

Planche 6.2 Isotopes dans le cycle de l'eau

Introduction

La plupart des éléments constituant la matière représente un mélange d'isotopes stables ou radioactifs qui diffèrent les uns des autres par le nombre de neutrons contenus dans leur noyau atomique. La différence de masse provoque un fractionnement isotopique au cours des processus physico-chimiques, les isotopes légers étant globalement plus mobilisables que les isotopes lourds. Les rapports isotopiques entre l'oxygène-18 et l'oxygène-16 d'une part ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, oxygène resp. à 10 et 8 neutrons), entre le deutérium et l'hydrogène d'autre part ($^2\text{H}/^1\text{H}$, hydrogène resp. à 1 et 0 neutrons) sont d'un intérêt particulier pour étudier les processus de fractionnement isotopique dans le cycle de l'eau. Le rapport isotopique entre le tritium et l'hydrogène ($^3\text{H}/^1\text{H}$, hydrogène resp. à 2 et 0 neutrons) donne des informations sur l'âge de l'eau. Ces isotopes sont présents en effet dans toutes les eaux, et sont de ce point de vue les traceurs naturels idéaux des phénomènes hydrologiques.

Les isotopes stables de la molécule d'eau

Pour un million de molécules d'eau (soit autant d'atomes d'oxygène et le double d'atomes d'hydrogène), on observe en moyenne près de 2000 atomes d'oxygène-18 et 300 de deutérium. Cette composition varie cependant après changement de phase, par fractionnement isotopique. Au cours de l'évaporation par exemple, les molécules constituées d'isotopes légers ont tendance à se déplacer vers la phase gazeuse. L'eau restante s'enrichira donc en isotopes lourds. Au contraire, pendant la condensation de la vapeur, les molécules lourdes sont entraînées plus facilement vers le condensat que les molécules légères. On dira que la phase vapeur s'appauvrit en isotopes lourds. Le rapport entre les coefficients de fractionnement de l'oxygène-18 et du deutérium est responsable de la relation linéaire de la figure 7. Les points s'alignent suivant une droite météorique représentative de la région considérée. L'écart des points représentant des eaux naturelles par rapport à ces droites de référence peut mettre en évidence des processus tels que l'évaporation avant l'infiltration ou des échanges avec les roches aquifères (eaux thermales par exemple).

Les très faibles variations de teneur en isotopes stables sont mesurées par spectrométrie de masse. Les rapports isotopiques sont exprimés en ‰, écart relatif en ‰ entre l'échantillon et un standard international représentatif de l'eau océanique (VSMOW, v. légende de la carte). La plupart des eaux présentes à la surface de la terre sont issues de ce réservoir océanique par évaporation et, de ce fait, sont appauvries en isotopes lourds par rapport au standard (‰ négatif).

Variations climatiques

Le fractionnement isotopique au cours des changements de phase étant fonction de la température, les rapports isotopiques dans les précipitations montrent une forte saisonnalité (fig. 3): en été, les précipitations sont enrichies en oxygène-18, alors qu'en hiver, avec les températures moyennes basses, elles en sont appauvries. Ce phénomène est tamponné par mélange dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines (v. carte). La distribution annuelle des rapports isotopiques au cours des trois dernières décennies, si elle est très différente d'une année à l'autre (fig. 2), montre cependant une tendance à l'enrichissement en isotopes lourds (fig. 1). Cette situation pourrait être liée au réchauffement global du climat ou à une modification de l'origine des précipitations. La figure 6 montre que ces variations de rapport isotopique s'observent aussi à l'échelle de l'averse, le phénomène étant ici à relier à l'appauvrissement progressif de certaines parties de la masse nuageuse au cours de la progression du front chaud ou froid. A l'arrière des fronts, les précipitations sont typiquement appauvries à l'aplomb du centre de la masse nuageuse. Les rapports isotopiques moyens à la station de Locarno-Monti (fig. 1) montrent également la sensibilité aux conditions climatiques régionales, les valeurs proches de zéro attestant d'eau enrichie d'origine méditerranéenne et de la douceur du climat.

Effets d'altitude

Quand un nuage s'élève aux abords d'un relief, l'eau qui se condense s'appauvrit peu à peu en isotopes lourds (fig. 1, Meiringen – Guttannen – Grimsel). Ce phénomène est dû à la diminution de la température de condensation avec la baisse de pression et à d'autres facteurs mineurs tels que l'évaporation des gouttes de pluie au cours de leur chute par exemple. Malgré la multiplicité des paramètres agissant sur ce phénomène, les isotopes stables définissent une relation plus ou moins linéaire avec l'altitude (fig. 4). Les isotopes stables sont donc particulièrement bien adaptés à la détermination de l'altitude moyenne d'un bassin versant en régions montagneuses (fig. 12), si l'on tient compte de la saisonnalité des variations isotopiques dans les pluies, ainsi que de la variation spatiale et temporelle de l'effet d'altitude (fig. 4,5). En général, des analyses isotopiques sur des échantillons cumulatifs mensuels sont suffisantes, mais on veillera à adapter la fréquence de prélèvement et la position des pluviomètres au problème à résoudre et au budget à disposition. Les contrastes de rapport isotopique permettent également l'identification des composantes participant à une crue et mettant en jeu des eaux fluviales plus pauvres en isotopes lourds (du fait de l'altitude élevée de leur bassin versant) que les pluies locales et que l'eau des nappes souterraines (fig. 11).

L'isotope radioactif de la molécule d'eau

Le tritium est le seul isotope radioactif de l'hydrogène. Instable, il se désintègre avec une période de demi-vie de 12.43 années, en émettant un électron. C'est ce rayonnement β^- qui permet de déterminer par compteur à scintillation les quantités infimes de tritium présentes dans les eaux naturelles. Par commodité, une unité spécifique à la mesure du tritium dans l'eau a été introduite: l'unité tritium (TU, v. légende de la carte).

Le tritium naturel est produit par action des rayons cosmiques sur l'azote atmosphérique. Cependant, la majeure partie du tritium actuel est d'origine anthropogène. Entre 1952 et 1963, apogée de la course à la bombe atomique, la radioactivité en tritium des précipitations a été multipliée par 1000 du fait des essais nucléaires en atmosphère. Depuis 1963, date de la signature d'un traité d'interdiction des essais nucléaires en atmosphère, la quantité de tritium diminue régulièrement (fig. 8).

L'utilisation industrielle pacifique du tritium a relayé les usages militaires (fig. 8). Certaines régions industrielles de Suisse sont caractérisées par des émissions importantes; c'est le cas dans le Jura (industrie horlogère) ainsi qu'à Berne et à Teufen dans le canton d'Appenzell (fabrication d'ampoules lumineuses). Les centrales nucléaires de Gösgen, Leibstadt, Beznau et Mühleberg, ainsi que l'Institut Paul Scherrer (PSI; Villigen, Argovie) produisent également des émissions anthropogènes importantes de tritium dans le cycle de l'eau. L'ensemble de ces activités conduit à de plus hautes concentrations en tritium dans les éléments du cycle de l'eau dans les environs immédiats des installations citées [14]. A l'aval des décharges de déchets domestiques ou industriels, souvent riches en tritium avant l'«Ordonnance sur la radioprotection» ORaP du 22.6.1994, le tritium peut être utilisé comme traceur de la pollution des nappes souterraines (fig. 10).

Détermination du temps de séjour des eaux souterraines

Le développement durable des ressources en eaux souterraines nécessite de pouvoir mesurer l'âge de l'eau. La radioactivité du tritium en fait un outil particulièrement bien adapté à la datation par modèles de mélange d'eaux vieilles de quelques dizaines d'années au plus. L'effet du système hydrogéologique sur les concentrations en tritium est simulé numériquement à l'aide de modèles de mélange. La figure 9 donne un aperçu de la démarche destinée à déterminer le temps de séjour des eaux souterraines.

Le réseau fédéral d'observation des isotopes

Le Service hydrologique et géologique national (SHGN) en collaboration avec l'Université de Berne (Institut de physique) et l'Université de Lausanne (Institut de minéralogie et pétrographie), exploite depuis 1992 un réseau d'observation destiné à mettre à disposition des praticiens des séries de mesures; celles-ci servent de référence pour l'interprétation des données isotopiques [10,11]. Les analyses isotopiques sont effectuées par les deux instituts universitaires cités ci-dessus. Les stations suisses du réseau mondial de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), fonctionnant pour certaines depuis 1966, y ont été intégrées. Le réseau fédéral compte actuellement 18 stations, dont 11 pour les précipitations, 6 pour les eaux fluviales, et une récente station pour les eaux souterraines (source de Lutry, molasse burdigalienne du Jorat, station du GEOLEP). Toutes les données sont centralisées au SHGN et mises à la disposition des intéressés. Un groupe d'experts («Isotopes et environnement»), présidé par le SHGN, suit le fonctionnement du réseau. Un inventaire des principales stations d'observation des isotopes de la molécule d'eau en Suisse, pour la période 1986–1998, a été réalisé par le SHGN avec la collaboration de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (GEOLEP) (v. cartes, tableau). Cet inventaire peut être consulté par l'intermédiaire du SHGN (CDS, Catalogue of Data Sources).

Conclusion

Si les isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène ne sont pas les seuls isotopes utilisables en hydrologie (on utilise aussi les isotopes du carbone, du soufre, de l'azote, du plomb, de l'uranium, du thorium, du strontium, de l'argon, du radon ou du krypton), ils sont cependant présents dans les molécules d'eau. De ce fait, ils sont les seuls traceurs réellement conservatifs en hydrologie. Les hydrologues et les hydrogéologues disposent avec les méthodes isotopiques d'un outil performant et polyvalent, dont les possibilités d'application s'étendent bien au-delà des quelques exemples présentés ci-dessus [1,2]. Le présent travail a été réalisé sur mandat du SHGN. De la part du SHGN, le projet a été suivi par J.-P. Tripet, P. Buttet, D.A. Grasso, T. Herold et R. Kozel. Le groupe d'experts «Isotopes et environnement» a procédé à un examen attentif de la planche, et a contribué à sa mise au point par de nombreuses suggestions.

Bibliographie

- [1] **Clark, I., Fritz, P. (1997):** Environmental isotopes in hydrogeology. New York.
- [2] **Etcheverry, D. (1997):** Valorisation des méthodes isotopiques dans la pratique de l'hydrogéologie (oxygène-18, deutérium, tritium). Rapport interne du GEOLEP (EPF de Lausanne) pour le Service hydrologique et géologique national, Berne.
- [3] **Etcheverry, D., Parriaux, A. (1998):** Les méthodes isotopiques dans la pratique de l'hydrogéologie. In: Gas–Wasser–Abwasser 1/98:10–17, Zürich.
- [4] **Etcheverry, D., Perrochet, P. (1999):** Reservoir theory groundwater transit-time distributions and lumped parameter models. In: International Atomic Energy Agency (Ed.): Proc. Int. Symp. Isotope Techniques in Water Resources Development and Management, 10–14 May, Vienna (CD-ROM), Wien.
- [5] **Etcheverry, D., Perrochet, P. (2000):** Direct simulation of transit-time distributions using the reservoir theory. In: Hydrogeology Journal 8:200–208, Berlin, Heidelberg.
- [6] **Iorgulescu, I. (1997):** Analyse du comportement hydrologique par une approche intégrée à l'échelle du bassin versant. Application au bassin versant de la Haute-Mentue, Thèse no. 1613 de l'EPFL, Lausanne.
- [7] **Kissling, O. (1998):** Anwendung und Evaluation verschiedener Methoden im Rahmen der Voruntersuchungen belasteter Standorte am Beispiel zweier ehemaliger Deponien im Aaregäu (SO). Dissertation Nr. 12754 der ETHZ, Zürich.
- [8] **Maréchal, J.-C. (1998):** Les circulations d'eau dans les massifs cristallins alpins et leurs relations avec les ouvrages souterrains. Thèse no. 1769 de l'EPFL, Lausanne.

- [9] **Rozanski, K., Araguas-Araguas, L., Gonfiantini, R. (1993):** Isotopic patterns in modern global precipitation. In: Swart, P.K. et al. (Eds.): *Climate Change in Continental Isotopic Records*, Geophysical Monograph Series 78/1993:1–36, Washington.
- [10] **Schotterer, U. et al. (1995):** Isotope im Wasserkreislauf. Ein neues eidgenössisches Messnetz. In: *Gas–Wasser–Abwasser* 9/95:714–720, Zürich.
- [11] **Schotterer, U. et al. (2000):** Das Schweizer Isotopen-Messnetz: Trends 1992–1999. In: *Gas–Wasser–Abwasser* 10/2000:733–741, Zürich.
- [12] **Stichler, W., Schotterer, U. (2000):** From accumulation to discharge: modification of stable isotopes during glacial and post-glacial processes. In: Gibson, J.J., Prowse, T.D. (Eds.): *Hydrological Processes Special Issue: Isobalance*, Vol. 14/8:1423–1438, New York.
- [13] **Vitvar, T. (1998):** Water residence times and runoff generation in a small prealpine catchment (Rietholzbach, Northeastern Switzerland). Dissertation Nr. 12298 der ETHZ, Zürich.
- [14] **Völkle, H., Neu, A., Weimer, S. (1995):** Altlast Tritium? Tritium aus industriellen Anwendungen in der Umwelt: Messungen in Süddeutschland und in der Schweiz. In: *Strahlenschutzpraxis* 3/95:30–35, Köln.