

Techniques nucléaires et migration des polluants dans les eaux souterraines

*Quelques exemples de leur application pratique
à la protection des ressources d'eau contre la pollution*

par V.T. Dubinchuk, A. Plata-Bedmar, et K. Froehlich

La protection des eaux souterraines contre la pollution est une priorité depuis quelques années.

Ces eaux sont généralement plus pures et plus saines que les eaux superficielles, car elles sont naturellement protégées par le système filtrant très efficace que constituent le sol, les argiles et les particules rocheuses qui ont la propriété de retenir certaines substances solubles, les particules en suspension, les bactéries et, dans une large mesure aussi, les virus.

Cela dit, si ce complexe filtrant est saturé ou contourné, la nappe aquifère elle-même risque d'être contaminée. Les polluants des eaux superficielles — ordures ménagères et déchets industriels, infiltrations provenant des fosses septiques, drainage des mines, remblayages sanitaires et produits agrochimiques — ont un effet encore plus marqué et de plus longue durée lorsqu'ils atteignent les eaux souterraines. La pollution qui pénètre dans une couche aquifère peut y être retenue pendant des périodes qui vont de quelques siècles à des dizaines de millénaires, compromettant ainsi les ressources d'eau des générations futures.

Dans certaines régions, les eaux souterraines sont moins exposées à la contamination que dans d'autres, lorsque les conditions géologiques et hydrochimiques limitent le risque. On appelle «vulnérabilité» la sensibilité de la qualité des eaux souterraines aux activités humaines responsables de la pollution. Divers processus, ainsi que les propriétés du sol et de la couche aquifère, sont des facteurs déterminants de cette vulnérabilité. Pour modéliser et prévoir la migration des polluants dans les réseaux hydrologiques souterrains, il est indispensable de définir les paramètres qui caractérisent ces processus. Les principaux objectifs sont la prévention de la pollution et de la détérioration des ressources d'eaux souterraines ou, si la contamination s'est déjà installée, la détermination de son origine afin de proposer des solutions pour y remédier.

L'AIEA s'occupe tout spécialement des applications pratiques des techniques nucléaires et isotopiques qui peuvent contribuer directement ou indirectement à la solution des problèmes que pose la pollution des eaux souterraines. Nous allons voir comment certaines de ces techniques ont été mises en pratique.

Migration des polluants

La mince couche géologique que traversent les polluants quand ils migrent de la surface vers les nappes d'eaux souterraines peu profondes est une zone non saturée. La vitesse à laquelle les eaux et les polluants se déplacent dans le sol se mesure avec des appareils spéciaux. Plusieurs études ont été faites, ou sont en cours, à l'aide de ces instruments et d'indicateurs isotopiques, dans le cadre de divers programmes nationaux et internationaux, dont ceux patronnés par l'AIEA.

En Crimée, par exemple, la salinisation des eaux souterraines a été étudiée en 1985-1986 et, dans la région de Tchernobyl, on cherche à déterminer la migration des radionucléides rejetés par la centrale nucléaire accidentée en 1986*.

Dans les deux cas, plusieurs sites ont été aménagés en vue des opérations complexes à mener à l'aide des traceurs isotopiques. Il s'agissait en particulier d'injecter de l'eau tritiée dans le sol pour étudier sa redistribution dans l'espace et le temps afin de déterminer la vitesse de déplacement de l'eau dans la zone non saturée ainsi que le temps de séjour et le renouvellement des eaux souterraines des nappes peu profondes. Parallèlement, des polluants marqués à l'aide d'isotopes ont été injectés et leurs mouvements ont été observés.

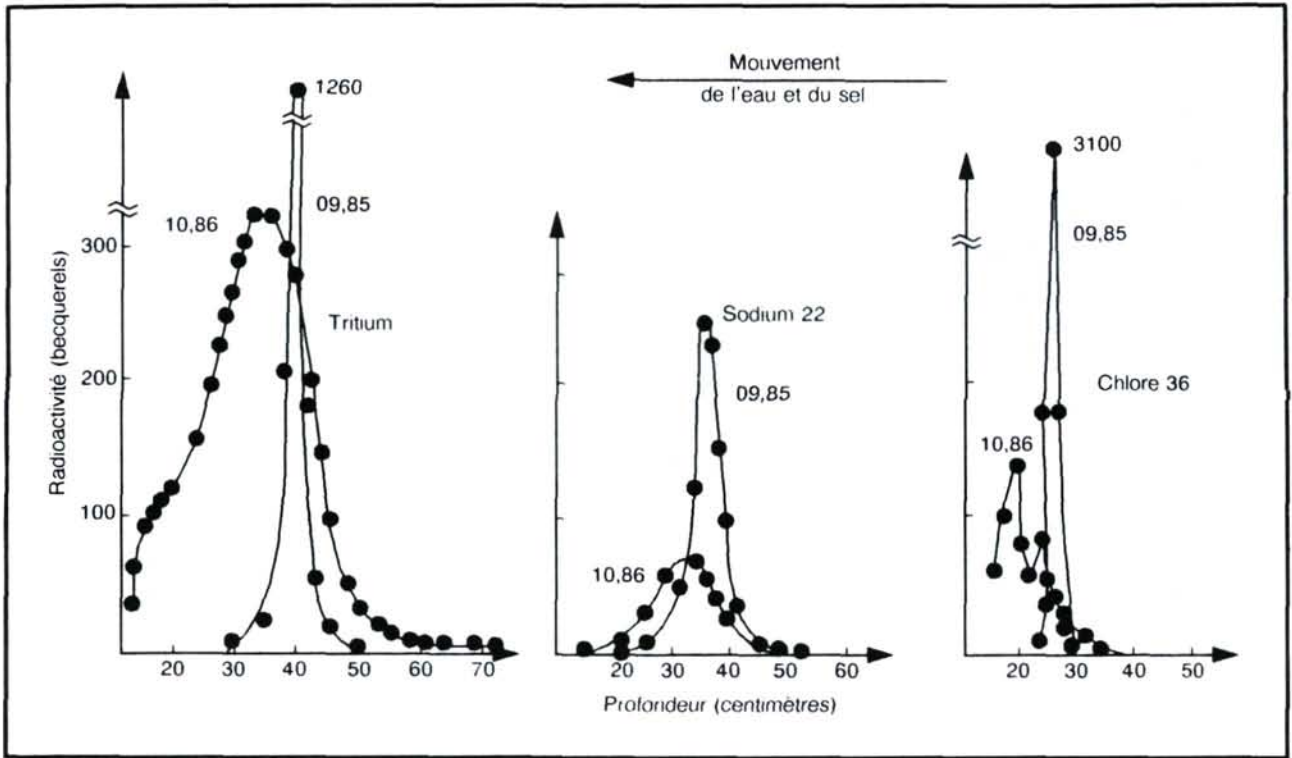
Toujours en Crimée, on a constaté près de Djankoy des remontées de sel dues à l'évapotranspiration et à la faible profondeur de la surface piézométrique (figure 1). Dans ce cas, un indicateur triple a été utilisé (solution dans de l'eau tritiée de chlorure de sodium marqué au sodium 22 et au chlore 36, tous deux radioactifs).

En revanche, à proximité d'une couche non saturée très épaisse, des expériences analogues ont montré que le sel filtrait vers le bas. L'étude a permis d'obtenir des renseignements très utiles sur le transport de l'eau *in situ* et sur le comportement des ions de sodium et de chlore, qui permettent de mieux comprendre les mécanismes et la dynamique de la salinisation du sol, ce qui est particulièrement important, en l'occurrence, du point de vue agricole.

* Ces deux études ont été faites à l'Institut fédéral de recherche en hydrogéologie et en génie géologique de Moscou par M. V.T. Dubinchuk, M. Yu.A. Tsapenko, M. A.V. Borodin et M. A.V. Gladkov.

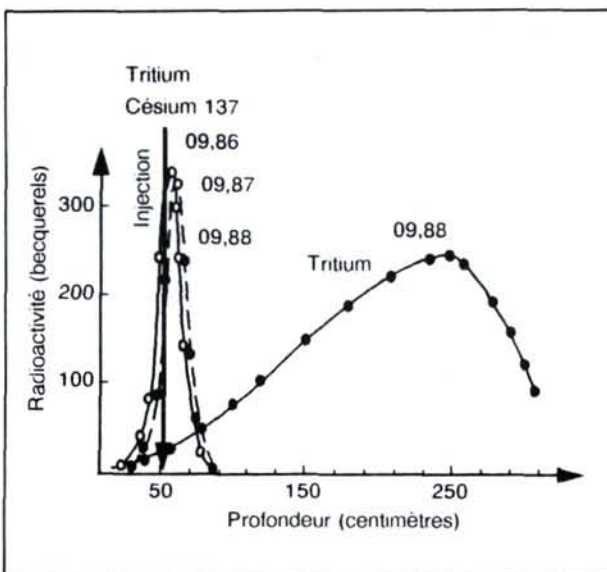
M. Dubinchuk, M. Plata-Bedmar et M. Froehlich sont membres de la Division des sciences physiques et chimiques de l'AIEA.

Figure 1. Méthode du triple indicateur appliquée en Crimée



Dans la région de Tchernobyl, un double traceur (solution d'eau tritiée et de chlorure de césium marqué au césium 137) a été injecté à diverses profondeurs en vue d'établir un pronostic (figure 2). Les résultats ont montré clairement que la dispersion du césium était retardée par rapport à celle de l'eau, ce qui permet d'évaluer avec plus de précision le risque de contamination de l'eau souterraine par ce radionucléide.

Figure 2. Méthode du double indicateur appliquée près de Tchernobyl



Intrusion d'eau polluée

Un problème classique de la gestion des eaux est celui de l'intrusion dans les eaux souterraines d'eau polluée provenant de lacs, de cours d'eau ou autres masses d'eaux naturelles ou artificielles.

Au Nicaragua, près de Managua, ce phénomène est à l'étude dans le cadre d'un projet de coopération technique de l'AIEA, à l'aide d'une méthode combinant les isotopes naturels (tant radioactifs que stables) et des indicateurs artificiels.

Cette étude porte sur le lac Asososca où se trouve une des quatre principales stations de pompage qui fournit 60% de l'eau destinée à la population locale. Il s'est formé dans le cratère d'un ancien volcan; profond de quelque 90 mètres, il mesure environ 1 km de diamètre. Il est alimenté par des eaux souterraines qui pourraient être rechargées par le lac Managua fortement pollué. Aux quatre points de pompage, la surface piézométrique se situe à un niveau inférieur à celui du lac Managua à cause de l'extraction intensive de ces dernières décennies, ce qui implique le risque d'une intrusion d'eau polluée du lac Managua dans les eaux souterraines et dans le lac Asososca (figure 3).

C'est pourquoi une étude a été entreprise pour mesurer la vitesse d'écoulement des eaux souterraines et déterminer leurs caractéristiques, étude qui comporte l'analyse d'isotopes du milieu (tritium, deutérium et oxygène 18), la détermination de la composition chimique de l'eau et des expériences avec des indicateurs artificiels.

Ces travaux ont permis de conclure qu'il n'y avait pas d'intrusion détectable d'eau polluée, mais on a constaté une grande différence de composition isotopique entre

Les techniques nucléaires et isotopiques

Diverses techniques nucléaires et isotopiques peuvent aider à répondre aux questions précises que l'on se pose à propos de l'écoulement des eaux souterraines et de la migration des polluants.

Parmi ces techniques, le radiocarottage joue un rôle prépondérant. Il consiste à utiliser un rayonnement (gamma, neutronique, etc.) pour définir les propriétés physico-chimiques des sols et des roches *in situ*. Cette technique permet par exemple de mesurer le rayonnement gamma naturel des sols et de déterminer ensuite leur teneur en argile et en carbonates, ainsi que leur perméabilité. Le radiocarottage gamma-gamma consiste à mesurer le rayonnement diffusé provenant d'une source gamma artificielle, le long de la paroi d'un trou de sonde, pour connaître la densité apparente du sol traversé. Le radiocarottage neutronique renseigne sur la teneur du sol en eau. La combinaison des deux techniques permet de déterminer plusieurs caractéristiques, dont la porosité (dans un sol saturé), la densité du sol matrice, ainsi que la vitesse et la diffusibilité de l'eau (dans un sol non saturé). Parfois, l'évaluation des fractures dans les roches consolidées est également facilitée.

Quand les isotopes sont utilisés comme indicateurs, ils peuvent être introduits dans un système hydrologique donné, soit par un processus naturel, soit par un expérimentateur, et permettent de suivre le mouvement de l'eau et de ses composants.

Le recours aux indicateurs a une longue histoire. Parmi les plus simples, les feuilles, les éclats de bois et les brins de paille servaient à observer la direction et la vitesse d'écoulement des eaux de surface, ainsi que leurs interconnexions. Par la suite, différents pigments et teintures naturels et artificiels les ont remplacés et sont encore employés de nos jours.

La technique des indicateurs a fait un bond en avant au début du siècle grâce à l'invention de la conductimétrie et de la colorimétrie, techniques qui ont permis de mesurer à l'aide d'instruments les sels et colorants mélangés à l'eau *in situ* pour servir d'indicateurs. Les hydrologues de cette génération ont utilisé ces indicateurs pour l'étude hydrologique de la région Rhin-Danube, en Crimée et dans le Karst de Dinara.

Mais le grand saut dans ce domaine a été fait lorsqu'on a découvert les isotopes et conçu les instruments permettant de les mesurer.

Il existe une grande variété d'isotopes, si bien que l'on peut étudier pratiquement toutes les sortes de pollution. Ils sont parfois irremplaçables car ils présentent de grands avantages par rapport à d'autres indicateurs.

La technique isotopique peut s'appliquer soit aux molécules d'eau, soit aux particules de polluants, ou aux deux à la fois. L'étude de la migration peut se faire aux niveaux microscopique et macroscopique, sur le plan local ou régional, et

même à l'échelle mondiale. Il est possible de marquer l'eau et les polluants sans perturber les conditions dans lesquelles se déroulent les processus étudiés, et cela éventuellement dans des conditions extrêmes de dilution, de minéralisation, de turbidité, de turbulence, de température, qui interdisent l'utilisation d'autres indicateurs. Par ailleurs, il existe dans la géosphère et dans l'hydrosphère une grande variété d'isotopes naturels qui peuvent renseigner sur les processus de transport dans l'environnement.

Les techniques isotopiques présentent également le grand avantage de permettre une évaluation qualitative et quantitative de ce que l'on appelle les «paramètres de retardement» des milieux géologiques qui interviennent dans le mouvement des polluants. Il s'agit en l'occurrence essentiellement de l'effet de retardement que subit le transport des polluants par rapport au mouvement de l'eau; c'est un phénomène extrêmement complexe qui implique des processus de sorption/désorption, diffusion/dispersion, solution/précipitation et bien d'autres encore.

Plusieurs isotopes différents peuvent être utilisés ensemble à cette fin. Dans la technique du «double indicateur», le tritium (isotope radioactif de l'hydrogène) peut servir d'indicateur du mouvement de l'eau, tandis qu'un autre isotope, judicieusement choisi, peut servir d'indicateur du polluant particulaire. Cette méthode permet de recueillir des renseignements précieux pour l'évaluation des effets du retardement.

Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque l'on combine des études en laboratoire (sur des quantités finies, des colonnes ou des radiographies) avec des opérations de marquage *in situ* utilisant aussi bien des isotopes artificiels que des isotopes du milieu. Sur une quantité finie, on observe la redistribution de composés marqués entre une solution de référence et un échantillon de sol ou de roche dans des conditions hydrauliques statiques. Cela permet d'étudier les isothermes de sorption/désorption, la distribution des coefficients de sorption, et leur rapport avec l'hydrogéochimie et les propriétés du polluant et du sol. A noter que la plupart des données sur la sorption des radionucléides et des ions métalliques ont été récemment obtenues par cette méthode.

La méthode de la colonne consiste à mesurer la distribution dans l'espace et dans le temps de composés marqués s'écoulant à travers une colonne de sol ou de roche. On peut ainsi déterminer simultanément le transport par l'eau et les paramètres de sorption/désorption et de diffusion/dispersion dans des conditions hydrauliques dynamiques. Les données ainsi obtenues sont plus proches de la réalité des systèmes naturels que celles que l'on obtient sur une masse finie.

Les travaux sur le terrain sont de loin préférables. Pour déterminer les paramètres de retardement dans les conditions du milieu naturel, on a généralement recours aux indicateurs multiples.

Le tritium artificiel sert à marquer l'eau, tandis que les solutés réactifs (les polluants) sont marqués par un autre isotope. En général, les concentrations de tritium nécessaires à ces opérations sont de l'ordre de plusieurs dizaines de becquerels par litre (Bq/L).

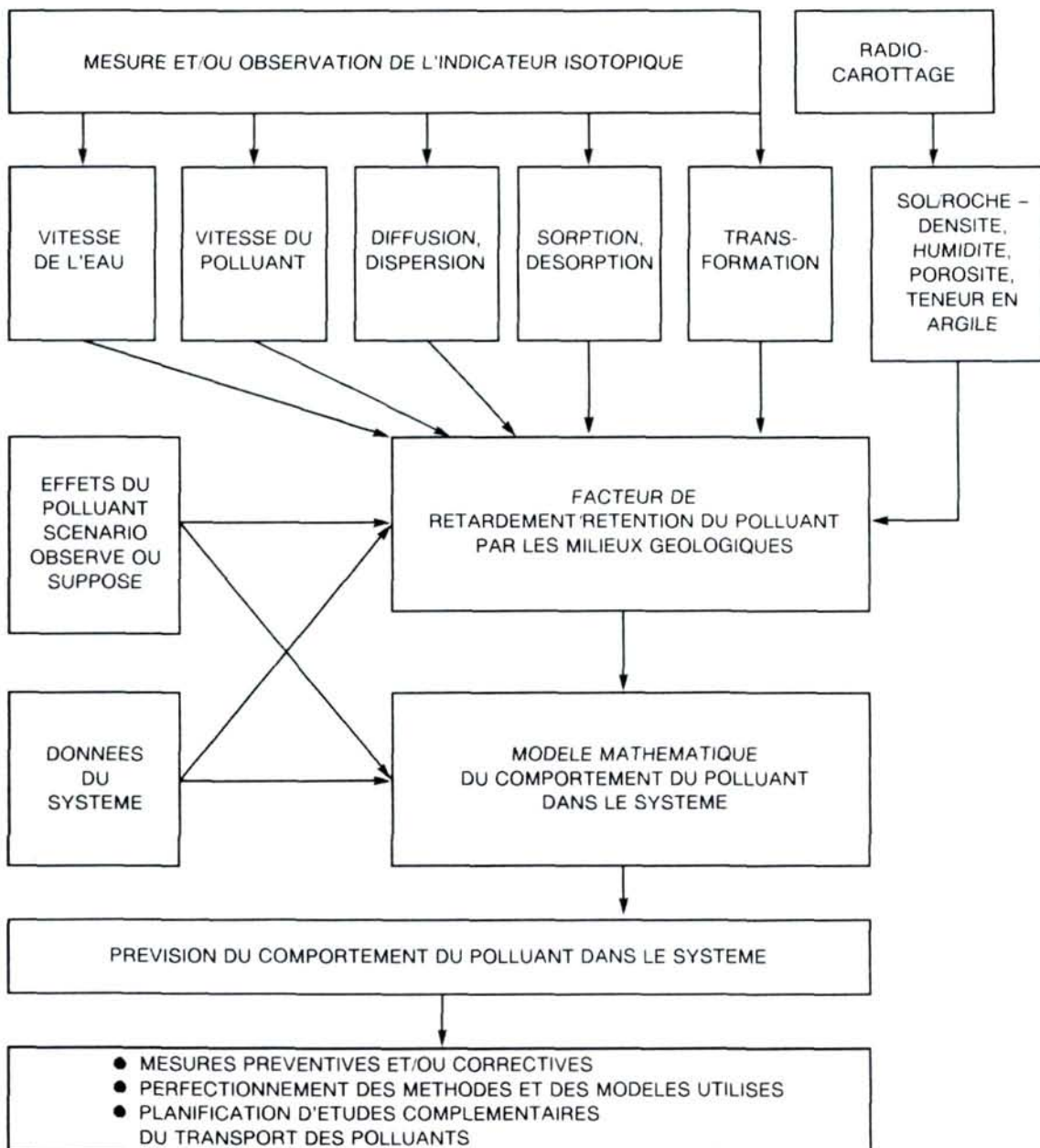
Le marquage aux isotopes artificiels est utilisé le plus souvent pour faciliter la solution de divers problèmes locaux :

- Protection de zones déterminées d'où l'eau est pompée pour l'approvisionnement de la popu-

lation. L'étude a pour objet de déterminer la durée probable du mouvement du polluant depuis la source de la nappe aquifère;

- Analyse et prévision de la contamination des eaux souterraines au voisinage des dépôts d'ordures et des grands complexes industriels;
- Détermination de la dynamique de l'eau dans les systèmes artificiellement alimentés;
- Etude et prévision du mouvement et du comportement du sel et des produits agrochimiques dans les sols et les eaux souterraines.

Figure 5. Méthodologie de l'étude de la pollution à l'aide d'indicateurs



l'eau du lac Managua et l'eau souterraine. On a également observé que l'eau pompée du lac Asososca ne contenait pas de quantités mesurables de tritium, et qu'elle était donc relativement ancienne (le tritium provenant des essais nucléaires atmosphériques qui ont eu lieu entre 1952 et 1962 peut servir à dater les masses d'eau et à déterminer si elles ont été récemment alimentées par des infiltrations d'eau de pluie). L'eau du lac Asososca a aussi la même composition isotopique que les eaux souterraines profondes. Etant donné l'information que peuvent fournir les isotopes, toute intrusion éventuelle d'eau polluée du lac Managua due à un changement des conditions hydrodynamiques serait détectée bien longtemps à l'avance.

Utilisation des eaux usées

Un projet a été mis en œuvre en Tunisie pour étudier la possibilité d'alimenter artificiellement en eau usée la couche aquifère alluviale côtière de Nabeul-Hammamed. La nappe est inutilisable car elle est pratiquement épuisée à cause d'un pompage intensif et de sa salinité accrue. L'eau d'alimentation a été marquée

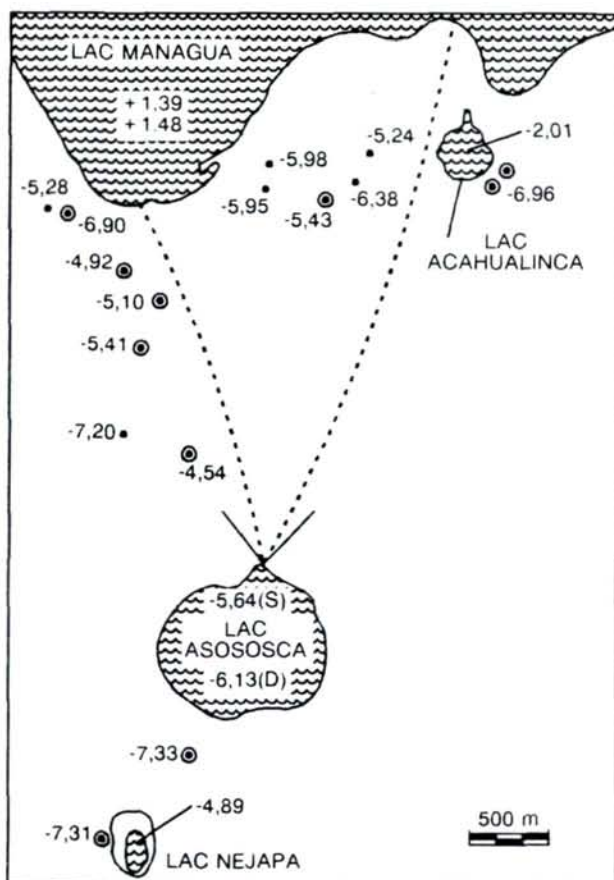
au tritium afin de déterminer si la nappe était capable de s'épurer avec le temps (14 mois) et d'étudier les processus de mélange des eaux anciennes et récentes.

L'opération a consisté à marquer 32 000 mètres cubes d'eau usée par l'injection continue, pendant plus de 42 jours, de l'indicateur à une concentration de 1,2 kilobecquerel par litre (kBq/L). La distribution spatiale de l'eau marquée, 394 jours après le début de l'expérience, montre une évolution dynamique de la nappe (figure 4). L'information ainsi obtenue permettra de bien préparer une opération future de grande envergure visant à récupérer les eaux usées pour l'irrigation. La région produit surtout des agrumes, du riz et des primeurs et l'on a conclu que, pour pouvoir irriguer ces cultures, il fallait mélanger l'eau usée avec une eau moins minéralisée.

Avantages et inconvénients des méthodes isotopiques

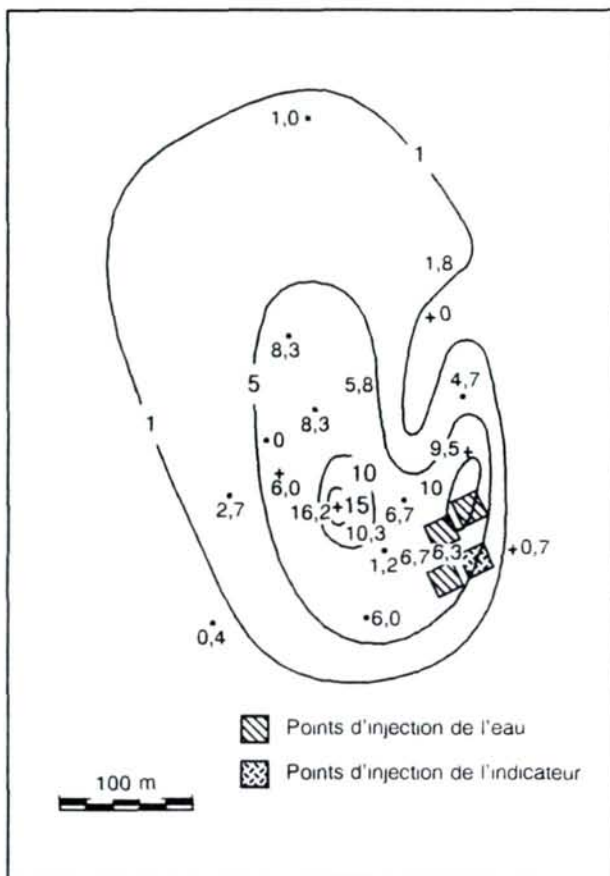
Le marquage par des indicateurs isotopiques permet de savoir ce qu'il advient des polluants (ou de tout autre constituant de l'eau) lorsqu'ils entrent en contact avec

Figure 3. Etude isotopique de l'intrusion de polluants, au Nicaragua



Note: Les valeurs indiquées concernent l'oxygène 18; elles expriment la déviation en millièmes, par rapport à la norme SMOW de Vienne.

Figure 4. Etude isotopique d'alimentation avec des eaux usées, en Tunisie (courbes d'isoconcentration du tritium)



Note: Les valeurs sont exprimées en $\mu\text{Ci}/\text{m}^3$.

les sols, les roches ou les matières déposées ou en suspension. Il peut intervenir à n'importe quel stade du mouvement, de la transformation et de l'interaction du polluant dans le milieu géologique considéré.

De plus, il est possible d'utiliser les indicateurs isotopiques à des concentrations chimiques extrêmement faibles, qui ne perturbent pas l'état physico-chimique et thermodynamique du système à l'étude, mais qu'il est impossible de détecter avec les moyens habituels.

Enfin, ces indicateurs peuvent être utilisés de façon non destructive. Par exemple, les phénomènes de diffusion et de sorption peuvent être observés en laboratoire sur des colonnes sans que l'échantillon de sol ou de roche soit détruit. Sur le terrain, on peut procéder à des tests également non destructifs par marquage gamma et radiocarottage.

Ces méthodes isotopiques ont aussi leurs inconvénients et leurs limites. C'est pourquoi, pour l'étude de la migration des polluants, en particulier, les spécialistes se préoccupent désormais moins de la mise au point et du perfectionnement de telle ou telle méthode que des modalités complexes de leur application en combinaison avec des méthodes traditionnelles, ce qui est le cas lorsqu'il s'agit d'obtenir l'information nécessaire pour pronostiquer et proposer des mesures correctives.

Le développement des techniques nucléaires dans ce domaine devrait viser plus spécialement à élaborer des algorithmes permettant de transformer les données obtenues en laboratoire et sur le terrain en systèmes environnementaux. Il faut mettre au point des modèles d'interprétation et de pronostic mieux adaptés et constituer des bases de données sur les caractéristiques propres de la migration des polluants dans les conditions géologiques et thermodynamiques habituelles.

On entend dire souvent que l'inconvénient des techniques radio-isotopiques, en général, est la nécessité, pour celui qui demande l'autorisation de s'en servir, de présenter un exposé de leurs effets sur l'environnement. Cette condition peut donner lieu à des malentendus dans l'opinion publique et même au niveau des autorités responsables. Dans la plupart des cas, les isotopes artificiels utilisés en hydrologie et en hydrogéologie ne sont administrés qu'à de faibles concentrations qui ne présentent aucun danger pour les travailleurs, le public ou l'environnement lorsque toutes les précautions nécessaires sont prises en pleine connaissance de cause. Quant aux radio-isotopes naturels du milieu, leur emploi ne présente aucun risque particulier.

D'ailleurs, l'Agence prépare actuellement, à l'intention des chercheurs et des services compétents nationaux, un manuel sur le mode d'emploi des indicateurs radioactifs artificiels en hydrologie.

Autres activités de l'AIEA

Dans le cadre des études sur la migration des polluants, l'AIEA s'occupe de plusieurs projets touchant l'hydrologie et la géochimie des eaux superficielles et des eaux souterraines.

En outre, plusieurs groupes consultatifs d'experts ont été réunis pour déterminer l'utilité, la fiabilité et les possibilités d'application des techniques nucléaires à l'évaluation des ressources d'eaux souterraines; parmi les sujets privilégiés, citons les techniques de marquage isotopique en hydrologie, la vulnérabilité des nappes aquifères, le recours aux isotopes des gaz nobles pour étudier les processus qui se déroulent dans l'atmosphère et dans l'hydrosphère, et la modélisation informatique en hydrologie isotopique.

Plusieurs programmes de recherche coordonnée sur ces thèmes ont été menés à bien. Rappelons celui sur la modélisation du transport des isotopes dans les systèmes hydrogéologiques, et celui sur l'élaboration et l'évaluation de techniques nucléaires pour les études sur le transport des polluants, ce dernier avec la participation d'équipes scientifiques d'Allemagne, d'Australie, du Brésil, du Danemark, des Etats-Unis, de Finlande, de France, du Mexique, de Tchécoslovaquie et d'URSS.

L'Agence assiste également plusieurs projets de coopération technique régionale dans les domaines de l'hydrologie et de l'hydrogéologie en Amérique latine, au Moyen-Orient, en Afrique et en Asie. Elle organise aussi régulièrement des cours pour enseigner à des groupes internationaux de spécialistes les principes et la pratique des techniques isotopiques, en insistant plus spécialement sur les applications les plus utiles pour résoudre les problèmes de protection des ressources d'eau.

En mars 1991, l'AIEA réunira un colloque international sur l'hydrologie isotopique qui examinera notamment la contribution des techniques isotopiques à l'étude de la pollution et de la protection des eaux souterraines. Ce sera le huitième colloque sur ce sujet depuis 1963.