

Les traceurs: rendre visible l'invisible

Les traceurs sont des unités de mesure utilisées dans les sciences de l'environnement pour rendre visible certains processus et pour tenter de comprendre certains phénomènes encore méconnus. C'est par exemple grâce à des traceurs que les océanographes ont pu éclaircir le mystère du point d'aboutissement du Gulf Stream. Des questions similaires concernant les eaux de surface et souterraines sont traitées à l'EAWAG en faisant appel à la mesure d'isotopes. L'étude de traces laissées dans les archives naturelles permet de cerner d'éventuelles modifications de l'environnement survenues au cours du temps. Un nouveau domaine d'utilisation des traceurs réside dans l'étude de processus biologiques. Les biomarqueurs permettent p. ex. d'étudier l'effet de polluants sur divers organismes.

Sur les traces du Gulf Stream

Nous Européens bénéficions d'un climat relativement doux grâce au Gulf Stream qui irrigue nos côtes avec des eaux marines tropicales. Le Gulf Stream transporte vingt fois plus d'eau que tous les fleuves de la Terre réunis. Mais le courant marin doit bien redescendre en profondeur quelque part, sinon l'Atlantique Nord finirait par se transformer en un gigantesque château d'eau... Dans les années 70, une série d'expéditions océanographiques avait été lancée pour éclaircir le mystère du courant marin. Elles ont montré que les deux grandeurs les plus fiables pour cette étude étaient la température et le degré de salinité de l'eau de mer. La figure 1 présente deux coupes longitudinales de l'océan Atlantique [1]. Au cours de son déplacement vers le Nord, une partie de l'eau du Gulf Stream s'évapore, ce qui cause les précipitations fréquentes qui caractérisent l'Europe de l'Ouest. Le degré de salinité de l'eau augmente suite à l'évaporation. D'autre part, l'eau se refroidit en allant vers le Nord et elle se mélange avec l'eau de l'océan glacial dans lequel la formation de la banquise contribue également à augmenter la salinité. Au Nord de l'Islande, la température et le degré de salinité de l'eau atteignent des valeurs critiques. La densité de l'eau augmente et le Gulf Stream plonge jusqu'à une profondeur de 3000 m où il retourne vers le Sud; on parle alors d'eaux profondes nord-atlantiques. Au niveau de

Gibraltar, l'eau de la Méditerranée, chaude et très salée, forme une couche au-dessus de ce courant d'eaux profondes. Au niveau de l'Afrique du Sud, deux langues d'eau antarctique viennent à sa rencontre. Une partie de cette eau est plus froide mais moins salée que l'eau profonde atlantique et se déplace vers le Nord sur le fond de

l'océan. Il est donc possible de décrire la circulation très lente des masses d'eau en profondeur uniquement à l'aide des deux grandeurs que sont la température et le degré de salinité de l'eau. De tels paramètres de mesure qui permettent de rendre visible des processus cachés sont appelés des traceurs. La température d'une masse d'eau ne contient pas uniquement des informations sur les grands courants. Des variations de température minimales peuvent également trahir des processus de brassage turbulent qui se produisent à petite échelle. L'article de A. Wüest à la page 16 montre bien comment on peut exploiter de telles mesures de microstructures thermiques effectuées dans un lac.

Sources et puits

Les hommes se demandent depuis la nuit des temps d'où vient l'eau des sources et où s'infiltrent les rivières. Les premiers essais de marquage pour l'étude des eaux

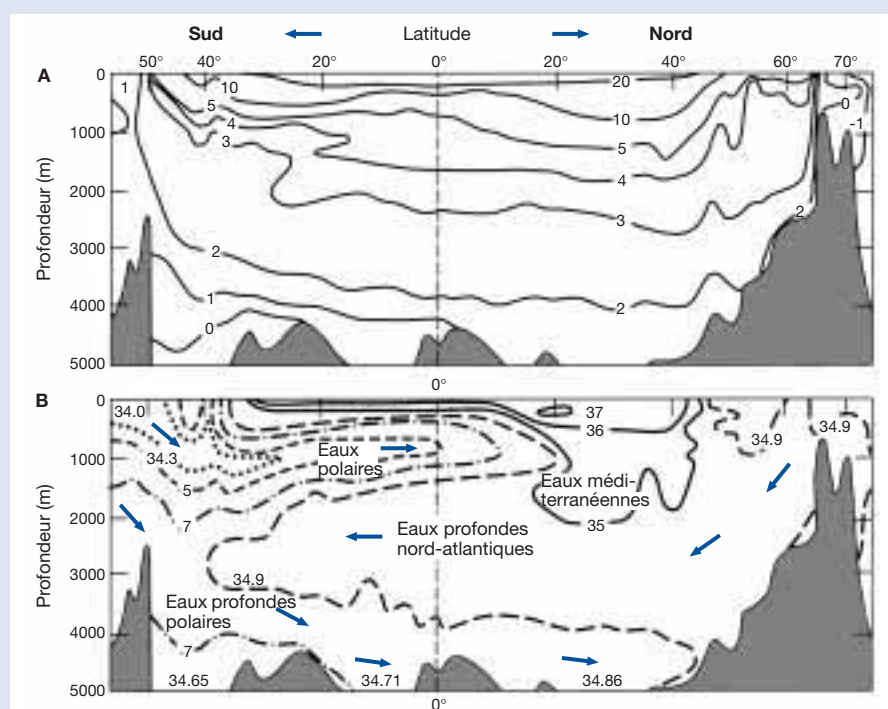


Fig. 1: Coupe longitudinale de l'océan Atlantique. Les lignes indiquent des zones de même température exprimée en °C (A) et des zones de même salinité exprimée en ‰ (B).

remontent à près de 2000 ans. Au temps des romains, l'eau du Jourdain avait déjà été marquée avec de la balle de céréales pour déterminer le cheminement souterrain d'une source karstique [2]. Depuis env. 50 ans, on utilise à cet effet comme traceurs des colorants fluorescents injectés dans le système. Il est évidemment plus élégant de mesurer des composés déjà présents dans le système étudié. De tels traceurs peuvent être géogènes (d'origine naturelle) ou anthropogènes (produits par l'homme). Comme exemple de traceur géogène, citons le rapport des isotopes d'oxygène $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dans l'eau de pluie [3] qui dépend de l'altitude à laquelle elle tombe (Fig. 2). Grâce aux innovations techniques réalisées au niveau de la préparation des échantillons, il est aujourd'hui beaucoup plus facile qu'il y a encore 10 ans de mesurer les signaux isotopiques de l'eau. Le rapport des isotopes d'oxygène donne une bonne indication sur l'altitude moyenne de provenance des eaux d'une rivière ou d'un aquifère.

A la recherche du temps passé

La détermination du temps de séjour de l'eau dans un aquifère est nécessaire dans

le domaine de l'approvisionnement en eau potable, pour l'analyse des risques dans les cas de pollution et pour l'analyse d'écosystèmes qui dépendent des eaux souterraines, comme p. ex. ceux des zones alluviales. De même que le détective demande au suspect «Où étiez-vous le 23 septembre autour de 19 h 30?», le «détective de l'environnement» se demande «combien de temps cette eau a-t-elle circulé dans l'aquifère?» Pour répondre à ce genre de questions, on dispose de divers traceurs anthropogènes. Dans le passé, le fréon ou les chloro-fluoro-carbones (CFC) étaient pratiquement inexistantes. A cause de leurs propriétés particulières, les CFC ont été de plus en plus employés en tant que gaz propulseurs pour les sprays et comme liquides réfrigérants dans les réfrigérateurs. Ceci a entraîné une augmentation continue de leur concentration dans l'atmosphère (Fig. 3) jusqu'à ce que l'on réalise qu'ils contribuaient à détruire la couche d'ozone [4]. Entre-temps, la production de fréon est limitée par le Protocole de Montréal et on emploie des produits de remplacement. Chaque instant des 50 dernières années est caractérisé par une concentration spécifique en CFC dans l'atmosphère et par une concentration d'équilibre correspondante dans l'eau. Si l'on mesure la concentration de fréon dans une source, dans un aquifère ou au fond d'un lac, on peut estimer la date à laquelle l'eau a été en contact avec l'atmosphère pour la dernière fois. En plus des CFC, on peut également utiliser les gaz rares pour déterminer l'âge de l'eau. L'article de R. Kipfer à la page 20 traite de l'emploi de ces éléments pour la datation des eaux souterraines.

Les traceurs les plus connus pour la datation et la détermination des constantes de temps dans l'étude de processus environnementaux sont les radioisotopes qui, selon les lois de la désintégration radioactive, se désintègrent avec un temps de demi-vie donné. Dans le domaine de l'étude des cours d'eau, il est p. ex. intéressant de déterminer la vitesse d'échanges d'eau entre une rivière et le milieu interstitiel de son lit de gravier. Pour qu'un cours d'eau fonctionne normalement, il est primordial qu'il entretienne de bons échanges avec les nappes phréatiques proches de ses rives. Les milieux interstitiels constituent un habitat privilégié pour de nombreux organismes aquatiques et contrôlent les échanges de nutriments entre le cours d'eau et le milieu terrestre environnant. L'article de E. Hoehn à la page 18 montre comment on peut distinguer divers habitats phréatiques d'une zone alluviale à l'aide du radioisotope natu-

rel qu'est le radon. On dispose heureusement à l'heure actuelle de méthodes extrêmement sensibles pour détecter les radioisotopes. Elles permettent p. ex. de détecter des concentrations minimales de carbone radioactif ^{14}C , de l'ordre de 10^{-15} g (soit env. 1 million d'atomes). Le développement de la spectrométrie de masse à accélérateur a considérablement étendu le domaine d'application de telles méthodes de datation à l'aide de traceurs.

Fouiller dans les archives de la nature

D'autres projets ont pour but d'étudier la dimension temporelle de processus environnementaux. Le «détective de l'environnement» se trouve alors face à un nouveau problème: pour étudier le comportement d'un système sur une longue période de temps, il faut disposer d'échantillons prélevés au long de la période étudiée. Etant donné que personne ne s'intéresse à des projets de recherche s'étalant sur plus de quelques années, l'étude de modifications lentes se fait sur la base de la reconstruction de leur évolution historique. Il est cependant fort improbable que des échantillons adéquats aient été prélevés à l'avance ou que les mesures nécessaires aient été effectuées en prévision de quelque recherche ultérieure. On est donc forcé de recourir à des archives qui stockent les informations de manière chronologique. On trouve p. ex. au fond de nos lacs des sédiments qui se forment continuellement couche après couche et qui renferment les informations les plus diverses sur les processus chimiques, physiques et biologiques ayant eu lieu dans les lac et leur environnement immédiat (Fig. 4). Il s'agit alors de lire ces informations et de les interpréter. L'article de W. Giger à la page 10 indique les traces laissées par les détergents dans les sédiments et révèle par l'analyse des sédiments les changements survenus dans la composition de ces produits ainsi que dans la manière dont ils sont biodégradés dans les stations d'épuration. Mais les sédiments renferment également des informations sur des processus naturels. On fait souvent appel à des indicateurs géochimiques pour évaluer l'intensité de processus naturels à partir des archives de la nature. L'article de G. Friedl à la page 14 illustre bien cette démarche. D'autres groupes de recherche de l'EAWAG sont actuellement impliqués dans des projets internationaux visant à reconstituer les conditions environnementales qui régnaient dans un passé lointain. Ces projets s'appuient notamment sur l'analyse de carottes

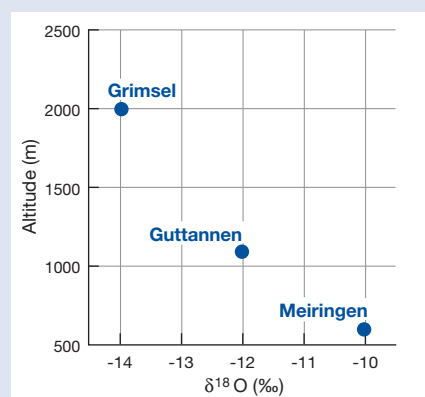


Fig. 2: Isotope d'oxygène $\delta^{18}\text{O}$ dans les précipitations de trois stations voisines situées à trois altitudes différentes. $\delta^{18}\text{O}$: écart du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ par rapport à un standard en ‰.

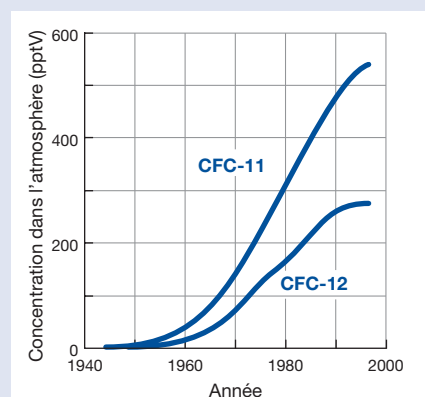


Fig. 3: Augmentation des concentrations en CFC 11 et CFC 12 dans l'atmosphère à partir de 1950. Unité: pptV = 10^{-9} parties volumiques.

de glace prélevées au Groenland ainsi que sur celle des sédiments du Lac Baïkal en Sibérie. De tels programmes interdisciplinaires visent à une meilleure compréhension des changements environnementaux actuels et futurs au vu de ceux qui se sont produits au cours des derniers millénaires. Le radioisotope de béryllium (^{10}Be) se forme dans l'atmosphère sous l'effet des rayons cosmiques [5]. Dans la glace du Groenland, ce radioisotope sert par exemple de traceur pour déterminer l'activité du soleil dans le passé. Les données recueillies permettent une évaluation plus exacte de l'influence du soleil sur l'évolution du climat et donc une quantification des changements climatiques causés par notre civilisation. Une comparaison des teneurs en ^{10}Be et en ^{14}C a d'autre part révélé une diminution de la formation globale d'eau profonde à la fin de la dernière époque glaciaire [6], ce qui signifie que le Gulf Stream a lui aussi une histoire mouvementée!

Regard sur la complexité de la biosphère

La biosphère constitue un système dynamique d'une extrême complexité. Grâce à l'énergie du soleil, un nombre incalculable de processus biologiques se produisent à diverses échelles spatiales et temporelles et ils sont bien souvent reliés entre eux. Trois instruments méthodologiques peuvent être utilisés pour étudier certains processus de manière ciblée: les isotopes stables, les sondes génétiques et les biomarqueurs. Lors de processus biologiques comme la photosynthèse ou la dénitrification, ce sont les isotopes les plus légers d'un élément qui sont transformés le plus rapidement par voie enzymatique. Ce phénomène entraîne en général un enrichissement des produits

biologiques en isotopes légers (^{12}C ou ^{14}N) et une accumulation d'isotopes lourds dans la substance de départ (^{13}C ou ^{15}N). Un décalage du rapport isotopique naturel donne donc une indication sur la nature et l'intensité des processus biologiques impliqués. On peut d'autre part employer comme traceurs des substances enrichies d'un isotope stable, comme p. ex. les nitrates ($^{15}\text{NO}_3$). Les traceurs à isotopes stables présentent l'avantage de ne pas libérer de radiations et donc de pouvoir être utilisés sans hésitation dans la nature. Les nitrates peuvent être utilisés de diverses manières au niveau biologique. Les microorganismes hétérotrophes les utilisent pour produire de l'azote atmosphérique (N_2) ou de l'ammonium (NH_4^+), les plantes les absorbent pour leur alimentation et les transforment en azote organique. Dans des conditions particulièrement favorables, il est possible de déceler les sources et puits de nitrates naturels à l'aide d'un spectromètre de masse [7]. Le recours aux nitrates marqués permet p. ex. de déterminer les taux de conversion par dénitrification dans les lacs et cours d'eau [8]. L'article de L. Zwank à la page 6 traite de l'utilisation d'isotopes stables comme traceurs permettant de suivre la dégradation de polluants chimiques dans les eaux souterraines. Dans ce domaine d'application, on cherche souvent à savoir si une diminution de la concentration de certains polluants le long d'un écoulement est due à un phénomène de dilution ou bien le résultat d'une dégradation microbienne ou chimique. On reconnaît en général un phénomène de biodégradation à un décalage net des rapports isotopiques.

L'écologie microbienne moderne ne s'intéresse pas uniquement à l'identification de certaines substances et à la détermination de leur taux de conversion. Elle cherche également à connaître la nature des microorganismes qui interviennent et le lieu de leur action. A l'aide de sondes génétiques, on est actuellement en mesure de déterminer la répartition spécifique des microorganismes dans des échantillons prélevés dans la nature. Pour les réaliser, on marque une petite séquence génétique d'ARN ribosomique avec un colorant fluorescent. Ces traceurs biomoléculaires permettent de marquer des groupes spécifiques, comme p. ex. les bactéries méthanogènes contenues dans un échantillon d'eau ou de sédiment en vue de leur analyse ultérieure au microscope. Cette technique présente l'avantage de pouvoir étudier des microorganismes actifs dont il est impossible d'obtenir des cultures en laboratoire. Cette

méthode est présentée plus en détail dans l'article de K. Zepp à la page 12.

L'accessibilité grandissante des informations génétiques des divers organismes permet une identification fiable des acteurs intervenant dans le jeu complexe des phénomènes de la biosphère. L'information contenue dans les protéines et le métabolisme d'un organisme est cependant encore plus diversifiée. C'est à ce niveau qu'intervient un nouveau groupe de traceurs, celui des biomarqueurs. L'analyse de substances intervenant dans le métabolisme biochimique d'un organisme permet p. ex. de savoir si l'être vivant étudié a été exposé à un polluant toxique. L'article de R. Eggen à la page 8 expose ce nouveau concept.

Ce bref tour d'horizon a certainement montré que les diverses méthodes faisant intervenir des traceurs sont devenu des outils très précis des sciences de l'environnement. Le succès de ce domaine de recherche dépend cependant en tout premier lieu de la définition de questions pertinentes, intéressantes et orientées vers l'avenir.



Jürg Beer, physicien, dirige le groupe de travail «Traceurs radioactifs» de la division «Eaux de surface». Chargé de cours à l'EPF de Zurich. Domaine de recherche: Radionucléotides cosmogènes, influence de l'activité solaire sur le climat.



Bernhard Wehrli, chimiste, dirige la division «Eaux de surface». Professeur de chimie aquatique à l'EPF de Zurich. Domaine de recherche: Cycles des nutriments et du carbone dans les eaux.

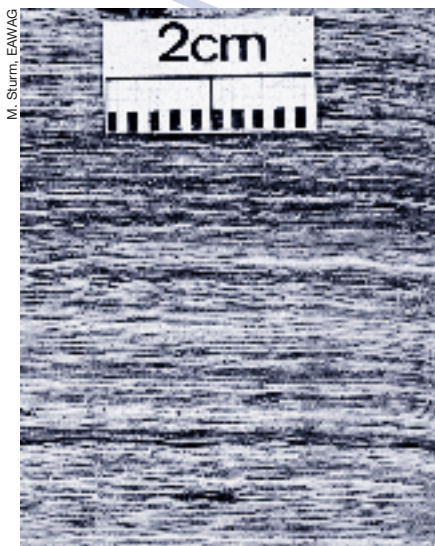


Fig. 4: Carotte de sédiments issue du Baldeggsee.

- [1] Broecker W.S., Peng T.-H. (1982): Tracers in the sea. LDGO, Columbia University, New York, 690 p.
- [2] Käss W. (1992): Geohydrologische Markierungstechnik. Borntraeger, Berlin, 519 p.
- [3] Siegenthaler U., Oeschger H. (1980): Correlation of ^{18}O in precipitation with temperature and altitude. *Nature* 285, 314–317.
- [4] IPCC (1996): Climate Change 1995. Cambridge Univ. Press, 878 p.
- [5] Beer J., Mende W., Stellmacher R. (2000): The role of the sun in climate forcing. *Quaternary Science Review* 19, 403–415.
- [6] Muscheler R., Beer J., Wagner G., Finkel R. C. (2000): Changes in deep-water formation during the Younger Dryas event inferred from ^{10}Be and ^{14}C records. *Nature* 408, 567–570.
- [7] Mengis M., Walther U., Bernasconi S.M., Wehrli B. (2001): Limitations of using $\delta^{18}\text{O}$ for the source identification of nitrate in agricultural soils. *Environmental Science and Technology* 35, 1840–1844.
- [8] Steingruber S.M., Friedrich J., Gächter R., Wehrli B. (2001): Measuring denitrification in sediments with the ^{15}N isotope pairing technique (^{15}N IPT). *Applied and Environmental Microbiology* 67, 3771–3778.