

L'hydrologie au moyen des isotopes de l'environnement

L'hydrologie au moyen des isotopes de l'environnement est un domaine de recherche relativement nouveau, fondé sur les variations isotopiques observées dans les eaux naturelles. Ces caractéristiques isotopiques ont été déterminées dans maintes régions après de longues études. Elles ne peuvent être contrôlées par l'homme, mais peuvent être observées et interprétées de manière à fournir à l'échelon régional des informations utiles sur l'origine, le temps de renouvellement et de transit de l'eau dans le système, informations qu'il est souvent impossible d'obtenir à l'aide d'autres méthodes. En général, le coût de ces recherches est relativement faible par rapport au coût des études d'hydrologie de type classique.

Les principaux isotopes de l'environnement ayant un intérêt du point de vue hydrologique sont les isotopes stables – deutérium (hydrogène 2), carbone 13, oxygène 18 – et les isotopes radioactifs – tritium (hydrogène 3) et carbone 14. Les isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène sont des indicateurs géochimiques de l'eau idéaux, car leurs concentrations ne sont généralement pas soumises à des variations par interaction avec des matières contenues dans la nappe aquifère. Au contraire, les composés du carbone contenus dans les eaux souterraines peuvent avoir des interactions avec des matières contenues dans la nappe aquifère, ce qui complique l'interprétation des données obtenues à l'aide du carbone 14.

On a récemment proposé d'utiliser en hydrologie quelques autres isotopes de l'environnement comme ^{32}Si et $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$, mais leur application a été jusqu'à maintenant très limitée et il n'en sera pas question ici.

Les isotopes stables de l'hydrogène et de l'oxygène dans le cycle hydrologique

Les variations des rapports isotopiques D/H et $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dans des échantillons d'eau sont exprimées en écart pour mille ($\delta\text{‰}$) par rapport aux rapports isotopiques de l'eau de composition isotopique normalisée, qui constitue l'étalon de référence SMOW:

$$\delta\text{‰} = \left(\frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{SMOW}}} - 1 \right) 1000$$

Le rapport isotopique, R, est mesuré au moyen d'un spectromètre de masse spécial.

Le principal intérêt des données obtenues au moyen des isotopes stables d'un système hydrologique est de permettre d'identifier sa zone d'alimentation à partir de données générales sur les variations isotopiques des précipitations et des eaux de surface.

Les processus naturels les plus importants qui provoquent des variations de la composition en isotopes stables des eaux naturelles sont l'évaporation et la condensation. Les molécules légères de l'eau $\text{H}_2\ ^{16}\text{O}$ sont plus volatiles que les molécules lourdes, si bien que



La chute de Chungji dans l'île volcanique de Cheju (République de Corée), point de prélèvement No 5 pour l'étude de l'origine des eaux à l'aide des isotopes.

lors du refroidissement de l'humidité atmosphérique, ces dernières se condensent de préférence, laissant une vapeur résiduelle de plus en plus pauvre en isotopes lourds. Cette condensation fractionnée se produit lorsque des masses d'air se déplacent de la mer vers l'intérieur des terres ou s'élèvent à plus haute altitude. Etant donné que la vapeur résiduelle nécessite une température de plus en plus basse pour se condenser, on observe un rapport entre la température de condensation et la composition isotopique des précipitations; à mesure que la température de condensation décroît, la teneur des précipitations en isotopes lourds s'abaisse.

Cette influence de la température produit les effets suivants sur la composition isotopique des précipitations: i) variations suivant les saisons (les précipitations hivernales sont pauvres en isotopes lourds par rapport aux précipitations estivales), ii) variations en

fonction de la latitude (les précipitations des latitudes élevées sont pauvres par rapport aux précipitations des basses latitudes), iii) variations en fonction de l'altitude (la teneur en isotopes lourds des précipitations diminue à mesure que l'altitude augmente). Ce dernier effet est particulièrement important dans les études d'hydrologie régionale où, par exemple, il est possible de différencier des eaux souterraines provenant de zones d'alimentation situées à des niveaux différents.

Lorsque les eaux de précipitation s'infiltrent pour alimenter des eaux souterraines, le mélange qui se produit dans la zone non saturée atténue les variations isotopiques saisonnières de sorte que l'eau de la zone saturée a une composition correspondant à la composition isotopique moyenne des eaux d'infiltration dans la région. Ainsi, la composition isotopique des eaux souterraines est en rapport avec celle des précipitations dans la zone d'alimentation de la nappe aquifère *au moment* de l'alimentation et peut servir à identifier la zone d'alimentation d'après l'altitude ou la distance à la mer. Il faut tenir compte des différences climatiques au moment de l'alimentation qui ont pu produire une composition isotopique de l'eau d'infiltration primitive différente de celle qui existe au moment présent.

Il est possible d'identifier l'alimentation des eaux souterraines par infiltration latérale de l'eau des cours d'eau et des lacs ou par infiltration verticale des eaux stagnantes peu profondes, car ces eaux ont souvent une composition isotopique différente de celle des précipitations locales. Les cours d'eau peuvent apporter de l'eau provenant de précipitations en altitude, donc pauvres en isotopes lourds. Les eaux stagnantes peu profondes ou les lacs peuvent être considérablement enrichis en isotopes lourds par évaporation et le rapport D-¹⁸O sera différent de celui qui est courant pour les précipitations.

Le tritium dans le cycle hydrologique

Le tritium est normalement produit dans l'atmosphère par les rayons cosmiques et il s'en est également formé lors des essais thermonucléaires. La plus grande partie de ce tritium est rapidement oxydée en HTO et s'incorpore au cycle hydrologique où elle constitue un indicateur très utile de l'eau contenue dans l'atmosphère au cours des 20 dernières années. Du fait de la forte dilution par H₂O, les concentrations sont très faibles et ne peuvent être mesurées qu'au moyen de la radioactivité du tritium, généralement après un traitement d'enrichissement isotopique (Vol.15 du Bulletin de l'AIEA, No 1, 1973). La teneur en tritium des eaux naturelles est exprimée en unités de tritium (UT). Une unité de tritium correspond à une concentration de 1 atome de tritium pour 10¹⁸ atomes d'hydrogène.

Les rayons cosmiques produisent une concentration d'environ 10 UT dans l'eau des précipitations continentales des zones tempérées. Depuis 1953, de grandes quantités de tritium artificiel ont été libérées dans l'atmosphère par les essais thermonucléaires. En 1963, des concentrations atteignant 10 000 UT ont été enregistrées dans les précipitations de l'hémisphère nord. Depuis lors, les concentrations ont diminué car des limitations ont été imposées aux essais d'engins thermonucléaires dans l'atmosphère. Des variations saisonnières et géographiques considérables de la teneur en tritium des précipitations résultent de l'emplacement des principaux rejets (stratosphère nord) et des mécanismes de transfert de la stratosphère à la troposphère puis aux eaux de surface. L'Agence publie des données sur la concentration du tritium dans les précipitations prélevées par des stations réparties dans le monde entier, qui permettent d'évaluer le dépôt de tritium dans la plupart des endroits.

Dans des études d'hydrologie, la mesure du tritium donne des renseignements sur le temps de transit ou de renouvellement de l'eau dans un système donné. Dans un système aquifère souterrain confiné, il est possible d'établir un rapport entre les concentrations

du tritium et le dépôt de tritium connu modifié en tenant compte des effets de l'alimentation choisie suivant la saison et du mélange par dispersion à l'intérieur d'un terrain aquifère de type granulaire. Qualitativement, des concentrations de moins de deux ou trois UT dans un site continental septentrional indiquent que le système aquifère a été alimenté avant le rejet de tritium thermonucléaire, c'est-à-dire avant 1953, tandis que des concentrations supérieures à 20 UT indiquent une circulation d'eau beaucoup plus rapide à travers le système. Dans un système ouvert, superficiel ou à faible profondeur, le mélange d'eau de différents âges prédomine et les concentrations du tritium sont interprétées en temps de résidence moyen dans un modèle mathématique composé d'une cellule de mélange ou d'une combinaison de cellules qui sont jugées satisfaisantes du point de vue géohydrologique.

Les isotopes du carbone dans le cycle hydrologique

Comme le tritium, le carbone 14 présent dans l'environnement est le résultat de l'irradiation de l'atmosphère par les rayons cosmiques et du rejet de radioactivité lors des essais nucléaires. Le carbone 14 est oxydé en anhydride carbonique, se mélange avec l'anhydride carbonique de l'atmosphère et entre dans le cycle global du carbone. Etant donné sa période plus longue (5730 ans), il est intéressant pour l'étude des eaux souterraines dont les temps de transit sont très longs. Le carbone 14 provenant des bombes ne présente normalement pas d'intérêt pour les études d'hydrologie, car le tritium est un indicateur bien supérieur pour les eaux récentes.

L'utilisation de ^{14}C pour la datation des eaux souterraines se fonde sur le fait que l'anhydride carbonique du sol est d'origine biogénique, puisqu'il est le produit de la respiration des racines des plantes et de la décomposition des plantes et contient donc le ^{14}C que les plantes tirent de l'atmosphère. Cet anhydride carbonique biogénique se dissout dans l'eau d'infiltration et il est transporté jusqu'aux eaux souterraines. Sa teneur en ^{14}C diminue par décroissance radioactive et la fraction restante de l'anhydride carbonique primitif permet de calculer le temps qui s'est écoulé depuis qu'il a été enlevée du sol, c'est-à-dire du temps qui s'est écoulé depuis l'infiltration de l'eau considérée.

Le ^{14}C est mesuré, par rapport à la teneur en carbone total de l'échantillon; aussi faut-il tenir compte de l'origine tant du ^{14}C que du carbone stable de l'échantillon. Tout le carbone stable du carbonate des eaux souterraines n'a pas la même origine que le ^{14}C . L'eau d'infiltration, contenant de l'anhydride carbonique provenant du sol, dissout des carbonates du sol. Toutefois, le carbone provenant des calcaires ne contient généralement pas de ^{14}C , de sorte que l'eau qui parvient à la nappe souterraine contient du carbone dissous (sous les formes chimiques de H_2CO_3 , HCO_3^- et CO_3^{2-} ayant une teneur en ^{14}C inférieure à celle qui est présente dans le CO_2 biogénique du sol. L'évaluation de la dilution du CO_2 du sol, qui contient à l'origine 100% de ^{14}C récent avec du carbonate sans ^{14}C pour établir la concentration en ^{14}C initiale dans l'eau d'alimentation qui parvient à la nappe constitue le problème le plus difficile posé par la détermination de l'âge de l'eau au moyen du ^{14}C .

L'expérience a montré qu'on peut évaluer à 85% en moyenne la teneur en ^{14}C récent des eaux d'infiltration préthermonucléaires en Europe centrale. Pour essayer d'obtenir une meilleure estimation de cette valeur à des endroits donnés, on peut étudier la teneur en ^{13}C stable de l'échantillon de carbonate des eaux souterraines. Etant donné que l'anhydride carbonique biogénique a une teneur en ^{14}C sensiblement inférieure à celle du calcaire, on pourrait espérer évaluer les proportions de carbone biogénique et de carbone des calcaires à partir de la teneur en ^{13}C du carbonate des eaux souterraines. Toutefois, on connaît généralement très insuffisamment la teneur en ^{13}C des plantes dans la région et au moment (il y a des milliers d'années) de l'alimentation. De plus, il est reconnu que les rapports

des isotopes du carbone peuvent être modifiés par une chimie des eaux souterraines beaucoup plus compliquée que celle du carbonate simple étudié plus haut.

La méthode fondée sur l'étude du ^{14}C peut être appliquée à des eaux ayant moins de 30 000 ans. En général, on l'utilise pour étudier le mouvement de l'eau dans des aquifères confinés. Lorsque l'alimentation ne se produit que dans la zone de résurgence et que la chimie de l'eau et la composition isotopique des espèces de carbone dissoutes sont relativement uniformes, les différences d'âge dans l'espace sont indépendantes des incertitudes de la détermination de l'âge absolu de l'eau. Ainsi, il est possible de déterminer le débit de l'eau en déterminant les différences d'âges entre deux points de prélèvement situés à une distance connue. Ceci fournit à l'hydrologiste une évaluation de la perméabilité régionale moyenne. Les mesures de ^{14}C , surtout si elles sont associées à des mesures du tritium, peuvent aussi fournir des renseignements sur les processus de mélange d'eaux d'âges différents à l'intérieur d'un système aquifère donné.

Exemples d'application pratique

Ces principes généraux ont été appliqués dans de nombreuses parties du monde au cours des dernières années dans le cadre de projets exécutés avec l'aide de l'AIEA à la demande d'Etats Membres sur le territoire desquels des problèmes d'hydrologie se posaient.

Par exemple, un projet exécuté dans la région du Hodna en Algérie porte sur une étude des eaux souterraines de deux couches aquifères de la région du Chott-el-Hodna où les eaux de ruissellement des montagnes voisines s'évaporent complètement. La teneur en isotopes lourds de l'eau de la couche aquifère profonde est inférieure à celle de la couche moins profonde, bien que les deux couches soient probablement alimentées par les eaux de la même région. Néanmoins, les mesures du carbone 14 qui fournissent des âges de l'ordre de quelque 30 000 ans pour la couche profonde indiquent que la différence de la composition isotopique stable est due très probablement à un effet de l'âge (changement climatique depuis l'époque de l'alimentation). La couche aquifère profonde est reliée à la couche moins profonde par un cône de déjection (découvert par les géophysiciens). Dans cette région, la teneur en ^{14}C de l'eau de la couche profonde augmente en même temps que la teneur en ^{18}O et C.

Ceci indique nettement une alimentation lente par les eaux de la couche peu profonde. Dans cette étude, des mesures du tritium ont aussi mis en évidence une alimentation de la couche peu profonde par les oueds.

Des analyses des isotopes stables et du tritium ont été utilisées dans l'île volcanique de Cheju (République de Corée) afin de définir l'époque et la zone d'alimentation des eaux souterraines et de déterminer la nature du mélange des différentes sources d'eau souterraine et d'évaluer leurs temps de séjour. Après avoir procédé à un échantillonnage préliminaire de 14 sources, 8 puits et deux cours d'eau dans différentes parties de l'île, on a choisi 9 points pour y effectuer des échantillonnages périodiques. Toutes les eaux dans lesquelles des échantillons ont été prélevés contenaient des quantités importantes de tritium thermonucléaire, ce qui indique une circulation rapide dans les différents systèmes d'eau souterraines. Sur la base de leur teneur en tritium et de leur composition en isotopes stables, les eaux ont été classées en plusieurs catégories selon leur régime.

Les sources situées à altitude moyenne et élevée présentaient une concentration relativement forte de tritium et une grande diversité de composition en isotopes stables.

Ce puits dans le Whasoon-ri était le point de prélèvement No 7 pour l'étude d'hydrologie isotopique faite dans l'île de Cheju. L'enceinte en maçonnerie contient l'eau réservée à la boisson; on ne peut faire la lessive ou abreuver les animaux qu'à l'extérieur. ►



On en a déduit que le temps de transit des eaux était court et qu'il y avait peu de mélange, ce qui concorde de manière générale avec l'hydrogéologie de la région. Par ailleurs, certaines sources abondantes de la région côtière avaient une concentration en tritium beaucoup plus faible, mais présentaient aussi une grande diversité de composition en isotopes stables. Cela donnait à penser qu'elles avaient une origine commune avec les sources de haute altitude, mais que le temps de transit était un peu plus long. Les petites sources et puits situés près de la côte orientale de l'île avaient une concentration en tritium semblable mais, en même temps, une teneur en isotopes lourds un peu plus élevée. Celle-ci semblait correspondre au fait que le terrain est un peu plus bas dans la partie orientale de l'île.

Bien que la période couverte par les analyses du tritium ait été relativement courte, on a évalué le temps de transit moyen des eaux. On a adopté un modèle de réservoir à bon mélange, en supposant que l'alimentation n'a effectivement eu lieu que lorsque les précipitations mensuelles étaient supérieures à 100 mm. Les valeurs estimées étaient de 2 à 8 1/2 ans, les temps les plus longs correspondant à des eaux évacuées par un système lenticulaire étendu d'eau douce bien mélangée.

Un projet intéressant la plaine côtière du Nicaragua consiste à étudier le mécanisme d'alimentation d'une nappe phréatique. La zone du projet est un grand quadrilatère d'environ 30 X 55 km, orienté NO-SE. Il est limité au SO par l'Océan pacifique et au NE par la ligne de partage des eaux de la chaîne volcanique, la Cordillera de Marrabios. Dans le sens de la largeur, le relief monte uniformément jusqu'à 200 m environ au-dessus du niveau de la mer à quelque 20 à 25 kilomètres de la côte (Plaine de Chinandega), et s'élève ensuite brusquement jusqu'à la crête de la Cordillère, qui a une altitude moyenne d'environ 1000 m, avec un sommet de 1745 m. La plaine est recouverte de «tobas» quaternaires, qui sont des dépôts de cendre, reposant sur des terrains du Tertiaire. On a utilisé les isotopes stables et le tritium pour étudier les problèmes du mécanisme de l'alimentation du réseau d'eaux souterraines dans la région, en cherchant notamment à déterminer l'importance relative de l'alimentation au niveau des plaines et de celle provenant des pentes élevées de la Cordillère. En procédant à des prélèvements périodiques à 5 stations pluviométriques et dans deux sources, toutes situées à des niveaux différents, on a pu établir la relation entre l'altitude et la composition en isotopes stables de l'eau d'alimentation. On procède périodiquement à des échantillonnages de l'eau dans des puits peu profonds et profonds de la plaine, afin de déterminer la composition isotopique de l'alimentation locale, ainsi que celle des eaux souterraines plus profondes. Les puits assez peu profonds de la plaine dont l'eau est la plus riche en isotopes stables et en tritium ont donné des indications sur la composition isotopique de l'alimentation locale. La composition en isotopes stables assez uniforme des puits de forage comme la composition isotopique de l'alimentation locale d'une part, et la composition en isotopes stables de l'eau d'alimentation provenant des pentes élevées d'autre part, ont permis d'étudier l'importance relative de l'alimentation de plaine et de l'alimentation provenant des pentes élevées. On a constaté que l'alimentation provenant des pentes d'une altitude moyenne d'environ 500 m est proportionnellement beaucoup plus élevée. En connaissant la teneur en tritium des eaux des puits de la plaine il a été possible d'étudier le temps de transit des eaux d'alimentation des nappes souterraines et on est parvenu à la conclusion que l'eau des puits peu profonds avait au plus trois ans et était d'origine locale et que l'eau extraite des puits de forage avait un temps de transit moyen de l'ordre de 20 ans.

Des études hydrologiques semblables sont actuellement en cours dans les pays suivants: Autriche, Brésil, Bolivie, Colombie, Crète, Iles Canaries, Jamaïque, Katar, Liban, Mexique, Sénégal, Turquie et Yougoslavie.