif des particu-

les d'eau. Ce dernier aspect étant particulièrement important lorsqu'on étudie le traitement des déchets et l'amélioration de la qualité de l'eau, il est évident que les méthodes isotopiques peuvent contribuer d'une façon notable à la solution de ces problèmes.

Quelques applications en hydrogéologie

R. W. Nelson et A. E. Reisenauer (Etats-Unis), dans un mémoire sur l'utilisation des radioindicateurs en hydrogéologie, ont fait ressortir que les substances radioactives sont non seulement d'une aide précieuse dans les études classiques sur le mouvement des eaux souterraines, mais pourraient aussi rendre des services dans les analyses détaillées et précises de réseaux hydrographiques souterrains. Bien que, dans l'immédiat, des études de ce genre ne semblent guère requises que dans certaines situations particulières (par exemple, pour ce qui est de l'élimination des déchets radioactifs), où il est souhaitable de connaître assez exactement le temps de déplacement, il se peut que, dans l'avenir, elles puissent trouver de nombreuses autres applications.

C. W. Theis, autre spécialiste américain, a fait valoir que l'emploi des indicateurs permet d'aborder directement les problèmes de mouvement des contaminants dans les eaux souterraines et qu'il constitue probablement la méthode la plus efficace pour les études de diffusion dans les sols en place. Il a cependant constaté qu'ils ne permettaient pas de résoudre ces problèmes en l'absence des données hydrologiques voulues.

H. Moser et F. Neumaier (République fédérale d'Allemagne) ont souligné l'importance que revêt la vitesse de filtration dans les études hydrogéologiques et exposé les méthodes isotopiques permettant de la mesurer. Ils montrent comment on peut utiliser les radioindicateurs pour déterminer le cheminement et le débit des suintements sous les barrages de retenue.

L'utilisation du tritium pour les études d'hydrogéologie effectuées en Grèce avec le concours de l'AIEA a été exposée dans un mémoire rédigé par l'équipe internationale de spécialistes qui avaient été chargés de ces travaux (D. J. Burdon et collaborateurs). Ces travaux visent à essayer et mettre au point des méthodes d'exploitation des eaux souterraines dans un terrain calcaire. Une des zones étudiées est située entre le haut plateau de Tripolis, d'une part, et la plaine et le golfe d'Argos dans le Péloponnèse, d'autre part. Les eaux de ruissellement s'infiltrent dans le sol par plusieurs entonnoirs et il existe diverses sources près de la côte, à une trentaine de kilomètres de distance.

Pour utiliser les eaux souterraines et, si possible, intercepter celle qui disparaît dans la mer, on avait besoin de renseignements sur les points ci-après :

- a) quels sont les entonnoirs qui alimentent telle source ou tel groupe de sources ;
- b) quelle est la durée de séjour des eaux souterraines entre les entonnoirs et les sources ;
- c) quelle est la quantité d'eau souterraine accumulée entre les entonnoirs et les sources.

Pour cette étude, c'est le tritium qui a servi d'indicateur : en mars 1961, on a introduit dans un des principaux entonnoirs 1 000 curies d'eau tritiée. On a recueilli des échantillons d'eau provenant des sources, dont la teneur en tritium a été analysée au Laboratoire de l'Agence, à Vienne, dans un spectromètre à scintillations à liquide. Dans l'eau provenant de l'une des sources, on a trouvé du tritium, ce qui a permis de conclure à l'existence d'une voie de communication entre l'entonnoir et la source. La quantité de tritium trouvée dans les échantillons et le laps de temps pendant lequel cette substance est apparue ont également servi d'indication pour déterminer provisoirement la quantité d'eau accumulée et la durée de son séjour sous terre. Dans une deuxième expérience faite en février 1962, on a ajouté 400 curies d'eau tritiée à l'eau qui disparaissait dans un autre entonnoir. Après sept jours, le tritium a fait son apparition dans une des sources de la côte. La teneur en tritium de l'eau de source a atteint sa concentration maximum le jour suivant; neuf jours après sa première apparition, on n'a plus détecté de tritium et, jusqu'à présent, on n'en a trouvé dans aucun des autres points où l'on avait prélevé des échantillons. Ici encore, on a tiré certaines conclusions provisoires sur la quantité d'eau accumulée entre l'entonnoir et la source, ainsi que sur le temps et la vitesse d'écoulement.

En ce qui concerne la mesure de l'âge et du renouvellement des eaux souterraines, plusieurs mémoires ont été présentés sur l'emploi du tritium et du carbone-14. J. C. Vogel (Pays-Bas) et D. Ehhalt (République fédérale d'Allemagne) ont estimé qu'étant donné le mouvement extrêmement lent et les temps

d'accumulation prolongés des eaux souterraines, le carbone-14 (dont la période est de 5 700 ans) était un instrument de recherche particulièrement intéressant. Ce radioisotope est présent dans les eaux souterraines sous forme de bicarbonate en solution et, sous réserve de certaines conditions, il pourrait servir à déterminer des temps de séjour allant jusqu'à environ 40 000 ans.

Dans un autre mémoire, J. C. Vogel et d'autres ont communiqué les résultats d'une enquête préliminaire entreprise en Afrique du Sud sur les isotopes contenus dans l'eau douce. Vu le climat semi-aride de ce pays, la composition isotopique de la pluie, des cours d'eau de surface et des eaux souterraines y est sensiblement différente de celle qu'on trouve en Europe et aux Etats-Unis. L'analyse de quelques échantillons d'eaux souterraines prélevés dans le Kalahari n'ayant pas révélé l'existence de quantités notables de tritium, on en a conclu que l'eau dans laquelle les échantillons avaient été prélevés devait être âgée de plus de 40 ans. Un des échantillons contenait du tritium, ce qui signifie que l'eau de la nappe a un âge moyen d'une trentaine d'années ou bien qu'une petite quantité de tritium résultant d'essais thermonucléaires a pénétré dans l'eau.

Quelques applications diverses ont été examinées à la dernière séance du colloque. Il s'agissait notamment d'enquêtes hydrologiques faites à l'aide de radiostrontium et de radiocésium provenant des retombées radioactives.

Dans son allocution de clôture, le Directeur général de l'Agence, M. Eklund, a souligné l'importance du rôle que les techniques isotopiques jouent dans les études d'hydrologie; la réunion, a-t-il dit, a démontré que la gamme d'applications de ces techniques aux problèmes d'hydrologie est appelée à s'accroître considérablement dans les années à venir. Il a suggéré aux gouvernements d'envisager l'emploi de ces techniques lorsqu'ils élaborent leurs projets relatifs à l'étude ou à l'utilisation de leurs ressources en eau.