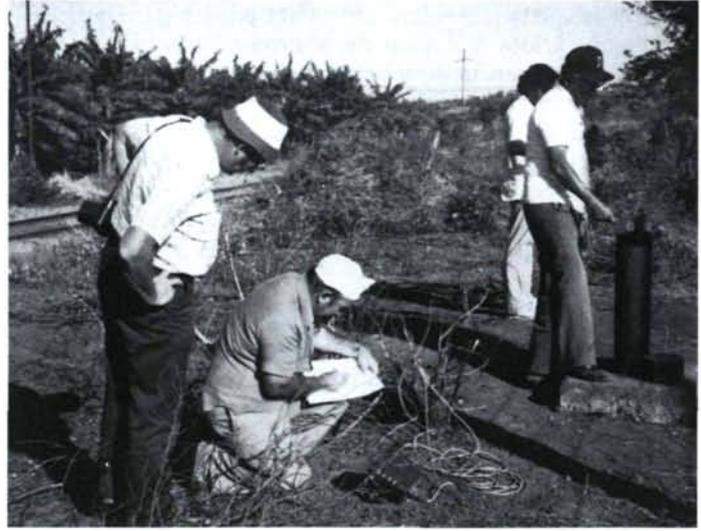


# Les radio-isotopes artificiels en hydrologie

*Quelques applications particulières*

par Antonio Plata-Bedmar



Les radionucléides artificiels sont utilisés depuis plus de trente ans pour l'étude des problèmes hydrologiques. Pendant tout ce temps s'est accumulé un important bagage de connaissances et de documentation, et l'on dispose maintenant d'éléments suffisants pour juger de l'apport réel de ces techniques et de leurs possibilités d'avenir. Les problèmes hydrologiques sont souvent très complexes et plusieurs approches sont nécessaires pour les élucider. Aucune des méthodes disponibles ne doit être écartée *a priori*; cela vaut aussi pour les techniques radio-isotopiques, car elles jouent en l'occurrence un rôle complémentaire mais important.

En hydrologie, les radio-isotopes sont utilisés de deux manières: sous forme de sources scellées ou comme indicateurs.

## Sources radioactives scellées

Divers instruments de mesure munis de sources radioactives scellées ont été mis au point pour l'étude de conditions hydrologiques spécifiques. Ces instruments fonctionnent selon le principe de l'interaction des rayonnements et de la matière, phénomène dont on peut tirer des renseignements sur les milieux solides associés aux masses d'eau en mouvement. Nous allons examiner quelques-unes de ces méthodes, parmi les plus importantes.

● **Mesure de la concentration des sédiments en suspension dans les cours d'eau.** Cette charge représente plus de 75% du débit solide d'un cours d'eau et peut poser des problèmes économiques sérieux lorsqu'il s'agit, par exemple, de la durée utile d'un bassin de retenue. Les méthodes classiques connues ne donnent pas de résultats satisfaisants. Plusieurs sortes de jauges nucléaires à l'américium 241 et au césium 137 ont été

réalisées; il existe des jauges fixes qui enregistrent automatiquement la concentration des sédiments sur de longues périodes et des jauges portatives pour les mesures ponctuelles. Il y aurait lieu de perfectionner les premières afin d'en améliorer la performance et la fiabilité et d'en abaisser le coût.

● **Mesure de l'épaisseur et de la densité des couches de dépôts sédimentaires.** L'utilité de cette application est de faciliter l'entretien des chenaux dans les ports et les estuaires (dragage) et de suivre le colmatage des bassins de retenue, notamment en zones arides et tropicales où le débit solide des cours d'eau est le plus élevé. Aucune autre méthode ne permet d'obtenir l'information nécessaire.

Certaines jauges nucléaires existant sur le marché fournissent des profils de densité des couches de sédiments, dont les variations dans le temps renseignent sur la dynamique du dépôt. Ici encore, quelques perfectionnements pourraient améliorer les techniques de mesure dans les conditions généralement défavorables des opérations.

● **Analyse des sédiments par fluorescence X.** Des sources de rayons gamma sont employées pour susciter l'émission de rayons X caractéristiques par les éléments lourds ( $Z > 20$ ) contenus dans les échantillons de sédiments. On peut ainsi identifier ces éléments et les analyser semi-quantitativement. En combinant cette technique avec d'autres méthodes d'analyse, telle l'analyse par activation, il est possible de déterminer l'origine des sédiments charriés par un cours d'eau.

● **Radiocarottage.** Le carottage gamma *in situ* est une méthode très largement utilisée aujourd'hui dans les études hydrologiques et géologiques. Il permet de situer les couches d'argile, ce qui est très important quand on veut déterminer les profils de perméabilité d'une formation alluviale ou colluviale aquifère ou repérer les fractures comblées d'argile dans une formation aquifère de roches fracturées. Par ailleurs, les techniques neutron-neutron et gamma-gamma sont surtout

M. Plata-Bedmar est membre de la Division des sciences physiques et chimiques de l'AIEA.

Photo ci-dessus: mesure du débit de la nappe souterraine, au Nicaragua: la méthode par dilution est ici utilisée.

employées lorsqu'il s'agit d'irrigation, pour étudier les phénomènes d'infiltration au niveau de la zone non saturée, lesquels présentent un intérêt particulier dans les régions arides. La méthode neutron-neutron donne les profils de la teneur du sol en eau, qui correspond aux profils de porosité de la zone saturée. La méthode gamma-gamma donne, elle, les profils de densité humide de la formation, dont on peut déduire la porosité de la zone saturée. La nécessité de trous de sonde spécialement équipés limite considérablement l'emploi de ces méthodes en hydrologie.

### Radio-indicateurs

Dans tous les pays du monde se présentent des problèmes hydrologiques dont la plupart ne peuvent être étudiés qu'à l'aide de techniques de marquage radio-isotopique, essentiellement à cause de la grande variabilité, dans le temps et dans l'espace, des paramètres du système hydrologique à étudier. Il est souvent difficile, dans ces conditions, de faire une évaluation fiable de ces paramètres, responsables du comportement de l'eau dans le système, alors qu'on a justement besoin dans ce

cas d'une information précise. Seuls les indicateurs radioactifs peuvent aider à résoudre cette difficulté.

● **Marquage des sédiments.** L'étude du transport des sédiments à l'aide d'un marquage radioactif est aujourd'hui une technique apparemment très au point. Il est facile de marquer les sédiments en suspension avec de l'or 198, du fer 59 ou du hafnium 181 pour étudier la façon dont ils se déposent sur les fonds. Cette méthode convient bien à l'étude de l'envasement des zones portuaires, des estuaires, des bassins de retenue et des bassins d'infiltration servant à l'alimentation artificielle des couches aquifères.

On possède maintenant une grande expérience de l'emploi des radio-indicateurs artificiels dans l'étude du charriage de fond dans les cours d'eau et la mer. Les sédiments peuvent être marqués à l'aide des radionucléides suivants: scandium 46, lanthane-barium 14, argent 110m, or 198, iridium 192 et zirconium-néodyme 95. Quand il s'agit de sédiments fins, on utilise généralement du verre marqué au scandium 46.

On peut ainsi obtenir des renseignements qualitatifs et quantitatifs et déterminer la masse des sédiments

### Quelques applications spécifiques des indicateurs

Les indicateurs radioactifs artificiels, dont plusieurs applications parmi les plus importantes sont brièvement décrites ci-après, doivent souvent être utilisés en combinaison avec d'autres moyens (isotopes naturels présents dans l'environnement, hydrochimie et autres techniques hydrologiques classiques) si l'on veut obtenir tous les renseignements dont on a besoin.

#### Hydrologie de surface

- Mesure du débit des cours d'eau et des canaux à ciel ouvert. Seuls les indicateurs peuvent renseigner sur la plupart des aspects de ce paramètre. Les radio-indicateurs sont surtout utilisés pour mesurer les gros débits, entre 50 et 1000 m<sup>3</sup>/seconde, tandis que les isotopes stables sont mieux adaptés à la mesure des faibles débits. Le réglage des turbines de centrales hydro-électriques et l'étalonnage des jauges des stations de mesure sur les cours d'eau sont deux applications particulièrement intéressantes.
- Etude de la dispersion dans les cours d'eau, lacs, estuaires, mers et océans dans le contexte des problèmes de pollution. Les coefficients de dispersion ainsi obtenus sont souvent utilisés pour mettre au point des modèles mathématiques ou hydrauliques.
- Mesure des temps de séjour et des composantes du mélange des eaux de lacs.
- Dynamique des bassins fluviaux. Détermination des temps de transit des eaux. Les indicateurs naturels (par exemple, les isotopes stables des éléments constitutifs de l'eau) peuvent être utiles pour ces études.
- Problèmes posés par les réseaux d'irrigation: fuites des canaux; repérage et évaluation de l'écoulement de retour; apports partiels d'eaux de diverses origines.
- Marquage des eaux polluées pour l'étude du pouvoir d'auto-épuration de diverses masses d'eau de surface.
- Connection avec les eaux souterraines (fuites des masses d'eau de surface). Les isotopes du milieu sont également très utiles.

#### Hydrologie souterraine

- Etude de l'infiltration dans la zone non saturée. Le tritium artificiel est la seule option. L'information est donnée par les profils verticaux du tritium injecté et mesuré à différents intervalles.
- Détermination des paramètres des nappes aquifères par des techniques isotopiques à un ou plusieurs puits, avec la mesure de la vitesse d'écoulement par des méthodes fondées sur la dilution ponctuelle et le temps de transit; détection et mesure des courants verticaux dans les puits; détermination de la direction de l'écoulement des eaux souterraines; détermination de la porosité et de la perméabilité effectives, notamment en procédant à des pompages; évaluation des coefficients de dispersion des nappes aquifères; étude de la distribution des fractures (profils verticaux) dans les formations aquifères.
- Etude de la dynamique des systèmes karstiques.
- De nombreux problèmes locaux ou régionaux propres à ces systèmes ne peuvent être résolus que grâce aux indicateurs artificiels. En général, l'indicateur est injecté en un point déterminé du système et l'on place des détecteurs aux endroits où l'on suppose qu'il doit apparaître. De nombreuses études de ce genre ont été faites au cours des trente dernières années à l'aide de traceurs fluorescents et radioactifs. On peut ainsi connaître le réseau d'écoulement et obtenir des renseignements semi-quantitatifs sur le volume de la masse d'eau souterraine.
- Marquage des fluides géothermiques réinjectés dans les champs géothermiques, après leur exploitation, afin de déterminer leur destination.
- Marquage de l'eau injectée dans les nappes aquifères pour leur alimentation artificielle, afin d'en connaître le comportement dynamique, en particulier la façon dont elle se mélange avec l'eau préexistante. Cette technique permet en outre de se renseigner sur l'évolution chimique de l'eau injectée (ce qui est important s'il s'agit d'eaux usées) et de déterminer certains paramètres hydrologiques de la nappe (porosité totale, débit et pouvoir de dispersion).



Repérage des fuites du barrage de Maguaca, en République Dominicaine.

charriés dans le lit des cours d'eau, bien que la granulométrie très variable de ces sédiments rende l'opération quelque peu difficile. En milieu marin, la méthode est mieux adaptée à l'étude de problèmes localisés, par exemple dans le cadre d'opérations de dragage (évaluation de sites d'immersion), ou pour la protection des plages.

● **Marquage des eaux.** Nombre de traceurs artificiels non radioactifs sont utilisés depuis plus de 2000 ans pour étudier l'écoulement des eaux et, plus récemment, s'y sont ajoutés des produits fluorescents, des teintures et d'autres substances, moins fréquemment utilisées, tels certains composés sous forme ionique, les spores de lycopode et quelques bactéries. Depuis une trentaine d'années, on emploie aussi des radionucléides artificiels dont les plus importants sont l'iode 131, le brome 82, le chrome 51, le cobalt 58, l'or 198 et le tritium.

Les indicateurs radioactifs, comparés aux non-radioactifs, présentent les avantages suivants: durée de vie limitée (aucune contamination permanente des eaux), détection *in situ* des émetteurs gamma (indispensable dans certains cas), grand pouvoir de marquage (de petites quantités d'indicateur suffisent pour marquer de grandes masses d'eau), et meilleure stabilité (utilisation possible dans des eaux très polluées ou contenant une forte charge de sédiments).

Ils ne sont cependant pas sans inconvénients: leur emploi doit être autorisé; il est parfois difficile de se les procurer au moment voulu (les radionucléides de courte période doivent être employés immédiatement), et leur manipulation n'est pas sans risques.

Le tritium mérite une mention spéciale car c'est le seul radio-indicateur artificiel applicable à l'eau du fait qu'il s'incorpore à la molécule. Il n'y a donc pas d'autre choix pour de nombreuses opérations, malgré sa longue période (12,43 ans) et sa qualité d'émetteur bêta pur (qui ne permet pas de le détecter *in situ*). S'il s'agit d'étudier l'écoulement d'une eau souterraine, c'est le seul qui se

comporte exactement comme l'eau et fournisse une information quantitative fiable. En outre, le tritium artificiel est peu onéreux, il est facile à manipuler car il ne présente pratiquement aucun risque et peut être détecté à la concentration de 0,2 microcurie/m<sup>3</sup> (qui peut descendre à 0,003 microcurie si l'on procède à un enrichissement électrolytique).

#### Applications courantes

Deux caractéristiques importantes des techniques fondées sur les indicateurs artificiels déterminent le choix des problèmes auxquels on peut appliquer ces techniques, à savoir: (1) le volume d'eau que l'on peut marquer est limité et n'est souvent qu'une petite fraction du volume total du système étudié; (2) le temps disponible pour l'opération est généralement assez court et dépend le plus souvent de la dynamique du système; il est extrêmement rare qu'une étude dure plus d'un an.

C'est pourquoi les indicateurs artificiels sont le plus fréquemment appliqués à l'étude des problèmes suivants:

- systèmes à circulation rapide, tels que la plupart des réseaux hydrologiques de surface et bon nombre de formations de roches fracturées aquifères;
- problèmes localisés dans un périmètre restreint (quelques kilomètres carrés au plus), dont la solution exige des données hydrologiques très complètes et précises. C'est souvent le cas lors de travaux de génie civil;
- expériences ponctuelles sur de grandes masses d'eau en vue d'obtenir des indications générales sur l'ensemble du système après intégration des données partielles.

#### Génie civil

Les radio-indicateurs artificiels sont très utiles pour l'étude de nombreux problèmes de génie civil ayant un rapport avec l'eau. Dans les cas où il faut recourir à

plusieurs techniques, une étude globale s'impose. Un des meilleurs exemples est le problème des fuites des bassins de retenue et des lacs. Plusieurs méthodes ont été mises au point pour le résoudre, notamment celles-ci: détermination des connections entre la retenue et les résurgences en aval; injection d'indicateurs au niveau des fonds pour repérer les zones d'infiltration; localisation de ces zones à l'aide d'instruments indiquant la direction des courants; mesure directe du taux ponctuel d'infiltration au fond des retenues; techniques à puits unique pour déterminer l'écoulement d'une eau souterraine à travers les formations adjacentes.

Les radio-indicateurs artificiels peuvent aussi servir à l'étude des risques de fuites sur le site d'un futur barrage, ou à d'autres études analogues liées à la construction de tunnels ou à l'établissement des fondations de grands bâtiments et de ponts.

### **Mines inondées**

Dans le passé, maintes études ont été faites avec toutes sortes de traceurs artificiels pour tenter de déterminer l'origine et le parcours des eaux qui envahissent les mines. Il s'agit généralement d'études intégrées faisant appel à plusieurs techniques dont les indicateurs artificiels sont encore les protagonistes, mais associés cette fois aux isotopes naturels, en particulier lorsqu'on suppose que l'eau a plusieurs origines. Il y a souvent lieu de rechercher la connection entre les masses d'eau de surface et l'eau présente dans la mine. Dans d'autres cas, on cherche plutôt à repérer le cheminement de l'eau jusqu'à la mine pour éventuellement la pomper avant qu'elle n'y parvienne.

### **Activités de l'AIEA**

Il y a longtemps déjà que l'AIEA s'occupe de promouvoir et d'assister l'application des techniques nucléaires en hydrologie. Au cours des trente dernières années, elle a patronné de nombreux projets de coopéra-

tion technique et maints contrats de recherche dans presque tous les domaines dont on vient de parler.

Actuellement, l'AIEA participe à l'exécution de plusieurs études à l'aide de radio-isotopes artificiels: pollution des eaux d'un lac, au Guatemala; eau d'irrigation, en Roumanie; transport et dépôt des sédiments, en Asie du Sud-Est et au Brésil; fuites de lacs et de barrages, au Chili et en République Dominicaine; inondation de mines et pollution d'eaux souterraines, au Nicaragua; pouvoir de dispersion des courants d'un estuaire et pollution des eaux, en Argentine (services consultatifs seulement).

### **L'avenir de ces techniques**

L'expérience acquise depuis les débuts de l'AIEA montre que l'emploi des radionucléides artificiels en hydrologie présente de grands avantages. Malheureusement, il rencontre des difficultés dues aux restrictions que de nombreux pays imposent à l'usage des matières radioactives, et demeure généralement le privilège d'organismes spécialisés dans le nucléaire, sans qu'il soit possible de transférer la technologie aux établissements qui s'occupent directement des questions d'hydrologie. De surcroît, la collaboration entre ces deux sortes d'organisations n'est pas toujours satisfaisante. Dans certains pays même, l'emploi de radionucléides artificiels en hydrologie est formellement interdit.

D'un autre côté, l'expérience montre bien que cette technologie n'implique généralement pas de risque, ou fort peu, pour la population. Il existe néanmoins maintes réglementations nationales qui imposent des restrictions excessives, car elles tiennent essentiellement compte d'autres activités nucléaires qui comportent beaucoup plus de risques. On contribuerait beaucoup au développement futur de l'hydrologie isotopique en promulguant une réglementation spéciale sur l'emploi des radio-isotopes dans l'environnement qui se fonderait sur une évaluation des risques réels.

