

Hydrologie isotopique: étude de la contamination des eaux souterraines

*Utilisation d'isotopes du milieu
pour l'étude de graves problèmes de pollution*

par V. Dubinchuk, K. Fröhlich et R. Gonfiantini

Au cours des 100 dernières années, la part des eaux souterraines dans l'approvisionnement mondial en eau des collectivités, de l'agriculture et de l'industrie n'a cessé de croître. Le fait que l'on trouve des formations aquifères presque partout, la qualité des eaux souterraines et le développement des techniques de forage des puits n'ont fait qu'encourager cette tendance.

Etant naturellement protégées, les eaux souterraines ont longtemps échappé à la contamination et étaient plus propres et plus claires que les eaux de surface.

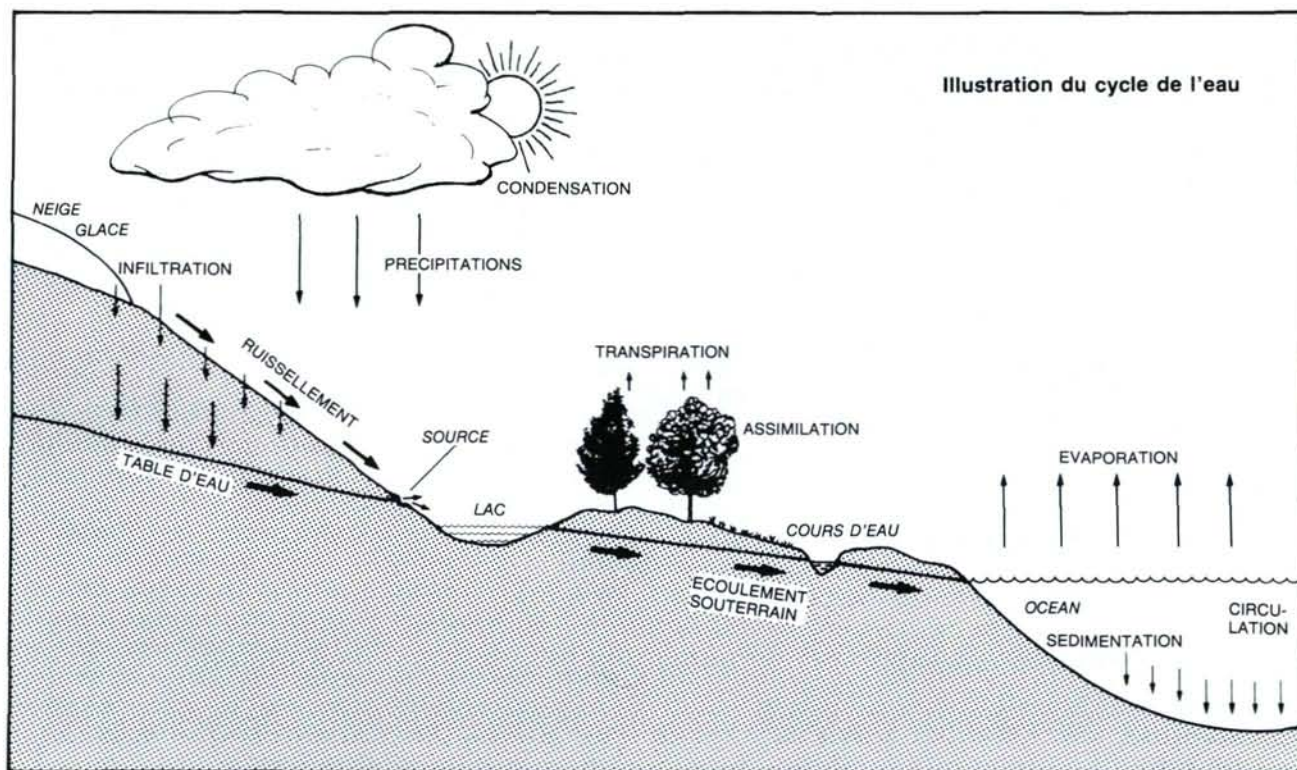
On pensait d'ailleurs dès l'époque d'Hippocrate, au V^e siècle avant J.-C., que les eaux de surface stagnantes étaient à l'origine d'affections.

Récemment, la qualité des eaux souterraines s'est cependant dégradée dans nombre de régions, ce qui a eu parfois des conséquences graves. La décontamination des eaux souterraines est une opération très longue et parfois impossible par suite du temps de séjour généralement prolongé de l'eau dans la plupart des formations géologiques.

Les causes principales de contamination résident dans une mauvaise gestion des eaux souterraines (souvent conditionnée par des impératifs sociaux) et dans l'absence de réglementation et de contrôle concernant l'utilisation et l'évacuation des polluants. Les pratiques

M. Dubinchuk et M. Fröhlich travaillent à la Section d'hydrologie isotopique de la Division des sciences physiques et chimiques de l'AIEA, sous la direction de M. Gonfiantini.

Illustration du cycle de l'eau



agricoles, qui font appel aux engrais, herbicides et pesticides de manière parfois inconsidérée et souvent excessive, sont l'une des sources principales de contamination des eaux souterraines. Ainsi, les concentrations de nitrates que l'on peut souvent imputer aux engrais augmentent de plus en plus dans les aquifères peu profonds.

Les polluants industriels et domestiques sont parmi les plus dangereux, en partie parce qu'ils sont surtout produits dans les zones urbaines où la demande en eau est particulièrement forte et l'exploitation des eaux souterraines particulièrement intense. La pression des eaux souterraines est alors réduite, et les eaux de surface contaminées peuvent s'infiltrer à des profondeurs qui leur étaient jusque-là interdites par la pression artésienne.

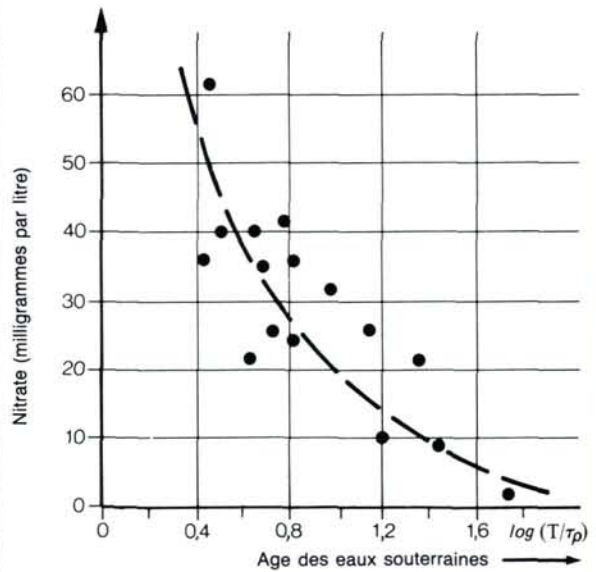
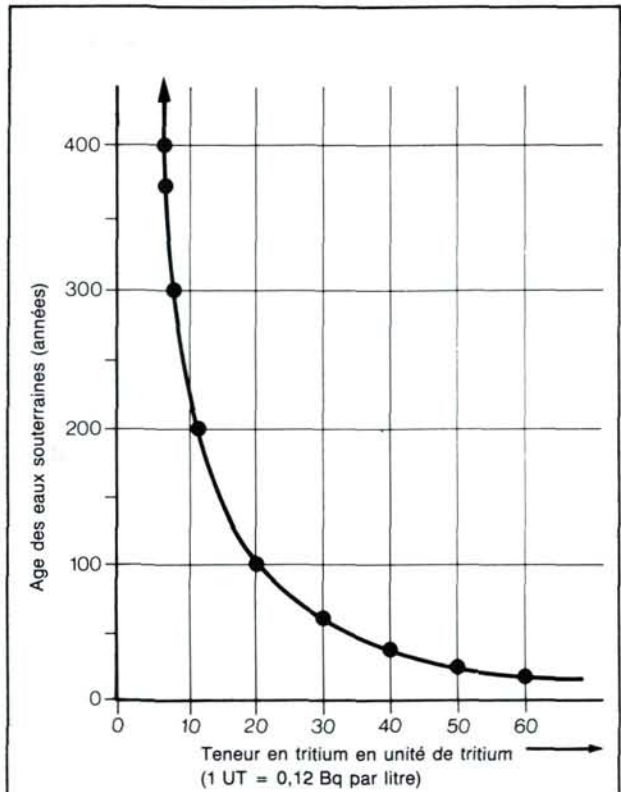
Dans les régions côtières, le surdéveloppement s'accompagne fréquemment d'une invasion d'eau salée et, partant, d'une salinisation des eaux souterraines. Dans les zones arides, le surdéveloppement aboutit en général à une diminution rapide des ressources en eaux souterraines qui ne peuvent pas se reconstituer suffisamment en raison des conditions climatiques. En outre, la mauvaise conception des systèmes d'irrigation peut hâter le processus de salinisation du sol qui finit par devenir stérile.

Une enquête sur les eaux souterraines de la vallée de Mexicali, située dans une région aride du nord-ouest du Mexique, a par exemple aidé les chercheurs à déterminer l'origine de la salinisation. On ne parvenait pas à savoir par les seules méthodes chimiques si la dégradation des eaux souterraines était imputable à de mauvaises méthodes d'irrigation ou à l'infiltration d'eau en provenance du barrage Presal Morelos ou du canal de drainage Wellton-Mohawk. Les chercheurs ont fait appel aux techniques isotopiques pour examiner les corrélations linéaires entre les concentrations de chlorure et d'oxygène 18 et entre deux isotopes lourds, le deutérium et l'oxygène 18. Les résultats (rapportés en 1979 par Payne, Quijano et Latorre) ont clairement montré un apport du canal de drainage Wellton-Mohawk, que l'on a donc identifié comme étant la source principale de contamination.

Ces types de problèmes ont donné lieu à une demande croissante d'études qui permettent de comprendre le comportement des polluants dans le cycle hydrologique. Les objectifs principaux sont de prévenir la pollution et la dégradation des eaux souterraines ou, si elles sont déjà contaminées, d'identifier l'origine du mal pour pouvoir envisager des solutions.

Isotopes du milieu

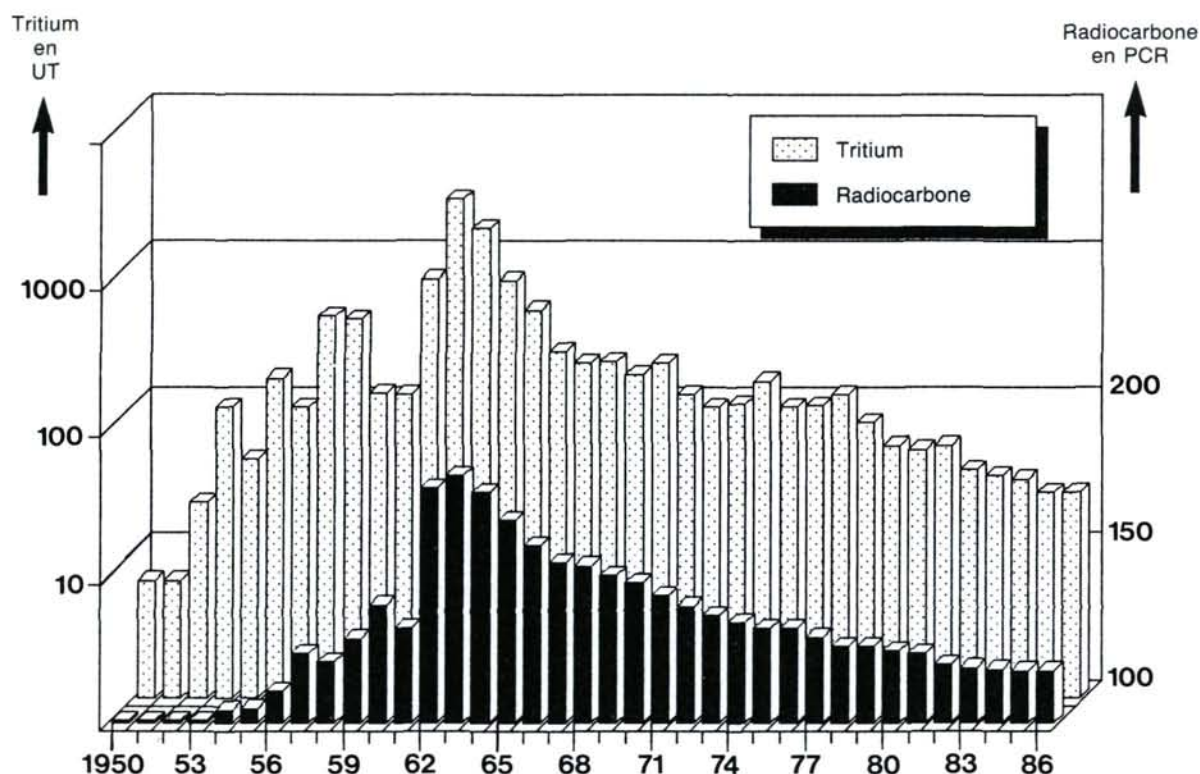
Les isotopes du milieu se sont révélés un instrument utile pour les études sur la pollution des eaux souterraines. Il s'agit en général d'isotopes rares, aussi bien stables que radioactifs, présents dans l'environnement à de faibles concentrations qui varient par rapport à l'isotope du même élément le plus abondant. Les isotopes du milieu sont naturels ou artificiels. Dans les deux cas, leur répartition dans l'environnement est régie par des processus naturels. Bien que faibles, les différences de concentration des isotopes de l'environnement sont mesurées avec une grande précision et fournissent des renseignements précieux sur les réseaux hydrologiques.



Notes: T est l'âge des eaux souterraines. τ_p est la période de temps écoulée entre l'apparition de tritium provenant d'essais dans l'atmosphère et l'exécution de l'étude.

Ces figures montrent la corrélation entre la concentration de nitrate et de tritium observée dans un aquifère permien libre en République démocratique allemande. La corrélation indique que le nitrate a été transporté dans les eaux souterraines par infiltration des eaux de pluie.

Teneur en tritium des précipitations et teneur en radiocarbone du dioxyde de carbone atmosphérique en Europe centrale



Notes: UT: Unité de tritium; 1 UT = 0,12 Bq par litre.
 PCR: Pourcentage de carbone récent; 1 PCR = 0,23 Bq par gramme de carbone.

La dynamique du cycle hydrologique et les interactions entre l'hydrosphère et l'atmosphère sont responsables des variations isotopiques observées dans les eaux naturelles (voir figure ci-jointe). En règle générale, les isotopes stables, qui sont invariants avec le temps, servent à déterminer l'origine des eaux souterraines et des phénomènes de mélange. Les isotopes radioactifs, dont on peut mesurer la décroissance, sont utilisés pour évaluer la dynamique des eaux souterraines. L'analyse chimique fournit en général des renseignements complémentaires et est effectuée parallèlement à l'étude isotopique.

Les isotopes couramment utilisés dans les études hydrologiques sont le tritium et le carbone 14 naturellement produits par les rayonnements cosmiques secondaires. Ces isotopes ont été injectés dans l'atmosphère en grandes quantités par les essais thermonucléaires effectués dans l'atmosphère jusqu'en 1963 par les Etats-Unis, le Royaume-Uni et l'URSS. Les essais menés ultérieurement par les Chinois et les Français n'en ont produit que des quantités minimes (voir figure ci-jointe). La diminution des concentrations de tritium et de carbone 14 dans les précipitations et dans le dioxyde de carbone de l'atmosphère après le Traité d'interdiction partielle des essais nucléaires de 1963 a ouvert des perspectives nouvelles extrêmement intéressantes en ce qui concerne les phénomènes atmosphériques.

Le tritium, dont la période est de 12,43 ans seulement, peut servir à détecter une alimentation récente des eaux souterraines (c'est-à-dire qui s'est produite au cours des 30 années précédentes). Outre l'importance qu'elle a au plan hydrologique, cette information aide à évaluer le risque potentiel de contamination d'une nappe phréatique donnée. Lorsqu'il y a du tritium, le temps de transit de l'eau de la zone d'alimentation à l'aquifère est court, de même que le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère. Les substances polluantes dissoutes dans les eaux de recharge ont donc moins de chances d'être adsorbées par la matrice de l'aquifère, de sorte que le risque de contamination est potentiellement élevé.

Les mouvements des radionucléides dans la nappe phréatique sont l'un des principaux sujets d'étude. Les radionucléides naturels de la famille de l'uranium et du thorium pénètrent dans les eaux souterraines par dissolution à partir de la matrice de l'aquifère. Si les conditions le permettent, on peut les utiliser pour évaluer la dynamique des eaux souterraines.

Il faut ajouter que les études sur le comportement géochimique de ces radionucléides présentent également de plus en plus d'intérêt pour l'évaluation des sites nucléaires et en particulier des sites de stockage définitif des déchets nucléaires. Le problème consiste à évaluer le taux d'adsorption-désorption de ces isotopes sur diverses matrices rocheuses et à déterminer leur vitesse

Perspectives

Isotopes stables des principaux éléments utilisés dans les études sur l'environnement

| Isotopes | Teneur dans les composés naturels (%) |
|-------------|---------------------------------------|
| Hydrogène 1 | 99,984 |
| Hydrogène 2 | 0,015 |
| Carbone 12 | 98,89 |
| Carbone 13 | 1,11 |
| Azote 14 | 99,634 |
| Azote 15 | 0,366 |
| Oxygène 16 | 99,76 |
| Oxygène 18 | 0,2 |
| Soufre 32 | 95,02 |
| Soufre 34 | 4,21 |

de migration d'après les informations dont on dispose sur la vitesse de migration des eaux souterraines elles-mêmes.

Le radiocarottage peut aider à déterminer le taux de filtration de l'eau dans la zone non saturée (la zone de l'aquifère peu profond située au-dessus de la surface d'une nappe libre). En association avec les données sur les isotopes du milieu et artificiels, cette technique a été utilisée dans la région de Tchernobyl en URSS pour évaluer le temps nécessaire aux polluants pour atteindre la nappe phréatique à partir de la surface du sol.

L'AIEA a lancé en 1987 un programme de recherche coordonnée sur l'utilisation des techniques nucléaires pour déterminer le transport des polluants dans les eaux souterraines. Un projet d'hydrologie isotopique est actuellement entrepris dans le cadre du programme de coopération régionale de l'AIEA en Amérique latine (connu sous le nom ARCAL). Il s'agit essentiellement d'appliquer les isotopes de l'environnement aux problèmes de l'évaluation et de la contamination des eaux souterraines en Amérique latine. En 1989, on prévoit de lancer un autre programme de recherche coordonnée qui fera appel à des traceurs isotopiques et autres pour la validation de modèles mathématiques dans les études sur le transport dans les eaux souterraines.

Radionucléides utilisés dans les études sur les eaux souterraines

| Nucléide | Période (années) | Sources | Activité volumique initiale approximative dans les eaux souterraines (mBq par litre) |
|-----------------------|------------------|--|--|
| Tritium (hydrogène 3) | 12,4 | Rayonnements cosmiques secondaires, essais thermonucléaires dans l'atmosphère, installations nucléaires (essentiellement usines de retraitement) | 600 (avant 1954) |
| Carbone 14 | 5 730 | Rayonnements cosmiques secondaires, essais thermonucléaires dans l'atmosphère, installations nucléaires (essentiellement usines de retraitement) | 3 |
| Silicium 32 | 105 | Rayonnements cosmiques secondaires | 5×10^{-3} |
| Chlore 36 | 301 000 | Rayonnements cosmiques secondaires, essais thermonucléaires dans l'atmosphère; réactions nucléaires naturelles (souterraines) | 3×10^{-3} |
| Argon 39 | 269 | Rayonnements cosmiques secondaires; réactions nucléaires naturelles (souterraines) | 7×10^{-4} |
| Krypton 81 | 210 000 | Rayonnements cosmiques secondaires | 1×10^{-7} |
| Krypton 85 | 10,7 | Installations nucléaires (essentiellement usines de retraitement) | moins de 2×10^{-7} (avant 1950) |

