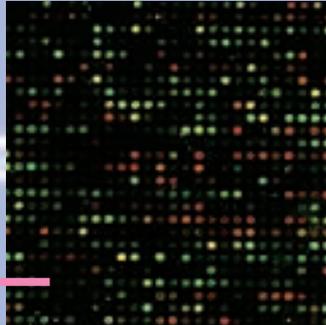


# Traceurs: Eléments de dépistage de la recherche environnementale

Détermination de la composition isotopique de polluants chimiques **6**



L'emploi de traceurs biologiques en écotoxicologie **8**



Les sédiments – archives pour détergents **10**



«Les facteurs de risque dans l'eau»  
Interview avec Ruth Gonseth **22**



## Traceurs: Éléments de dépistage de la recherche environnementale

2 Un travail de détective (Editorial)

### Article thématique

3 Les traceurs: rendre visible l'invisible

### Recherches actuelles

6 Détermination de la composition isotopique de polluants chimiques

8 L'emploi de traceurs biologiques en écotoxicologie

10 Les sédiments – archives pour détergents

12 L'ARN: Un traceur pour identifier des microorganismes

14 L'argent: Nouveau traceur pour l'étude de la production de diatomées

16 Les microstructures thermiques: Traceurs pour l'étude des turbulences et du brassage des eaux

18 Distinction de divers habitats phréatiques à l'aide du radon utilisé comme traceur

20 Éléments conservatifs vers de nouveaux horizons

### Forum

22 «Les facteurs de risque dans l'eau»  
Interview avec Ruth Gonseth

### Notes

24 Publications 2870–2987, livres

27 Divers

**Editeur** Distribution et ©:  
EAWAG, Case postale 611, CH-8600 Duebendorf  
Tél. +41-1-823 55 11  
Fax +41-1-823 53 75  
<http://www.eawag.ch>

**Rédaction** Martina Bauchrowitz, EAWAG

**Traductions** Laurence Frauenlob-Puech, D-Waldkirch

**Conseillère linguistique** Sylvie Peter, EAWAG

**Copyright** Reproduction autorisée avec mention expresse des sources et envoi de deux justificatifs à la rédaction

**Parution** 3x par année en français, allemand et anglais

**Crédit photographique** Police municipale de Zurich, WWW, M. Sturm (EAWAG), S. Wey (Zurich)

**Maquette** inform, 8005 Zurich

**Graphisme** Peter Nadler, 8700 Kuesnacht

**Impression** sur papier recyclé

**Abonnements et changements d'adresse** Les nouveaux abonné(e)s sont les bienvenu(e)s!  
Le bulletin d'inscription se trouve au milieu de ce numéro.

# Un travail de détective



Bernhard Wehrli,  
chef de la division  
«Eaux de surface»

Sherlock Holmes, Philip Maloney, Guido Brunetti, Stoner McTavish et bien d'autres grands du roman policier forcent constamment l'admiration de leur entourage par leur capacité à tirer profit des moindres traces laissées par les criminels pour reconstituer les indices manquant à la résolution de leurs enquêtes. La recherche dans le domaine de l'environnement se déroule certes de manière moins spectaculaire mais la recherche d'indices fait également partie de notre travail quotidien. De nombreux phénomènes aquatiques se produisent bien à l'abri des yeux des chercheurs. Par exemple au cours de leur dégradation dans l'eau par les microorganismes, les nitrates qui sont incolores, lui-même invisible et inodore. On dispose certes de méthodes analytiques efficaces qui démontrent que les nitrates disparaissent des eaux, mais il reste à savoir où et comment cette dégradation se produit et quels sont les microorganismes qui en sont responsables.

L'inspecteur de police a souvent le choix entre deux stratégies: arrêter les suspects pour les interroger ou bien tenter de les attraper en flagrant délit. La recherche environnementale se trouve souvent devant des choix similaires: elle peut amener la nature au laboratoire et tenter des expériences en conditions aussi bien contrôlées que possible ou tenter de caractériser les phénomènes dans le milieu naturel à l'aide d'observations plus ou moins complexes. Si l'on opte pour la deuxième possibilité, les traceurs peuvent se révéler être des assistants précieux. Ils peuvent mettre sur la bonne voie ou bien rendre visible des phénomènes cachés. Certaines «méthodes d'investigation» de la recherche environnementale moderne sont présentées dans ce numéro.

Ces dernières années, l'EAWAG a considérablement investi dans la mise au point de méthodes faisant appel à des traceurs. Nos domaines d'activité vont de la caractérisation des turbulences en physique aquatique à celle de processus de biologie moléculaire en passant par l'étude de la dégradation et de la répartition des polluants. Pour pouvoir effectuer ce travail de détective, le scientifique doit pouvoir compter sur une infrastructure analytique moderne. Une collaboration fertile s'est établie entre divers groupes de recherche de l'EPF de Zurich et des laboratoires cantonaux, ce qui permet une utilisation commune de l'infrastructure nécessaire. L'EAWAG et l'EPF de Zurich ont par exemple fait l'acquisition en commun d'un spectromètre de masse pour l'analyse d'isotopes stables dans les molécules organiques.

Le séminaire du vendredi de l'EAWAG sera consacré au cours de ce semestre d'hiver aux traceurs isotopiques. Cette manifestation sert de point de rencontre à un public intéressés et aura lieu à partir de fin octobre tous les vendredis de 11 à 12h. Nous serions très heureux de vous y accueillir. Vous trouverez le programme sur notre page Internet: [www.eawag.ch/events/d\\_seminare.html](http://www.eawag.ch/events/d_seminare.html)



# 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

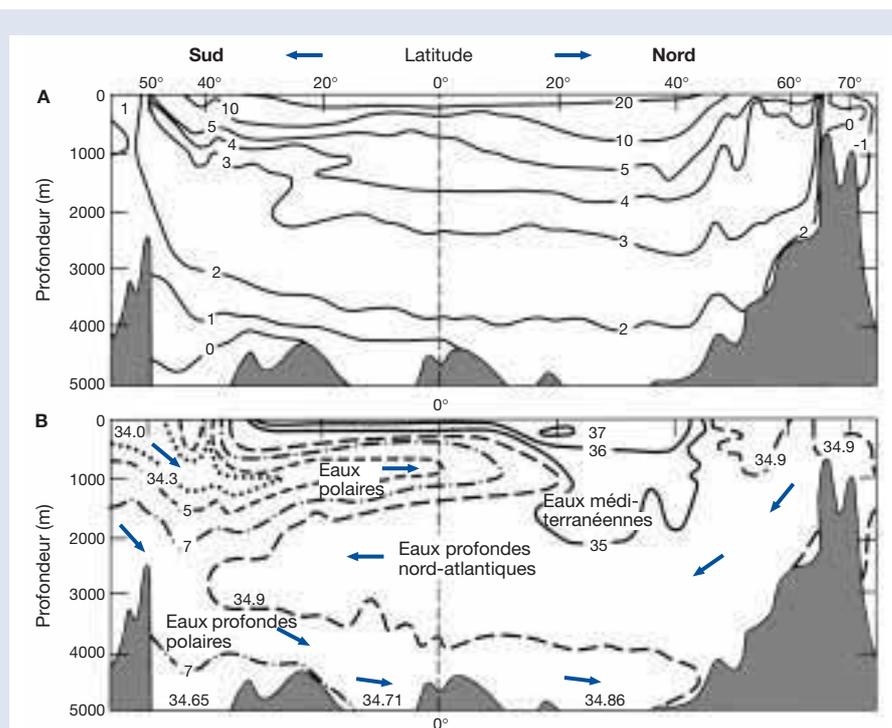


Fig. 1: Coupe longitudinale de l'océan Atlantique. Les lignes indiquent des zones de même température exprimée en °C (A) et des zones de même salinité exprimée en ‰ (B).

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  $^{14}\text{C}$ , 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

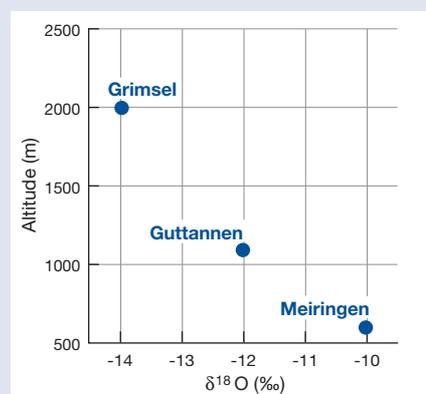


Fig. 2: Isotope d'oxygène  $\delta^{18}\text{O}$  dans les précipitations de trois stations voisines situées à trois altitudes différentes.  $\delta^{18}\text{O}$ : écart du rapport  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  par rapport à un standard en ‰.

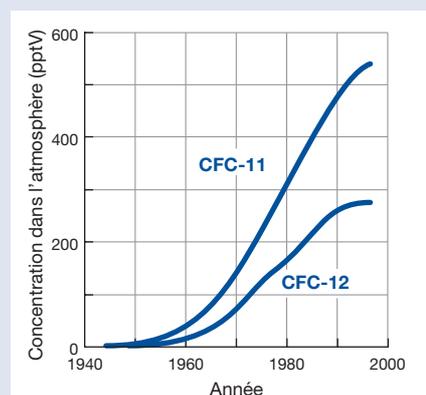


Fig. 3: Augmentation des concentrations en CFC 11 et CFC 12 dans l'atmosphère à partir de 1950. Unité: pptV =  $10^{-9}$  parties volumiques.

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 ( $^{10}\text{Be}$ ) 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  $^{10}\text{Be}$  et en  $^{14}\text{C}$  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 ( $^{12}\text{C}$  ou  $^{14}\text{N}$ ) et une accumulation d'isotopes lourds dans la substance de départ ( $^{13}\text{C}$  ou  $^{15}\text{N}$ ). 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 ( $\text{N}_2$ ) ou de l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), 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.

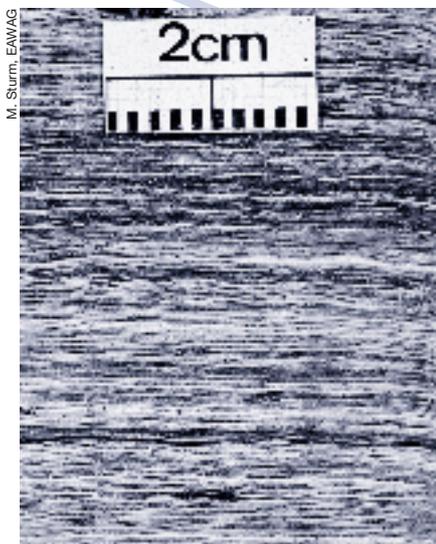
L'accessibilité grandissante des informations génétiques des divers organismes permet une identification fiable des acteurs intervenant dans le jeu complexe des phénomènes de la biosphère. L'information contenue dans les protéines et le métabolisme d'un organisme est cependant encore plus diversifiée. 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 Baldeggensee.**

- [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  $^{18}\text{O}$  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  $^{10}\text{Be}$  and  $^{14}\text{C}$  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  $^{15}\text{N}$  isotope pairing technique ( $^{15}\text{N}$  IPT). *Applied and Environmental Microbiology* 67, 3771–3778.

# Détermination de la composition isotopique de polluants chimiques

## De nouveaux horizons dans le domaine de l'hydrologie des polluants

**Grâce à des seuils de détection encore plus perfectionnés, les méthodes de détermination de la composition isotopique spécifique de substances chimiques ouvrent de nouveaux horizons dans le domaine de l'évaluation de la qualité des eaux souterraines polluées. Nous pourrions donc étudier la présence de polluants à faibles concentrations dans un avenir proche. Le groupe de travail «Hydrologie des polluants» de l'EAWAG s'attache par conséquent à optimiser les méthodes analytiques afin de permettre une telle application.**

La pollution des eaux souterraines par des composés organiques est un problème qui se pose fréquemment dans les pays industrialisés. Les substances utilisées en grande quantité p. ex. dans le dégraissage des métaux, dans le nettoyage à sec ou en tant que combustibles peuvent contaminer les eaux souterraines de manière ponctuelle (accidents, fuites) ou diffuse (dépositions atmosphériques, caniveaux) et ainsi compromettre leur rôle de réserve en eau potable.

### Problèmes d'assainissement des eaux souterraines contaminées

Pour l'assainissement des eaux souterraines contaminées, on fait de plus en plus souvent appel à des méthodes *in situ*. Il s'agit de méthodes basées sur la dégradation des composés polluants au sein même de la nappe phréatique, grâce à des processus naturels ou stimulés. Elles présentent un avantage financier considérable par rapport aux méthodes lourdes d'assainissement *ex situ* qui nécessitent une excavation du matériel contaminé. Dans le cas le plus simple où l'on est en présence de substances facilement dégradables, il suffit de suivre l'évolution dans le temps des polluants dans l'eau souterraine pour savoir si et à quelle vitesse ils sont dégradés. Une preuve tangible de la dégradation *in situ* est néanmoins souvent difficile à obtenir. Les méthodes classiques reposent sur l'établissement de bilans masses des polluants présents dans les eaux souterraines. Mais dans le cas de substances difficilement

dégradables, de telles méthodes peuvent souvent conduire à des résultats peu fiables, étant donné que les bilans doivent porter sur de longues périodes et que l'étendue des nuages de polluants est très large et souvent encore mal connue. Même dans les zones présentant des conditions hydrogéologiques simples et couvertes par un réseau dense de points de mesure, il est en général impossible de déterminer avec exactitude les degrés de dégradation et de transformation dans les eaux souterraines. Si les dosages révèlent une baisse de concentration, il est généralement impossible de savoir si elle est due à une dilution, à un dégazage, à des effets de sorption, à une dégradation microbienne ou à une dégradation d'origine abiotique. La situation se complique d'avantage si l'on considère que les processus de transformation peuvent ne pas donner uniquement

naissance à des produits inoffensifs, mais également à des substances plus difficilement dégradables et plus toxiques que les composés de départ (Fig. 1). Pour pouvoir étendre le champ d'application des procédés d'assainissement dits de «monitored natural attenuation» (surveillance de l'atténuation naturelle) à des situations de contamination complexes, il faut disposer d'un supplément d'information.

### Détermination du comportement des polluants à l'aide de l'isotopie des composés spécifiques

Il existe une méthode élégante pour obtenir des indications supplémentaires sur l'efficacité des processus de dégradation *in situ*: la détermination de la composition isotopique stable de chaque polluant (isotopie des composés spécifiques). La plupart des éléments possèdent des isotopes stables. L'atome de carbone (C) p. ex. peut avoir une masse atomique de 12 ou de 13. On retrouve donc ces deux isotopes dans les molécules organiques à une certaine proportion  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ . Il est maintenant possible de déterminer le rapport isotopique des éléments H, C, N, O, S et Cl au sein de composés organiques donnés et ce, dans des taux de concentration tels qu'on les rencontre dans l'environnement. La signature

Police municipale de Zurich



Suite au déraillement d'un train-citerne survenu en mars 1994 à proximité de la gare de Zurich-Affoltern, on estime que près de 70 tonnes d'essence se sont infiltrées dans le sol.

isotopique des éléments contenus dans les polluants se modifie différemment en fonction des processus de transport et de transformation qu'ils subissent dans les eaux souterraines. La stabilité d'une liaison chimique, p. ex. entre un atome de carbone et un atome d'hydrogène, est influencée par la nature des isotopes présents. Les liaisons entre atomes légers seront plus rapidement dissociées que celles qui relient deux isotopes lourds (Fig. 2). Etant donné que la transformation chimique des molécules se produit plus ou moins rapidement en fonction de la teneur isotopique des différents éléments, on assiste au cours de leur dégradation à un changement (fractionnement) des rapports isotopiques de chaque élément par rapport au composé de départ. L'évolution dans le temps et l'espace de la signature isotopique d'un composé dans les eaux souterraines peut donc servir d'indicateur pour déterminer la nature et la vitesse des processus de dégradation qui y règnent (Fig. 3) [1–3]. De plus, des polluants de provenances différentes peuvent différer par leur composition isotopique [4]. La signature isotopique permet donc de surcroît de déterminer la source d'une contamination et d'identifier le pollueur.

## L'isotopie des composés spécifiques: un projet de recherche de l'EAWAG

L'étude de la signature isotopique des substances polluantes des eaux souterraines constitue un tournant dans les méthodes analytiques de l'hydrologie des polluants. Pour la première fois, ce sont les polluants eux-mêmes qui servent de traceurs. A la division «Ressources aquatiques et eau potable» de l'EAWAG, des chercheurs s'emploient actuellement à développer l'isotopie des composés isolés pour son utilisation en tant que méthode analytique de l'hydrologie des polluants. Les analyses sont effectuées à l'aide d'un GC-IRMS («gas chromatography-isotope ratio mass spectrometer») récemment acquis en commun avec l'EPF de Zurich.

Un projet lancé au milieu de l'année 2000 vise à caractériser les effets d'isotopie qui se produisent lors de la dégradation des solvants trichloroéthylène et tétrachloréthylène ainsi que du méthyltertiobutyléther (MTBE, sert comme additif d'essences). Le projet s'appuie sur des études de laboratoire et de terrain. Les connaissances qu'il livrera serviront à l'identification des processus de dégradation, au calcul des taux de dégradation et à la détermination de la provenance des polluants. Pour réaliser une caractérisation quantitative du comporte-

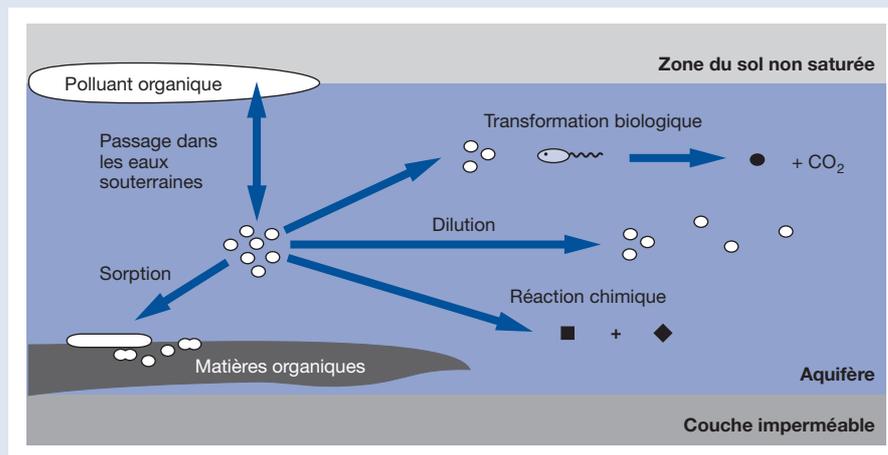


Fig. 1: Transport et transformation des polluants organiques dans le sous-sol.

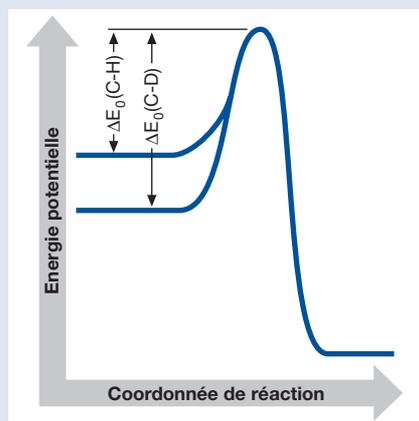


Fig. 2: Influence de la composition isotopique sur les énergies de liaison et les taux de réaction. L'énergie potentielle d'une liaison carbone-deutérium (C-D) est plus faible que celle d'une liaison carbone-hydrogène (C-H). A température ambiante, la liaison C-H se dissocie 7 fois plus vite que la liaison C-D. Lors de la dégradation d'une substance donnée, les molécules qui comprennent des isotopes légers vont donc réagir préférentiellement. En même temps, la fraction du composé de départ s'enrichit en isotopes lourds (voir exemple Fig. 3).

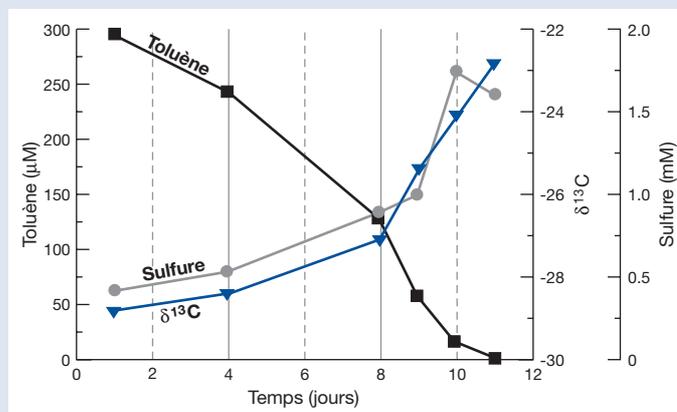


Fig. 3: Dégradation du toluène en conditions anaérobies sulfatoréductrices [3]. La baisse de concentration en toluène est accompagnée de la formation de sulfure et donne un bilan d'électrons équilibré. La biodégradation anaérobie du toluène induit un fractionnement isotopique: le  $\delta^{13}\text{C}$  du toluène restant augmente, c'est à dire que celui-ci s'enrichit en isotopes de carbone lourds.

ment des polluants persistants dans le sous-sol, on fera appel en parallèle à l'isotopie des composés spécifiques et à des méthodes de datation et de modélisation des eaux souterraines.



Luc Zwank, spécialiste des sciences de l'environnement, réalise une thèse de doctorat dans le cadre du projet de l'EAWAG décrit ci-dessus au sein du groupe de travail «Hydrologie des polluants» de la division «Ressources aquatiques et eau potable».

En collaboration avec: Torsten Schmidt, Rolf Kipfer et Stefan Haderlein

- [1] Bloom Y., Aravena R., Hunkeler D., Edwards E., Frapce S.K. (2000): Carbon isotope fractionation during microbial dechlorination of trichloroethene, *cis*-1,2-dichloroethene, and vinyl chloride: implications for assessment of natural attenuation. *Environmental Science and Technology* 34, 2768–2772.
- [2] Dayan H., Teophilo A., Abrajano J., Sturchio N.C., Winsor L. (1999): Carbon isotopic fractionation during reductive dehalogenation of chlorinated ethenes by metallic iron. *Organic Geochemistry* 30, 755–763.
- [3] Meckenstock R.U., Morasch B., Warthmann R., Schink B., Annweiler E., Michaelis W., Richnow H.H. (1999):  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  isotope fractionation of aromatic hydrocarbons during microbial degradation. *Environmental Microbiology* 1, 409–414.
- [4] BenetEAU K.M., Aravena R., Frapce S.K. (1999): Isotopic characterization of chlorinated solvents – laboratory and field results. *Organic Geochemistry* 30, 739–753.

# L'emploi de traceurs biologiques en écotoxicologie

**Les biomarqueurs sont des indicateurs biochimiques ou physiologiques que l'on peut détecter suite à un stress de nature physique, biologique ou chimique. Les biomarqueurs servent donc de traceurs pour des réactions se produisant à divers niveaux d'organisation biologique – la molécule, la cellule, ou l'organe. Cet article porte sur des biomarqueurs moléculaires induits par un stress provoqué par des polluants. Leur détection permet une évaluation précoce des effets négatifs potentiels de ces polluants sur les organismes vivants et les écosystèmes.**

Malgré l'amélioration constante des lois de protection de l'environnement, on observe encore aujourd'hui une pollution chimique importante. Les polluants chimiques ou leurs divers cocktails sont souvent présents à des concentrations extrêmement faibles, ce qui rend difficile une estimation de leur toxicité potentielle. Cette détermination fait appel à des méthodes biologiques très sensibles qui permettent la mise en évidence au niveau cellulaire d'éventuels effets occasionnés par des polluants.

## La réaction de stress au niveau cellulaire

Les premières interactions entre polluants et systèmes biologiques se produisent au niveau de la cellule dans laquelle des protéines jouent un rôle de détecteur (Fig. 1). Certaines détecteurs perçoivent les polluants directement, d'autres ne les détectent que par leurs effets, p. ex. par les

dommages qu'ils provoquent au niveau de certains composants cellulaires (membranes, protéines ou ADN) ou par une perturbation de l'équilibre métabolique résultant de modifications du pH, de la pression osmotique ou du potentiel d'oxydoréduction. Dès que le détecteur réalise la présence d'un stress dû à un polluant, il déclenche une réaction de stress au niveau cellulaire. Le détecteur transmet le signal aux éléments régulateurs (les promoteurs) de certains gènes de stress qui sont ainsi activés. Ceci entraîne la production des ARN messagers (ARNm) correspondants qui serviront de matrice aux ribosomes pour la synthèse des protéines de stress (Fig. 1). Les protéines de stress ont pour fonction d'éliminer les polluants ou leurs produits de dégradation, de réparer ou de remplacer les composants cellulaires endommagés et de rétablir l'équilibre métabolique dans la cellule. Si elles y parviennent, le stress est

surmonté. Dans le cas contraire, le stress occasionné par le ou les polluants peut se répercuter à un niveau d'organisation supérieur – au niveau de l'organe, de l'organisme, de la population, de la biocénose ou de l'écosystème.

## Les paramètres moléculaires de stress servant de biomarqueurs

Divers paramètres moléculaires peuvent être mesurés lorsqu'une réaction de stress se produit au niveau cellulaire. Ils peuvent donc servir de biomarqueurs pour estimer la toxicité de composés chimiques spécifiques, de cocktails chimiques et d'échantillons environnementaux complexes.

On peut p. ex. mesurer la concentration ou l'activité enzymatique de protéines de stress après impact du ou des polluants étudiés. La cytochrome P450 monooxygénase est une protéine de stress souvent utilisée comme biomarqueur pour l'étude de divers polluants organiques tels que les PCBs, la dioxine ou les dibenzofuranes. On la rencontre aussi bien chez les vertébrés que chez les invertébrés et elle est mesurée dans les cellules ou lignées de cellules cultivées en laboratoire de même que dans des échantillons d'animaux prélevés sur le terrain [1]. La cytochrome P450 monooxygénase joue un rôle métabolique central lors de réactions de détoxification. C'est pourquoi la concentration et l'activité de cette protéines de stress augmentent de manière significative suite à une exposition à des polluants.

On peut également procéder à la détermination de la concentration en ARNm [2]. Les méthodes modernes de biologie moléculaire permettent une étude spécifique, quantitative, rapide et d'une grande sensibilité à des modifications de concentrations d'ARNm (Fig. 2).

Suite au progrès très rapide qui s'est fait ces dernières années dans le domaine de la biologie moléculaire, on a assisté dans le même temps à un développement considérable des méthodes impliquant des biomar-

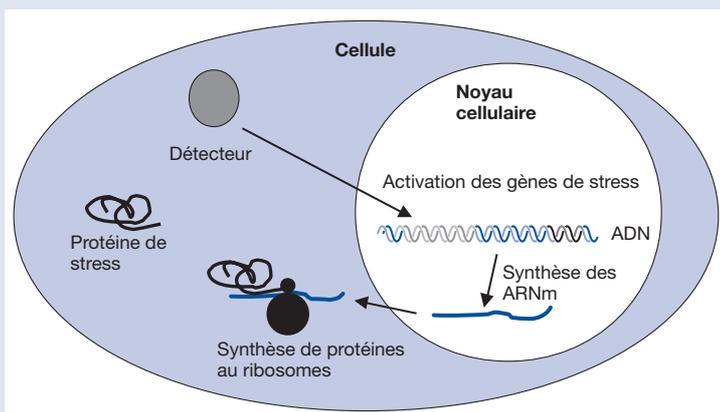


Fig. 1: Chaîne de réactions cellulaires allant de la détection du stress à la synthèse des protéines de stress.

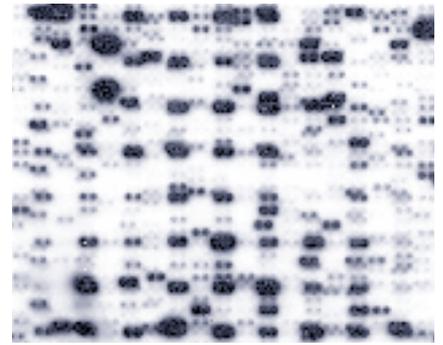


Fig. 4: Analyse génétique à l'aide de la puce à ADN. Chaque point représente un gène. Plus le point est sombre, plus l'activité du gène est élevée.

queurs [2]. Au lieu de mesurer les concentrations et activités enzymatiques de protéines de stress souvent difficiles à détecter ou de déterminer les concentrations en ARNm à l'aide de techniques complexes, de nouvelles méthodes permettent aujourd'hui de mesurer directement l'activité des gènes. On associe pour cela les promoteurs de gènes de stress connus à ce que l'on ap-

pelle des gènes rapporteurs. Les gènes rapporteurs codent des protéines faciles à mettre en évidence, comme p. ex. la luciférase, une enzyme qui produit de la lumière, ou bien la «Green Fluorescing Protein» (GFP, protéine à fluorescence verte) connue pour émettre une fluorescence verte sous l'effet de la lumière. Les constructions promoteurs – gènes rapporteurs sont p. ex. introduites dans des cellules de bactéries ou de levures. Lorsque ces systèmes à biomarqueurs sont exposés à un échantillon d'eau polluée, le promoteur du gène de stress ainsi que le gène rapporteur sont activés, ce qui entraîne la synthèse de la protéine indicatrice [3]. La figure 3 présente l'activation de la luciférase dans des cellules bactériennes recombinées sous l'effet du peroxyde d'hydrogène et de la pyrocatechol [4]. En plus de la facilité de détection de la protéine indicatrice, ces systèmes de test présentent l'avantage d'une grande sensibilité. Ils permettent la mise en évidence des concentrations de polluants les plus faibles, même si seulement une partie encore plus faible est biodisponible et responsable du stress causé [5].

l'on appelle des puces à ADN (Fig. 4). En permettant le séquençage complet de génomes entières, les techniques d'analyse génomique prennent une place de plus en plus centrale au niveau de la recherche. Parallèlement à cette technique, on a vu se développer la protéomique qui permet de caractériser l'ensemble des protéines d'une cellule. A l'aide de procédés particulièrement performants il est déjà possible d'isoler plus de 10 000 protéines différentes. Ces nouvelles méthodes permettent non seulement d'identifier de nouveaux gènes ou protéines de stress, mais également d'observer l'ensemble de la réaction de stress cellulaire qui est caractérisée par le jeu complexe d'une multitude de facteurs.



Rik I.L. Eggen est spécialiste en biologie moléculaire et dirige la division «Microbiologie de l'environnement et écotoxicologie moléculaire». Domaines de recherche: Mécanismes moléculaires sous l'effet de polluants, développement de méthodes bioanalytiques.

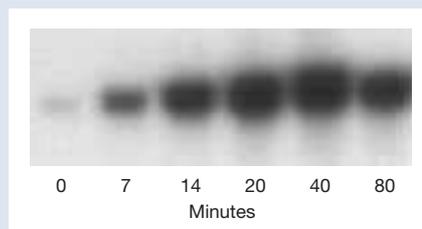


Fig. 2: Sous l'effet d'un stress oxydatif (p. ex. après exposition à des polluants qui provoquent la libération de radicaux d'oxygène libres), la concentration en ARNm codant la glutathionperoxydase augmente nettement dans la chlorophycée *Chlamydomonas reinhardtii*. On suppose que la glutathionperoxydase est une enzyme-clé dans les mécanismes de défense contre le stress oxydatif.

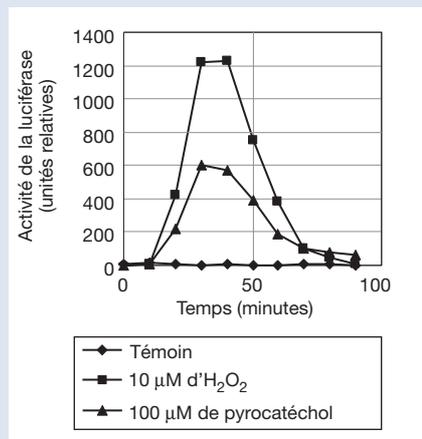


Fig. 3: Utilisation d'un système à biomarqueurs recombiné pour la mise en évidence de la production de peroxyde sous l'effet de polluants. Le promoteur d'un gène de stress sensible au peroxyde a été associé au gène rapporteur de la luciférase puis introduit dans des cellules d'*Escherichia coli*. Une augmentation des teneurs en peroxyde dans la cellule est suivie d'une accroissement de l'activité de la luciférase. Le traitement des cellules avec de la pyrocatechol induit également une augmentation de l'activité de la luciférase, étant donné que la présence de catéchol dans les cellules induit la production de peroxyde [4].

## Les biomarqueurs du futur

Les méthodes décrites ci-dessus permettent surtout l'analyse de gènes ou de protéines de stress individuels. Dans le cas où l'on ignore par contre la composition d'un échantillon d'eau polluée, comme c'est souvent le cas des échantillons prélevés sur le terrain, il serait intéressant de tester l'activité d'un grand nombre de gènes et protéines de stress pour identifier les polluants impliqués. De plus, on connaît généralement un seul mode d'action d'un polluant donné, alors que se produisent probablement *in vivo* des phénomènes plus complexes ayant des effets au niveau cellulaire que nous ignorons encore actuellement [6]. Il convient ici de recourir à de nouvelles technologies basées sur une analyse étendue des gènes ou des protéines. On peut fixer et étudier un grand nombre de gènes ou de fragments de gènes sur ce que

- [1] Bucheli T.D., Fent K. (1995): Induction of cytochrome P450 as a biomarker for environmental contamination in aquatic ecosystems. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology* 25, 201–268.
- [2] Power M., van der Meer J.R., Tchelet R., Egli T., Eggen R.I.L. (1998): Molecular methods can contribute to assessments of toxicological risks and bioremediation strategies. *Journal of Microbiological Methods* 32, 107–119.
- [3] Eggen R.I.L. (2001): *Moderne biologische Analyse: Potenzial, Entwicklung und Anwendung*. Gas Wasser Abwasser 3, 167–171.
- [4] Schweigert N., Belkin S., Leong-Morgenthaler P., Zehnder A.J.B., Eggen R.I.L. (1999): Combinations of chlorocatechols and heavy metals cause DNA degradation *in vitro* but must not result in increased mutation rates *in vivo*. *Environmental & Molecular Mutagenesis* 33, 202–210.
- [5] Jaspers M.C.M., H. Harms, van der Meer J.R. (1999): Prokaryotic whole-cell living bioreporters expressing bioluminescence upon the presence of bioavailable concentrations of specific pollutants. In: Fass R., Flashner Y., Reuveny S. (eds), *Novel approaches for bioremediation of organic pollution*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, p. 137–150.
- [6] Schweigert N., Zehnder A.J.B., Eggen R.I.L. (2001): Chemical properties of catechols and their molecular modes of toxic action in cells, from microorganisms to mammals. *Environmental Microbiology* 3, 81–91.

# Les sédiments – archives pour détergents

**Les produits chimiques difficilement dégradables employés par le passé dans les lessives et les produits d'entretien (les détergents) se retrouvent stockés dans les sédiments des lacs. Ces composés peuvent aujourd'hui servir de traceurs pour décrire l'histoire de leur apport dans l'environnement. Leur étude permet également d'évaluer le succès de mesures visant à la réduction de leur émission. On a ainsi pu établir un lien entre la baisse de concentration dans les sédiments et divers événements comme les changements successifs de composition des produits mis sur le marché ou l'amélioration de leur élimination dans les stations d'épuration.**

Les sédiments lacustres renferment des informations sur les produits chimiques libérés dans l'environnement qui s'associent à des particules et sédimentent. Parmi ces composés, on compte, outre les métaux lourds et les polluants organiques lipophiles et persistants, des substances détergentes, les agents tensio-actifs amphiphiles et leurs produits de dégradation lipophiles.

## Substances détergentes – Evolution depuis les années 50

Dans les années 50, les savons contenus dans les lessives et les produits d'entretien ont été remplacés par des agents tensio-actifs synthétiques. Les premiers agents tensio-actifs produits en grande quantité par voie pétrochimique étaient les tétrapropylènes benzènesulfonates (TPS, alkylbenzènes sulfonates à chaîne ramifiée, Fig. 1). Ils sont malheureusement difficilement dégradables, que ce soit en conditions aérobies ou anaérobies, et l'apport massif de ces composés dans les eaux de surface s'est suivi de la formation de mousses indésirables. C'est la raison pour laquelle les TPS ont été remplacés au milieu des années 60 par des alkylbenzènes sulfonates à chaîne linéaire (LAS, Fig. 1). Les LAS sont rapidement biodégradables en conditions aérobies et ils forment le groupe d'agents tensio-actifs le plus représenté au monde. Un autre groupe important est formé par les nonylphénolpolyéthoxylés (NPnEO) dont une grande quantité a été employée en Suisse au cours des années 70 et 80 comme agents tensio-actifs non-ioniques dans les

détergents. La biodégradation des NPnEO dans les stations d'épuration communales donne notamment naissance au nonylphénol, un produit de transformation lipophile et persistant (NP, Fig. 1). Le NP est beaucoup plus toxique que le produit de départ et présente de plus une activité endocrine, c'est à dire qu'il perturbe le système hormonal des êtres humains et des animaux. L'agent actif principal des adoucissants était jusqu'au début des années 90 le chlorure de dialkyl ( $C_{16}$ - $C_{18}$ ) diméthylammonium (DHTDMAC, Fig. 1), un agent tensio-actif cationique. Cette substance est cependant toxique pour les organismes aquatiques et s'accumule dans les boues d'épuration. C'est la raison pour laquelle ils ont été remplacés en Suisse et dans d'autres pays européens par des agents tensio-actifs cationiques mieux dégradables, les esterquats.

## Les agents tensio-actifs comme traceurs dans les sédiments

Etant donné que des quantités considérables de composés contenus dans les lessives et les produits d'entretien se retrouvent dans les eaux usées, leur comportement et leur sort méritent toute notre attention. Les études présentées ici avaient donc pour but d'évaluer les quantités de TPS, de LAS, de NP et de DHTDMAC déversées dans les eaux de surface et d'évaluer le succès des mesures entreprises pour réduire leur libération dans l'environnement. Etant donné qu'une part considérable de ces substances particulièrement persis-



Des images comme celles-ci, qui datent du début des années 60, appartiennent heureusement au passé.

tantes en conditions anoxiques a été archivée dans les sédiments sous leur forme d'origine, elles peuvent servir de traceurs pour reconstituer leur histoire et leur cheminement. Les teneurs en TPS, LAS, NP et DHTDMAC ont été déterminées dans les différentes couches d'une carotte de sédiments datée prélevée au fond du lac de Wohlén près de Berne [1–4]. Les coupes-profondeurs de ces composés sont présentés dans la figure 2. La datation de 1963 et 1986 dans la carotte de sédiments a été effectuée par mesure de Cs-137 [5].

## Modifications de la composition des produits

L'augmentation continue des concentrations en TPS dans les couches sédimentaires d'avant 1963 traduit la mise sur le marché de ces composés dans les années 50. La concentration la plus élevée, 3,4 mg de TPS par kg de matière sèche (MS), a été atteinte dans la première moitié des années 60. Suite au problème environnemental constitué par la formation de mousses due

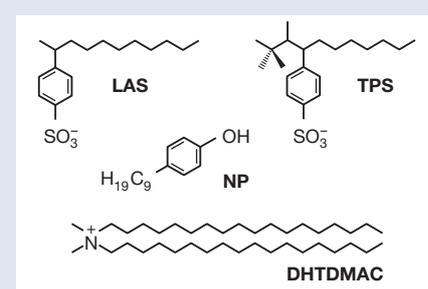


Fig. 1: Structure chimique des détergents étudiés.

aux TPS, de nombreux pays ont délibérément renoncé à leur utilisation au milieu des années 60 et ont en même temps pris des mesures légales pour exiger que les agents tensio-actifs contenus dans les lessives soient biodégradables à 90%. C'est ainsi que les TPS n'ont plus été utilisés en Suisse à partir de cette date, ce qui s'est traduit après 1965 par une chute de leurs concentrations dans les sédiments qui se retrouveront peu après en-dessous du seuil de détection (Fig. 2).

La coupe-profondeur du NP montre que les agents tensio-actifs NPnEO ont été introduits en Suisse vers le milieu des années 60. Des concentrations en NP comprises entre 0,3 et 0,48 mg/kg MS mesurées dans les sédiments reflètent leur apport massif de 1960 jusqu'au milieu des années 80 (Fig. 2). Une estimation des risques effectuée à l'aide de méthodes européennes indique une PNEC («predicted no effect concentration», concentration prévue sans effet) de 0,3 mg de NP par kg MS [6]. Cette valeur est nettement dépassée jusqu'en 1986. Suite à l'entrée en vigueur en 1986 de l'Ordonnance Suisse sur les Substances Dangereuses pour l'Environnement qui interdit l'emploi des NPnEO dans les lessives et au renoncement volontaire simultané à l'emploi de ces substances dans les produits d'entretien, les concentrations en NP dans les sédiments baissent à nouveau à partir du milieu des années 80 (Fig. 2). Depuis le début des années 90, elles sont comprises entre 0,05 et 0,08 mg/kg MS et se situent donc nettement en dessous du valeur PNEC.

## Effet des stations d'épuration

Après l'interdiction des TPS au début des années 60, ce groupe de composés a été remplacé par les LAS, plus facilement dégradables. L'introduction des LAS se traduit par une augmentation de leurs concentrations dans les sédiments. Elles atteignent un maximum de près de 2,4 mg LAS/kg MS à la fin des années 60 (Fig. 2). Au début des années 70, la station communale d'épuration des eaux de Berne est mise en service. Elle est de loin la station d'épuration la plus importante du bassin versant de l'Aar, dont le lac de Wohlén fait partie. Les agents tensio-actifs anioniques comme les LAS sont assez bien éliminés au cours de la phase d'épuration biologique aérobie et par sorption consécutive dans les boues d'épuration. Il n'est donc pas surprenant de constater une baisse des concentrations de LAS dans les sédiments du Lac de Wohlén après 1970, date de mise en service de la station (Fig.2).

La coupe-profondeur du DHTDMAC montre que ce composé est utilisé en Suisse depuis la fin des années 60. On mesure les concentrations maximales en DHTDMAC dans les couches sédimentaires formées entre 1970 et le début des années 80 dans lesquelles elles atteignent 70 mg/kg MS. Une première baisse significative des teneurs en DHTDMAC est observée au début des années 80. Elle correspond à l'introduction d'une phase de précipitation des phosphates simultanée ainsi que d'une phase de floculation-filtration dans les bassins de prétraitement des stations d'épuration. Au début des années 90 s'amorce une nouvelle chute des teneurs

en DHTDMAC que l'on peut expliquer par le remplacement des ces composés par les esterquats.

L'étude présentée ici montre que les sédiments récents constituent une archive de valeur pour évaluer la pollution des eaux dans le passé par les agents tensio-actifs, et pour juger du succès des mesures entreprises pour réduire leur apport dans l'environnement. L'introduction de lois d'interdiction, la modification volontaire de la composition des produits et la mise en service ou l'amélioration des stations d'épuration ont contribué à réduire efficacement les concentrations d'agents tensio-actifs dans l'environnement aquatique.

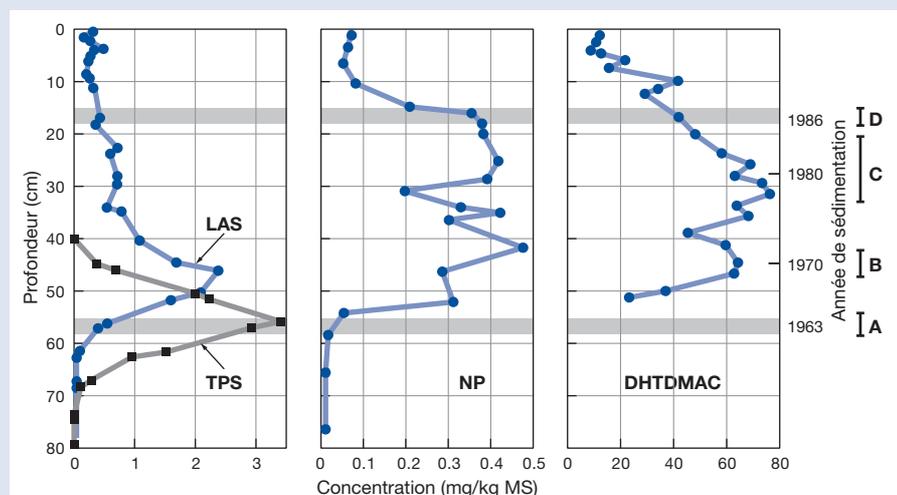


**Walter Giger, chimiste et professeur titulaire de chimie de l'environnement à l'EPF de Zurich et à l'Université de Karlsruhe, dirige la division «Composés polluants» de l'EAWAG. Domaine de recherche: Apparition et comportement de composés polluants dans les eaux usées, dans les lacs et cours d'eau et dans l'eau potable.**



**Alfredo C. Alder, chimiste et chercheur à la division «Composés polluants». Domaine de recherche: Apparition et comportement de composés polluants (en particulier les détergents et les produits pharmaceutiques) dans le domaine de l'épuration des eaux et dans les eaux de surface.**

En collaboration avec: René Reiser, Christian Schaffner, Marijan Ahel, Achim Albrecht



**Fig. 2: Profils de concentration des TPS, LAS, NP et DHTDMAC dans une carotte de sédiments prélevée du lac de Wohlén, Canton de Berne, Suisse.**

Les baisses de concentrations observées dans les sédiments sont le résultat de différentes mesures de réduction des émissions de détergents prises à divers moments. A: Remplacement des TPS par les LAS (1964); B: Construction de la station d'épuration de la région de Berne (1970); C: Introduction de la précipitation des phosphates et de la floculation-filtration (à partir de 1978); D: Interdiction de NPnEO par l'Ordonnance Suisse sur les Substances Dangereuses pour l'Environnement (1986). Les mesures de Cs-137 ont permis de dater les couches sédimentaires formées en 1963 et en 1986.

- [1] Reiser R., Toljander H.O., Giger W. (1997): Determination of alkylbenzenesulfonates in recent sediments by gas chromatography/mass spectrometry. *Analytical Chemistry* 69, 4923–4930.
- [2] Fernández P., Alder A.C., Suter M.J.-F., Giger W. (1996): Determination of the quaternary ammonium surfactant ditallowdimethylammonium in digested sludges and marine sediments by supercritical fluid extraction and liquid chromatography with postcolumn ion-pair formation. *Analytical Chemistry* 68, 921–929.
- [3] Reiser R., Toljander H., Albrecht A., Giger W. (1997): Alkylbenzenesulfonates in recent lake sediments as molecular markers for the environmental behavior of detergent-derived chemicals. In: Eganhouse R.P. (ed.), *Molecular markers in environmental geochemistry*. American Chemical Society Symposium Series, Washington DC, 13, 196–212.
- [4] Alder A.C., Giger W., Reiser R., Schaffner, C., Ahel M., Albrecht A. (2001): Detergentchemikalien in Seesedimenten. *Münchner Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flussbiologie* 54, 289–301.
- [5] Albrecht A., Reiser R., Lück A., Stoll J.-M.A., Giger W. (1998): Radiocesium dating of sediments from lakes and reservoirs of different hydrological regimes. *Environmental Science and Technology* 32, 1882–1887.
- [6] European Commission. (2001): Draft European Union Risk Assessment Report: Nonylphenol and Phenol, 4-nonyl-, branched.

# L'ARN: Un traceur pour identifier des microorganismes

Le groupe «Ecologie moléculaire» de l'EAWAG à Kastanienbaum utilise entre autres l'ARNr 16S, un élément constitutif des ribosomes, comme traceur pour étudier certains aspects du cycle du carbone dans des sédiments anaérobies. Deux exemples d'application sont présentés ici. Grâce à l'hybridation *in situ* à fluorescence, il a été possible d'identifier des bactéries actives dans des sédiments du Baldeggersee âgés d'environ 150 ans. Une étude des sédiments du Rotsee a permis de caractériser deux populations d'archéobactéries méthanogènes dont la répartition en fonction de la profondeur dans les sédiments dépendait de la matière organique disponible.

## L'ARN comme traceur moléculaire

On estime aujourd'hui que moins de 1% des procaryotes présents dans la nature (bactéries des domaines Bacteria et Archaea) peuvent être identifiés à l'aide de cultures. Il est cependant possible de localiser des bactéries jusqu'à présent non cultivables avec des traceurs moléculaires.

La famille des acides ribonucléiques (ARN) comprend les ARNm, les ARNt et les ARNr

qui se distinguent par leur structure et leur fonction. Quand une protéine doit être synthétisée, l'ARNm (ARN messager) transporte l'information génétique sous la forme d'une copie jusqu'aux ribosomes, lieux de la biosynthèse protéique. Les ARNt (ARN de transfert) acheminent les acides aminés nécessaires jusqu'aux ribosomes où ils seront reliés entre eux pour former la protéine voulue. Les ribosomes sont en partie constitués d'ARNr (ARN ribosomiques) de différentes

tailles (ARNr 5S, 16S ou 23S; S = Unité de Svedberg; vitesse de sédimentation de molécules biologiques en suspension au cours d'une centrifugation réalisée en conditions standard).

L'ARNr 16S (Fig. 1) constitue un traceur de choix dans le domaine de l'écologie moléculaire [1]. L'analyse comparée des séquences d'ARNr 16S isolées à partir de divers procaryotes a montré qu'il existait des séquences conservées mais également des régions très variables [2]. Certains domaines conservés ont p.ex. la même séquence chez toutes les eubactéries alors que les régions variables sont typiques de certains groupes bactériens. Sur la base de ces informations, il est possible de définir des sondes nucléiques de sélectivité variable. Les sondes nucléiques sont des chaînes d'acide nucléique d'une longueur d'environ 20 nucléotides qui sont complémentaires de régions de l'ARNr que l'on souhaite identifier. Il existe maintenant un très grand nombre de sondes nucléiques publiées [3] permettant l'identification sélective des groupes de bactéries les plus variés (exemples Fig. 1). Pour l'hybridation *in situ* à fluorescence [4], les sondes nucléiques sont marquées avec un colorant fluorescent puis un nombre important de copies est mélangé à l'échantillon à étudier. Les sondes diffusent dans les cellules procaryotes et se lient (ou s'hybrident) à l'ARNr sans altérer la structure des cellules. Les cellules ainsi marquées peuvent alors être

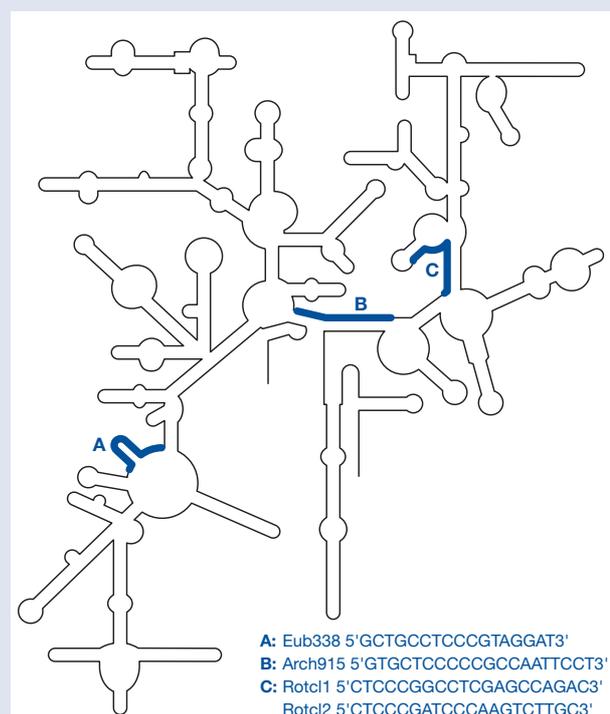


Fig. 1: Structure bidimensionnelle de l'ARNr 16S d'*Escherichia coli* présentant des domaines conservés (A et B) et un domaine variable (C) sur lesquels viennent se fixer les différentes sondes nucléiques. Eub338 détecte des bactéries du domaine Bacteria, Arch915 met en évidence des bactéries du domaine Archaea et les sondes Rotc1 et Rotc2 marquent deux populations différentes d'archéobactéries méthanogènes.



Fig. 2: Hybridation *in situ* d'un échantillon de sédiments à l'aide de la sonde spécifique des archéobactéries Arch915 [5]. Les archéobactéries détectées sont indiquées par des flèches.

mises en évidence au microscope à fluorescence et quantifiées par comptage (Fig. 2).

### Des bactéries actives dans des couches sédimentaires âgées de 150 ans

A l'aide de l'hybridation *in situ* à fluorescence, nous avons étudié des bactéries au métabolisme encore actif dans une carotte prélevée dans les sédiments du Baldeggersee. Pour cela, nous avons entre autres employé la sonde nucléique Eub338 [5] qui permet de détecter toutes les bactéries du domaine Bacteria (Fig. 1). La densité de bactéries est maximale dans les premiers centimètres de sédiment et diminue de

manière continue avec la profondeur. Les couches situées en dessous de 40 cm, c'est à dire âgées de plus de 150 ans, présentent très peu de cellules (Fig. 3). Lors d'essais de cultures, il nous a été possible de démontrer que même des couches sédimentaires âgées de près de 6000 ans pouvaient contenir des bactéries encore activables et en état de dégrader totalement la matière organique.

### Des bactéries méthanogènes dans les sédiments du Rotsee

Dans le cadre d'une autre étude, nous avons cherché à identifier les archéobactéries méthanogènes spécifiques impliquées dans les processus de dégradation anaérobies de la matière organique dans les sédiments du Rotsee [6]. Pour ce faire, il a tout d'abord fallu trouver des sondes nucléiques spécifiques de ces archéobactéries méthanogènes. On a donc commencé par isoler l'ensemble de l'ADN contenu dans les 10 cm supérieurs d'une carotte sédimentaire. Cet ADN nous a servi de matrice pour effectuer une réaction en chaîne de la polymérase (PCR) au cours de laquelle les gènes de l'ARNr 16S des archéobactéries méthanogènes contenus dans le sédiment ont été répliqués [7]. Après séquençage consécutif des fragments obtenus par PCR, deux sondes nucléiques spécifiques ont pu être synthétisées: Rotcl1 permet d'identifier un groupe d'archéobactéries méthanogènes qui forment du méthane (CH<sub>4</sub>) à partir de CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>, alors que Rotcl2 localise des archéobactéries méthanogènes qui transforment l'acétate en CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> (Fig. 1).

Les sondes nucléiques Rotcl1 et Rotcl2 ont ensuite été utilisées pour étudier par hybridation *in situ* à fluorescence la répartition des deux populations dans la carotte de sédiments en fonction de la profondeur (Fig. 4). Le résultat a montré que les archéobactéries qui transforment l'acétate étaient les plus représentées quelle que soit la profondeur. Par contre, la présence des archéobactéries méthanogènes qui forment du méthane à partir de CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub> était limitée aux 2 cm supérieurs des sédiments. Il semble donc que ces bactéries soient subordonnées à la présence de matière organique récemment sédimentée.

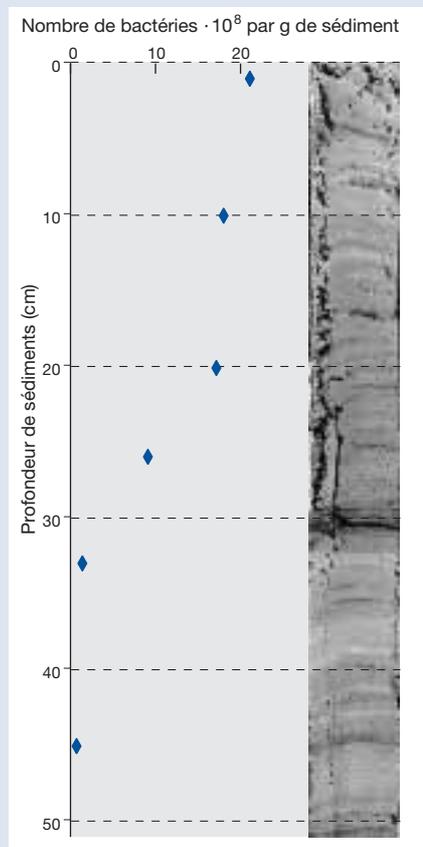
### Voici nos objectifs

Les projets présentés ici illustrent bien la diversité du champ d'application des ARNr en tant que traceurs. Dans une approche pluridisciplinaire, le groupe «Ecologie moléculaire» de l'EAWAG à Kastanienbaum applique ces méthodes en complément d'analyses chimiques pour caractériser les habitats bactériens des systèmes aquatiques de la manière la plus complète possible.

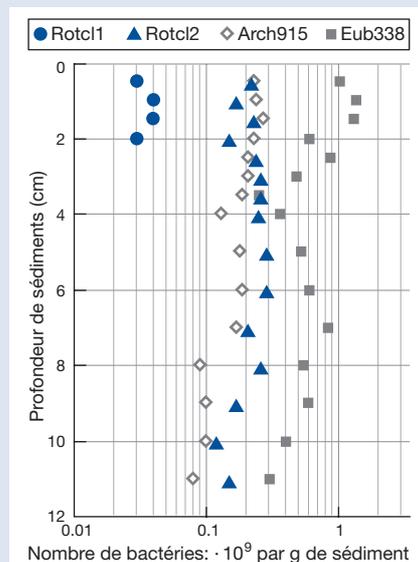


**Kornelia Zepp, biologiste,** dirige le groupe de travail «Ecologie moléculaire» au sein de la division «Eaux de surface» de l'EAWAG. Domaine de recherche: Dynamique des populations d'archéobactéries méthanogènes et de bactéries sulfatoréductrices et importance

de ces microorganismes pour la dégradation anaérobie de la matière organique.



**Fig. 3:** Nombre de bactéries dans les 50 cm supérieurs d'une carotte de sédiments du Baldeggersee (rapporté à la masse sèche de sédiments). Les bactéries ont été rendues visibles par hybridation *in situ* à fluorescence plus comptées au microscope à fluorescence. Sonde nucléique utilisée: Eub338 [5].



**Fig. 4:** Répartition de différents groupes de bactéries dans les sédiments du Rotsee (rapporté à la masse sèche de sédiments). Identification par hybridation *in situ* à fluorescence à l'aide de différentes sondes nucléiques.

- [1] Olsen G.J., Lane D.J., Giovannoni S.J., Pace N.R., Stahl D.A. (1986): Microbial ecology and evolution: a ribosomal RNA approach. *Annual Review of Microbiology* 40, 337–365.
- [2] Woese C.R. (1987): Bacterial evolution. *Microbiological Reviews* 51, 221–271.
- [3] Larsen N., Olsen G.J., Madaik B.L., McCaughey M.J., Overbeek R., Macke T.J., Woese C.R. (1993): The ribosomal database project. *Nucleic Acids Research* 21, 191–198.
- [4] Amann R.I., Ludwig W., Schleifer H.-H. (1995): Phylogenetic identification and *in situ* detection of individual microbial cells without cultivation. *Microbiological Review* 59, 143–169.
- [5] Stahl D.A., Amann R.I. (1991): Development and application of nucleic acid probes. In: Stackebrandt E., Goodfellow M. (eds.), *Nucleic acid techniques in bacterial systematics*. John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 205–248.
- [6] Zepp Falz K., Holliger C., Grosskopf R., Liesack W., Nozhevnikova A.N., Müller B., Wehrli B., Hahn D. (1999): Vertical distribution of methanogens in the anoxic sediment of Rotsee (Switzerland). *Applied and Environmental Microbiology* 65, 2402–2408.
- [7] Grosskopf R., Janssen P.H., Liesack W. (1998): Diversity and structure of the methanogenic community in anoxic rice paddy soil microcosms as examined by cultivation and direct 16S rRNA gene sequence retrieval. *Applied and Environmental Microbiology* 64, 960–969.

# L'argent: Nouveau traceur pour l'étude de la production de diatomées

L'histoire des eaux continentales et océaniques, des terres qui les environnent et du climat est documentée dans les sédiments des lacs et des océans. Tout l'art de la paléocéanographie et de la paléolimnologie consiste à interpréter correctement cette archive. Depuis quelques années, on utilise certains métaux comme traceurs pour quantifier la production primaire et pour déterminer les conditions d'oxydoréduction qui régnaient au moment du dépôt de sédiment. Le recours à l'argent comme indicateur spécifique de la production de diatomées constitue un élément novateur de ces disciplines.

La paléocéanographie chimique et de plus en plus souvent la paléolimnologie sont à la recherche au sein des couches sédimentaires d'indicateurs susceptibles de révéler les conditions qui régnaient au moment de la sédimentation. La présence de couches organiques dans les sédiments peut être le résultat d'une production primaire accrue ou celui d'une décomposition non complète suite à un manque d'oxygène en eau profonde au moment de la sédimentation [1]. La difficulté consiste à faire la différence entre des signaux différents.

## Les métaux en tant qu'indicateurs

Dans les sédiments marins, on utilise depuis quelques années comme traceurs des métaux en traces sensibles aux conditions d'oxydo-réduction tels que le **rhénium** (Re), le **molybdène** (Mo), l'**uranium** (U) et le **cadmium** (Cd) [2]. Pour ce faire il est important de connaître assez exactement le cycle de ces éléments dans l'eau et dans les sédiments. Re, U et Mo se comportent de manière surtout conservative dans l'eau de mer, c'est à dire qu'ils ne participent ni à des réactions chimiques ni à des réactions biologiques. Ils passent par diffusion des eaux profondes aux sédiments où ils sont réduits et s'accumulent. Re est réduit dans des conditions suboxiques, c'est à dire quand il n'y a plus d'oxygène mais pas encore de réduction des sulfates. La réduction de l'U et du Mo se produit dans des conditions anoxiques, c'est à dire quand la réduction des sulfates en sulfures a lieu. Les

taux de diffusion des métaux dépendent de la position de la zone de réduction des sulfates (Fig. 1). Si cette zone se situe en profondeur dans les sédiments, la diffusion des métaux se déroulera sur une grande distance et le gradient sera plat. Dans ces conditions, seules de faibles quantités de Re, d'U et de Mo diffuseront dans les sédiments où ces métaux seront réduits et fixés. A l'opposé, une faible profondeur de la zone de réduction des sulfates induira une fixation plus importante du Re, de l'U et du Mo dans les sédiments. L'accumulation de ces métaux dépend donc de la profondeur d'infiltration des sulfates et par conséquent de l'état d'oxydoréduction à la surface eaux/sédiment. En eaux profonde, le Re, l'U et le Mo servent ainsi de traceurs des conditions d'oxydoréduction du passé.

Par contre, le Cd est absorbé comme le phosphore par le phytoplancton et se trouve donc impliqué dans le cycle biologique. Il atteint les sédiments avec les particules organiques qui s'y déposent. Le Cd est à nouveau libéré lors de la dégradation de la matière organique dans les sédiments. Le Cd dissous diffuse dans la colonne d'eau et quitte donc les sédiments. Par contre, en présence de sulfure libre, une réaction se produit donnant naissance au sulfure de cadmium (CdS) qui est un composé peu soluble et qui, lui, s'accumule dans les sédiments. Il suffit de très faibles concentrations de sulfure pour conserver le signal que constitue le Cd dans les sédiments. Le Cd est donc un bon traceur de production primaire.

## L'argent se fixe dans la coque des diatomées

L'argent (Ag) se comporte un peu comme le Cd. Il est absorbé par le phytoplancton, atteint les sédiments où il est libéré sous forme de sulfure d'argent ( $Ag_2S$ ) de la même manière que le CdS. Pour les deux métaux il faut qu'il y ait du sulfure libre dans les sédiments, donc réduction des sulfates, pour qu'il y ait précipitation d' $Ag_2S$  ou de CdS. C'est dans ces conditions que le signal de production primaire constitué par l'Ag ou le Cd est conservé dans les sédiments. La concentration des deux métaux dépend, comme pour le Re, l'U et le Mo, de la profondeur du front d'oxydoréduction. Contrairement au Cd, l'Ag n'est pas absorbé à l'intérieur de la cellule des algues, mais se trouve surtout fixé dans leur coque. Des expériences au laboratoire ont montré

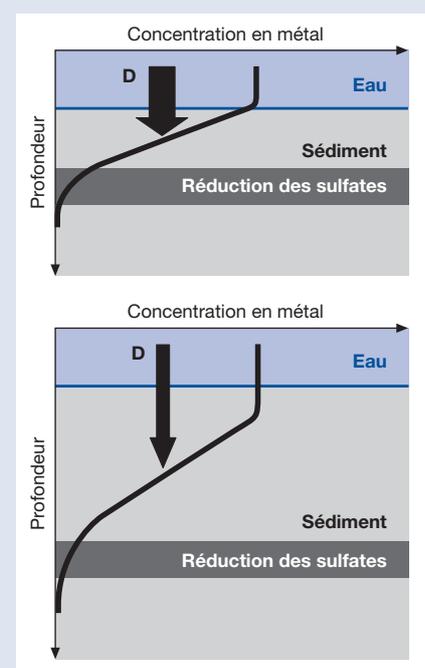


Fig. 1: La profondeur d'infiltration des sulfates dans les sédiments détermine la position du front d'oxydoréduction. Si ce front d'oxydoréduction se situe juste en dessous de l'interface sédiment/eau, la diffusion (D) de métaux dissous dans les sédiments sera importante. S'il se situe en profondeur, cette diffusion sera faible.

que la fixation de l'Ag était plus importante dans les coques siliceuses des diatomées que dans les coques calcaires (des coccolithophores p. ex.) [3]. Cette observation a donné lieu à l'hypothèse selon laquelle l'Ag ne serait pas uniquement un traceur de production primaire mais aussi un indicateur spécifique de la production de diatomées. L'étude présentée ici a pour but de vérifier cette hypothèse [4].

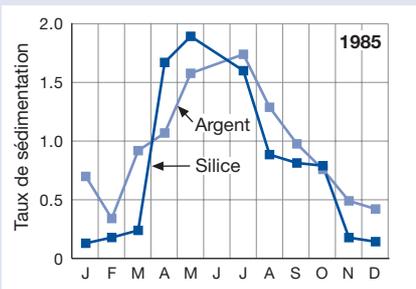


Fig. 2: Taux de sédimentation de la silice (en bleu foncé,  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) et de l'argent particulaire (en bleu clair,  $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) biogènes dans les eaux libres de l'océan au large du Saanich Inlet (Colombie Britannique, Canada).

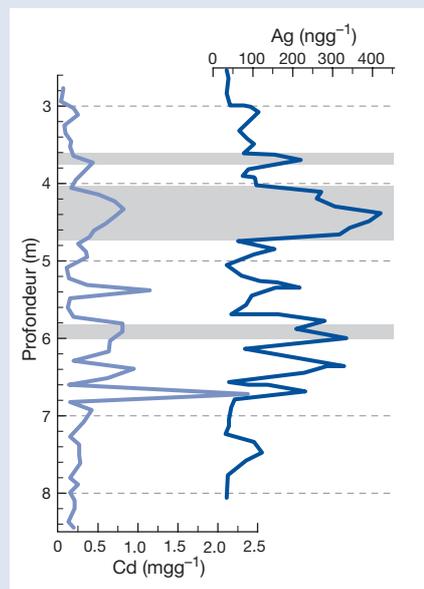


Fig. 3: Profils de Cd et de l'Ag dans la carotte de sédiments du Pacifique (Seamount Patton-Murray, Golfe de l'Alaska). Les zones en gris indiquent la présence de diatomées.

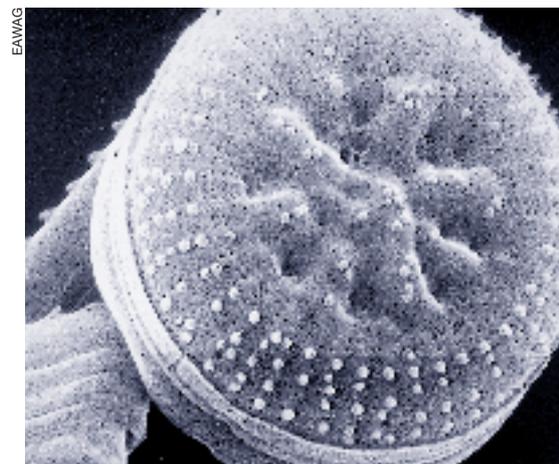
## L'argent dans les particules sédimentées

On a tout d'abord cherché à vérifier si l'Ag était réellement fixé aux diatomées et s'il se déposait avec les algues mortes. Des pièges à sédiment ont été installés à cet effet en-dessous de la zone éclairée des eaux libres du Saanich Inlet (Colombie Britannique, Canada). Les pièges à sédiment ont été vidés tous les mois pour étudier la teneur en silice et en Ag biogènes de la matière sédimentée. Pendant les mois d'été, on observe une augmentation des taux de sédimentation de la silice suite à l'augmentation de la production de diatomées. Notre expérience a révélé une augmentation concomitante des concentrations d'argent (Fig. 2). La concentration d'Ag maximale était près de 12 fois plus élevée que la concentration moyenne dans les sédiments. De telles concentrations n'ont été jusqu'ici observées que dans des zones fortement contaminées suites aux activités humaines, comme p. ex. dans les sédiments déposés devant Long Island au large de New York qui subissent les effets des déversements en eau profonde des eaux usées de la ville. Les concentrations élevées en Ag mesurées dans les eaux très peu polluées de l'étude permettent donc de suggérer à une forte absorption d'argent par les diatomées.

## La concentration en argent: Un indicateur de la production de diatomées

Dans les sédiments marins, les coques de diatomées sont souvent totalement dégradées et il est donc difficile d'y étudier la production primaire du passé. Notre étude a donc tenté dans un deuxième temps de déterminer si l'Ag pouvait être utilisé comme traceur spécifique de la production de diatomées. Les essais ont été réalisés sur une carotte de sédiments de 8 m de long prélevée dans le Golfe de l'Alaska et contenant trois couches de diatomées (Fig. 3, zones en gris). Celles-ci sont dues à une augmentation périodique de la production primaire et sont caractérisées par une concentration élevée en silice.

Les concentrations en Ag et en Cd ont été déterminées dans chacune des couches de la carotte de sédiments. La figure 3 montre que les profils de concentrations se déroulent de la même manière pour les deux métaux. Dans de nombreux horizons, une augmentation des concentrations révèle une production primaire accrue au moment de la sédimentation. Une analyse des rapports Ag/Cd révèle la présence de deux «types» d'horizons: les horizons du premier



Coque siliceuse de la diatomée *Cyclotella stelligera*.

type présentent un rapport Ag/Cd d'env. 0,2 alors que ceux du deuxième type, au nombre de trois, présentent une accumulation d'Ag par rapport au Cd avec un rapport d'env. 0,4. Etant donné que ces trois horizons correspondent à ceux mentionnés ci-dessus, on peut clairement attribuer l'augmentation du rapport Ag/Cd à une production accrue de diatomées. Nos résultats montrent ainsi pour la première fois une toute nouvelle possibilité d'utilisation de l'Ag comme traceur pour l'étude de la production de diatomées.



Gabriela Friedl, géologue, dirige le groupe de travail «Chimie des sédiments» à la division «Eaux de surface». Les résultats présentés ici ont été obtenus dans le cadre d'un stage post-doctoral effectué à l'University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Coauteur: Tom Pedersen, Département of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia, Vancouver.

- [1] Calvert S.E., Pedersen T.F. (1992): Organic carbon accumulation and preservation in marine sediments: How important is anoxia? In: Whelan J.K., Farrington J.W. (eds.), Organic matter: productivity, accumulation and preservation in recent sediments. Columbia University Press, New York, 533 pp.
- [2] Crusius J., Calvert S., Pedersen T.F., Sage D. (1996): Rhenium and molybdenum enrichments in sediments as indicators of oxic, suboxic and sulfidic conditions of deposition. *Earth & Planetary Science Letters* 145, 65–78.
- [3] Fisher N.S., Wentz M. (1993): The release of trace elements by dying marine phytoplankton. *Deep-sea Research* 40, 671–694.
- [4] Friedl G., Pedersen T.F., Crusius J., Donald D.: Enrichment of silver in marine sediments as an indicator of high paleoproductivity. *Paleoceanography*, soumis.

# Les microstructures thermiques: Traceurs pour l'étude des turbulences et du brassage des eaux

**Les variations de température les plus faibles enregistrées dans les eaux se produisent sur une distance de quelques fractions de millimètre. Ces variations, appelées microstructures thermiques, peuvent être utilisées comme traceurs pour l'étude des mélanges turbulents et de leur dynamique microspatiale. Cette méthode permet de faire la distinction entre les divers facteurs caractérisant le phénomène de brassage des eaux comme p.ex. l'effet du vent et celui du refroidissement.**

Les méthodes classiques basées sur l'utilisation de traceurs sont conçues selon le principe suivant: l'évolution dans le temps de concentrations mesurées à différents endroits est révélatrice de la répartition et des taux de transformation des composés concernés. Dans les «eaux stagnantes», telles que les lacs, les mers et les estuaires, qui présentent presque toujours une stratification et des gradients de température bien marqués, les variations de température  $\Delta T'$  (Fig. 1) peuvent être utilisées comme des traceurs naturels. Etant donné que la température se comporte de manière totalement conservative pendant un laps de temps allant de quelques secondes à quelques minutes, les variations  $\Delta T'$  sont le reflet direct des déplacements turbulents de l'eau. Ces deux propriétés forment la base

de la méthode des microstructures thermiques qui a pour but de déterminer les taux de mélange à partir d'un grand nombre de mesures de  $\Delta T'$ . Lors du brassage des eaux, les écoulements turbulents se produisent surtout à l'horizontale, et les échanges verticaux sont fortement réduits. Mais même en direction verticale, le mélange turbulent est de cent à plusieurs millions de fois plus important que la diffusion moléculaire toujours présente ( $K_T$  ou  $K_S$ , Tab. 1). Etant donné que l'on quantifie les flux verticaux de matières, comme les flux moléculaires, par le produit de la diffusivité turbulente  $K_v$  ( $m^2 s^{-1}$ ) et le gradient de concentration  $\partial C/\partial z$  ( $mol m^{-4}$ ,  $z =$  profondeur), la caractérisation de  $K_v$  revêt une importance pratique particulière.

## Le principe

Quel rapport y a-t-il entre les microstructures thermiques et les taux de mélange des eaux? L'idée fondamentale de notre méthode est illustrée à la figure 1 en prenant comme exemple un profil thermique du Lac de Neuchâtel. Le long d'un gradient thermique  $\partial T/\partial z$ , les masses d'eau voisines présentent des températures différentes. Si elles viennent à être mélangées de manière turbulente, on assiste à des variations  $\Delta T' \approx L' \cdot (\partial T/\partial z)$ , où  $L'$  représente le déplacement d'une masse d'eau à partir de son point de repos. Si l'on parvient à mesurer *in situ*  $\Delta T'$  et le gradient vertical  $\partial T/\partial z$  avec une grande résolution, on obtient une estimation de l'expansion  $L'$  et de la fréquence des tourbillons (Fig. 1). Deux modèles statistiques différents (voir encadré) permettent de calculer les taux de mélange ( $m^2 s^{-1}$ ) et la dissi-

pation d'énergie par turbulence ( $W kg^{-1}$ ) à partir de ces deux valeurs [détails dans 1]. La taille des tourbillons peut varier, en fonction de l'état de stratification et de l'énergie disponible, de quelques millimètres à plusieurs mètres, comme on l'observe p.ex. dans l'océan ou dans le Lac Baïkal. Les variations qui se produisent sur une distance inférieure à 1 m sont appelées *microstructures thermiques*.

## La mesure

Pour pouvoir caractériser les phénomènes de turbulence, il est primordial de déterminer les microstructures thermiques et de vitesse de déplacement avec une résolution de l'ordre du millimètre. En général, les profils sont établis à l'aide de sondes en descente ou en montée libre qui émettent vers un bateau ou bien même, aujourd'hui, à l'aide de sondes en dérivation libre dont les signaux sont captés par satellite. Pour remplir son rôle, la sonde doit se déplacer à une vitesse nettement supérieure à la vitesse turbulente  $w'$  (Tab. 1). L'inertie du détecteur thermique, qui est de l'ordre d'un centième de seconde, impose cependant une vitesse relativement faible. Une vitesse de déplacement de la sonde de l'ordre de 5 à 10  $cm s^{-1}$  représente un compromis acceptable qui permet de relever les profils verticaux de température avec une résolution de 0,5 à 1 mm env. Les détecteurs de température, qui ont des temps de réaction très courts, doivent impérativement être placés à la tête de la sonde pour obtenir un profil sans perturbations.

## L'application

La diffusion turbulente dans les eaux stratifiées est un phénomène qui joue un rôle important dans divers domaines. Dans la mer, p.ex., elle influence de manière décisive le destin des gaz à effet de serre ainsi que les transports de chaleur entre l'équateur et les pôles. Dans les lacs, elle a un effet sur la répartition des nutriments et des polluants, sur la production d'algues, sur le transport d'oxygène et sur d'autres paramètres

**Méthode du Nombre de Cox:** Avec cette méthode, on compare les gradients des variations de température  $\Delta T'$  (plus exactement  $[\partial T'/\partial z]^2$ ) avec les gradients moyens  $[\partial T/\partial z]^2$ . Le rapport des deux grandeurs, appelé nombre de Cox, donne une indication de l'importance numérique des taux de brassage turbulent par rapport aux taux moléculaires (voir Tab. 1 pour les ordres de grandeur).

**Méthode de dissipation:** Ce procédé exploite l'information contenue dans la «finesse» de la structure des fluctuations de température existantes. Plus la turbulence est intense, plus la taille des tourbillons les plus petits sera faible avant qu'ils soient aplanis sous l'effet de la viscosité de l'eau. On peut déduire de ces mini-structures la dissipation d'énergie turbulente (Tab. 1). La dissipation est la mesure classique de l'intensité de la turbulence dans les systèmes naturels.

d'oxydoréduction et enfin sur la formation de sédiments. La détermination expérimentale de la diffusivité verticale dans les eaux naturelles est délicate. En effet, le mélange des eaux, qui s'effectue à l'encontre de la stratification due aux différences de densité, se produit lentement et présente une grande hétérogénéité spatiale et temporelle. Comme le montre la figure 1, on observe une alternance de zones turbulentes et de zones inactives.

En général, les taux de mélange vertical sont déterminés «indirectement» par la distribution temporelle d'un traceur donné ou sont déduits du bilan thermique. Pour ce faire, on considère cependant une moyenne de tous les mélanges turbulents auxquels le traceur a été soumis. La mesure indirecte ne permet pas d'identifier les zones particu-

Symbole	Paramètres	Ordre de grandeur
$\Delta T'$	Variations (locales) de température dans les eaux	de 0,0001 à 0,1 °C
$K_v$	Diffusivité turbulente verticale (Taux de brassage $K_v = w' \cdot L'$ )	de $10^{-7}$ à $10^{-4}$ m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$K_T$	Diffusivité moléculaire de la température	$1,4 \cdot 10^{-7}$ m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$K_S$	Diffusivité moléculaire des matières dissoutes	de l'ordre de $10^{-9}$ m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$L'$	Hauteur des tourbillons	de qq cm à plusieurs m
$w'$	Vitesse verticale des tourbillons ( $w' = (\epsilon/N)^{1/2}$ )	de 0,01 à 10 cm s <sup>-1</sup>
$\epsilon$	Dissipation de l'énergie de turbulence sous forme de chaleur	de $10^{-11}$ à $10^{-6}$ W kg <sup>-1</sup>
$N^2$	Stabilité de la colonne d'eau ( $N^2 = -1/\rho \cdot \partial \rho / \partial z$ )	de $10^{-9}$ à $10^{-2}$ s <sup>-2</sup>

Tab. 1: Ordres de grandeur des paramètres caractéristiques de la turbulence dans des eaux stratifiées.

lièrement turbulentes ou inactives ou même de déterminer l'intensité du brassage à un endroit ou à un moment donné. La mesure directe par la méthode des microstructures thermiques permet par contre de caractériser les phénomènes de turbulence et de

distinguer dans leur étude la composante temporelle et la composante spatiale. Cette méthode a par exemple permis de déterminer le rôle de la couche limite du sol dans le brassage turbulent au sein de l'hypolimnion de lacs de petite à moyenne dimension (Fig. 2) [2]. Des mesures effectuées dans le Lac Baïkal [3] et dans les mers latérales montrent que, même dans les grandes masses d'eau, le brassage vertical dépend largement de processus ayant lieu dans les sédiments.

Notre méthode permet de plus d'étudier les phénomènes de turbulence dans diverses conditions physiques prises séparément. Il devient possible de paramétriser correctement divers processus physiques de brassage dans les modèles et de déterminer les diverses voies et les temps de séjour de l'énergie mécanique. On est ainsi en mesure de faire p. ex. la distinction entre l'effet du vent et celui du refroidissement, ce qui est pratiquement impossible avec des traceurs classiques.

Cette étude a bénéficié du soutien du Fonds National Suisse et de l'EAWAG.



**Alfred Wüest**, physicien, dirige la division «Écologie aquatique appliquée». Il enseigne la «Physique aquatique» à l'EPF de Zurich. Domaines de recherche: Processus de brassage dans les lacs et les rivières, influence des processus physiques sur les cycles biogéochimiques des eaux.

Coauteurs: Tobias Jonas, Andreas Lorke, Michael Schurter

- [1] Gloor M., Kocsis O., Omlin M., Schurter M., Wüest A. (1995): Temperaturmikrostrukturen – Eine Methode zur Bestimmung der Mischungsintensität in geschichteten Gewässern. Gas Wasser Abwasser 75, 1087–1096.
- [2] Wüest A., Piepke G., van Senden D.C. (2000): Turbulent kinetic energy balance as a tool for estimating vertical diffusivity in wind-forced stratified waters. Limnology & Oceanography 45, 1388–1400.
- [3] Ravens T.M., Kocsis O., Wüest A., Granin N. (2000): Small-scale turbulence and vertical mixing in Lake Baikal. Limnology & Oceanography 45, 159–173.

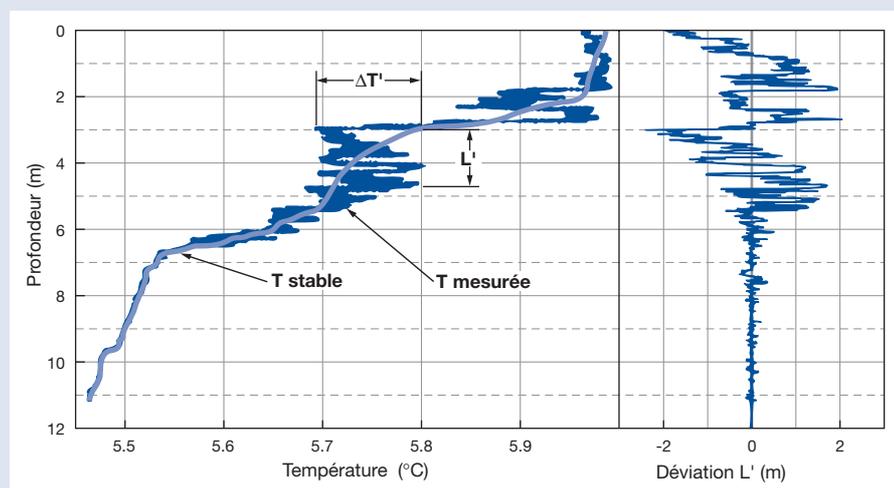


Fig. 1: Profil de température du Lac de Neuchâtel (à gauche, T mesurée) et déviation correspondante  $L'$  (à droite). Les déviations  $L'$  peuvent atteindre des écarts allant jusqu'à 2 m par rapport à la position de repos dans les zones stables (non turbulentes) (à gauche, T stable). Les variations de température  $\Delta T'$  sont le résultat du tourbillonnement de petites masses d'eau voisines ayant des températures différentes.

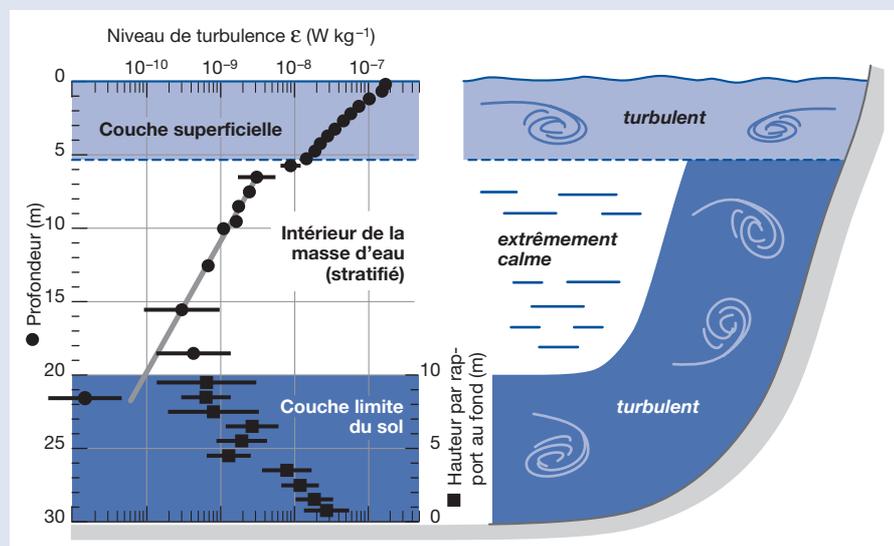


Fig. 2: Profil de turbulence caractéristique d'un lac (ici l'Alpnachersee). A la surface, le vent et le refroidissement de l'eau se traduisent directement par une énergie de turbulence. Cette énergie diminue avec la profondeur et est également atténuée par la stratification. Le centre de la masse d'eau est donc extrêmement calme. A proximité du fond, le niveau de turbulence augmente à nouveau sous l'effet des frottements.

# Distinction de divers habitats phréatiques à l'aide du radon utilisé comme traceur

**Les zones alluviales abritent un réseau complexe d'habitats aquatiques alimentés aussi bien par des eaux de surface que par des eaux souterraines. A l'aide de la méthode au radon, il est possible de reconnaître les habitats influencés par les eaux souterraines. Dans la «zone alluviale moyenne» de la Vallé de Blenio, cette méthode complétée par une détermination simultanée des concentrations de sulfates nous a permis de distinguer trois types d'eaux souterraines caractérisées par différents taux d'eau de surface d'infiltration récente.**

Les zones alluviales des fleuves représentent des zones d'écosystèmes aquatiques régulièrement inondées par des eaux [1]. On les trouve souvent dans les fonds graveleux de vallée et elles abritent des communautés animales et végétales caractéristiques qui varient en fonction du niveau piézométrique de la nappe phréatique ainsi que de la durée et de la fréquence des périodes d'inondation. Les zones alluviales sont le lieu d'échanges importants entre l'eau de surface et l'eau souterraine: l'eau de surface peut s'infiltrer dans l'eau souterraine et inversement, l'eau souterraine peut effluer.

## Le radon comme traceur dans l'eau souterraine

Les habitats phréatiques des zones alluviales sont alimentés par des eaux contenant des taux variables d'eau souterraine et

d'eau de surface et sont caractérisés par des durées variables de séjour de ces eaux mixtes en leur sein [1]. A l'aide du traceur naturel qu'est le radon, il est possible d'estimer ces deux variables. L'eau souterraine contient naturellement des concentrations mesurables de radon, gaz rare radiocatif (isotope Rn 222, ci-après Rn; voir encadré). Par contre, l'eau de surface ne contient pratiquement pas de Rn, car celui-ci diffuse dans l'atmosphère. Lors de son transport dans le sous-sol, le Rn se concentre dans l'eau récemment infiltrée pour atteindre une teneur constante au bout d'env. 15 jours (Fig. 1) [2].

## Influence des eaux souterraines dans les zones alluviales de la Vallé de Blenio

Une étude de cas de l'EAWAG menée dans la «zone alluviales moyenne» de la Vallé de Blenio (Acquarossa – Ponto Valentino, Canton du Tessin; Fig. 2) avait pour but d'évaluer dans quelle mesure les habitats aquatiques de ces zones humides étaient influencés par les eaux souterraines. Une partie des zones alluviales moyennes est alimentée par les afflux latéraux [3]. Les afflux latéraux sont constitués d'eaux souterraines qui s'écoulent le long des rives vers le fond de la vallée et qui surgissent dans les zones alluviales ou dans les cours d'eau sous forme de sources. C'est par exemple ce qui se produit dans les éboulis de pente de l'Uregn, un cours d'eau latéral du Brenno. On trouve d'autre part des sources ou autres émergences aussi bien dans le lit du Brenno que sur ses berges qui

sont, elles, alimentées par la nappe alluviale du fleuve. Ces eaux sont caractérisées par une forte proportion d'eaux de surface d'infiltration récente.

A trois dates différentes (en juillet et en octobre 1999, et en avril 2000) 9 points d'étude sélectionnés dans la zone alluviale moyenne ont fait l'objet de prélèvements. Sur ces sites, de l'eau a été prélevée par pompage dans des tubes de prélèvements

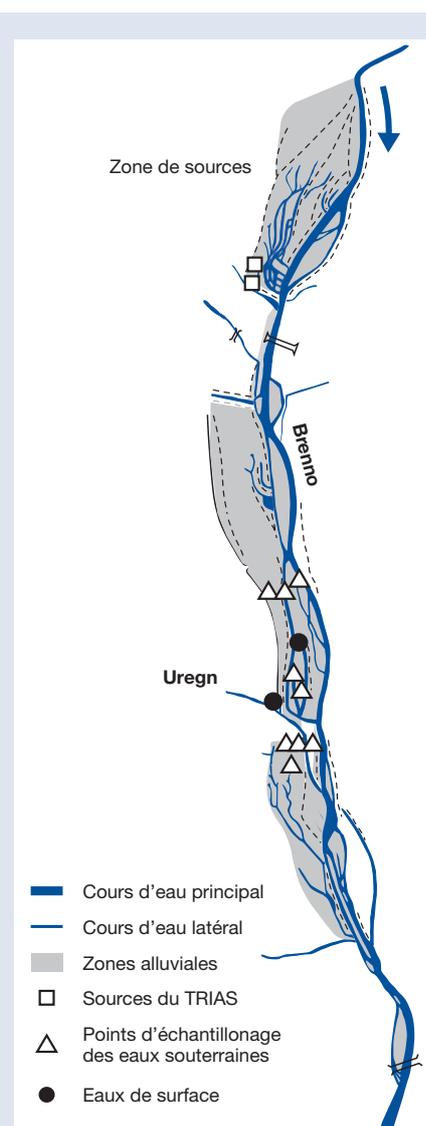


Fig. 1: Extrait de la carte de la zone alluviale moyenne de la Vallé de Blenio (Canton du Tessin) indiquant les points de prélèvement.

### Le radon

Le radioisotope radon 222 (durée de demi-vie de 3,8 jours) se forme à partir du radium 226 dans la chaîne de désintégration naturelle radioactive de l'uranium 238. D'un point de vue chimique, le radon est un gaz rare peu réactif. Il possède une grande capacité de pénétration: Là où une roche poreuse contient de l'uranium et/ou du radium, du radon peut être libéré par diffusion ou émanation. Il atteint de cette manière les eaux souterraines ou les nappes de gaz, à partir desquels il finit par se dégager dans l'atmosphère.

La radioactivité se mesure par le nombre de désintégrations par seconde et s'exprime en Becquerel (Bq). La concentration d'activité dans les eaux souterraines s'exprime en Bq/l.

permettant de récolter des échantillons jusqu'à 10 m de profondeur. A titre de comparaison, l'étude a également porté sur de l'eau provenant de deux sources émergentes de roches du Trias riches en sulfates ainsi que sur les eaux superficielles de l'Uregn et du chenal principal du Brenno (Fig. 1). Les concentrations en Rn des échantillons d'eau ont été déterminées sur le terrain à l'aide d'un détecteur semiconducteur.

### Trois types d'eaux souterraines

Les concentrations en Rn que nous avons mesurées étaient comprises entre 5 et 45 Bq/l (explication de l'unité Bq: voir encadré). Comme prévu, les eaux de surface du Brenno et de l'Uregn ne contenaient presque pas de Rn. Par contre, les échantillons prélevés dans les deux sources du Trias présentaient des concentrations élevées en Rn (>33 Bq/l), ce qui n'est pas surprenant car il s'agit là d'une eau souterraine ancienne et non mélangée. Les échantillons

issus des 9 sites de prélèvement d'eaux souterraines contenaient de l'eau mixte présentant des teneurs en Rn allant de 5 à 33 Bq/l. Etant donné la grande dispersion des valeurs mesurées, il est impossible de dégager un schéma explicatif commun aux échantillons d'eaux mixtes. Sur certains points de mesure, les teneurs en Rn variaient même entre deux dates de prélèvement.

Pour mieux comprendre s'il s'agissait de différents types d'eaux souterraines, nous avons procédé à une analyse des concentrations en sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). L'eau du Brenno est réputée pour ses concentrations en  $\text{SO}_4^{2-}$  relativement élevées qui résultent de la dissolution des gypses et des anhydrites du Trias qui se produit dans la partie supérieure de son bassin versant [4, 5]. Effectivement, les teneurs en  $\text{SO}_4^{2-}$  de la plupart des échantillons étaient comprises entre 1 et 2,5 mmol/l. Par contre, certains échantillons d'eau souterraine et d'eau de l'Uregn présentaient des teneurs très faibles en  $\text{SO}_4^{2-}$  (<1 mmol/l). La figure 3 montre qu'en mettant en relation les concentrations en Rn et en  $\text{SO}_4^{2-}$ , on peut distinguer trois types d'eaux souterraines: Le premier groupe comprend des échantillons présentant des teneurs faibles en  $\text{SO}_4^{2-}$  et moyennes en Rn. Il semble s'agir ici d'eaux souterraines assez anciennes probablement alimentées par les afflux latéraux des éboulis de pente de l'Uregn. Les faibles teneurs en  $\text{SO}_4^{2-}$  indiquent un faible taux d'infiltration d'eau de surface. Le deuxième groupe rassemble des échantillons présentant des concentrations moyennes en  $\text{SO}_4^{2-}$  et faibles en Rn. Cette combinaison trahit des eaux mixtes relativement récentes caractérisées

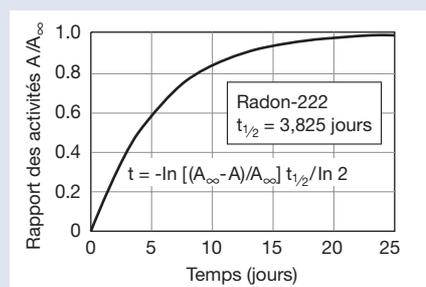


Fig. 2: Loi expliquant l'augmentation temporelle des concentrations en radon: Au bout de 15 jours (env. 4 demi-vies,  $t_{1/2}$ ), la concentration atteint 94% de la concentration d'activité constante ( $A_\infty$ ). A partir de la concentration  $A$  mesurée dans un échantillon d'eau, on peut calculer avec la formule indiquée le rapport des concentrations d'activité  $A/A_\infty$  et donc la durée de séjour  $t$  de l'échantillon concerné.

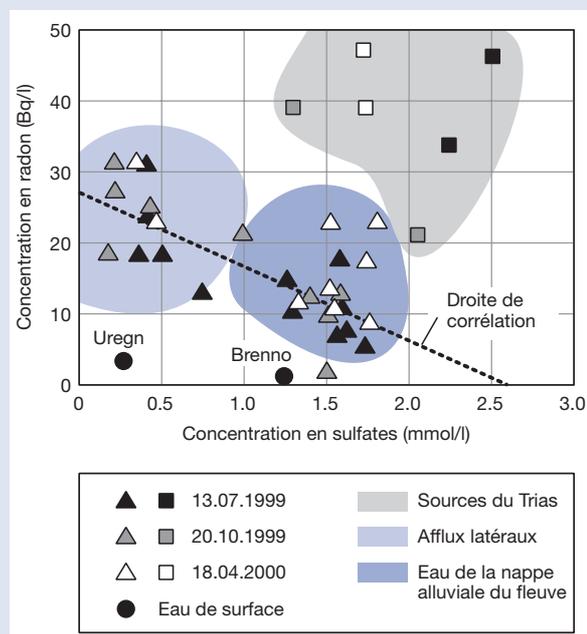


Fig. 3: Détection de différents types d'eaux souterraines à l'aide du radon et des sulfates. Triangle: Echantillons de sites d'eaux souterraines. Carrés: Echantillons de sources de Trias. ■ Nuage bleu clair: Eau mixte assez ancienne comprenant un faible taux d'eau de surface et un taux élevé d'eau souterraine (11 échantillons sur 4 sites). ■ Nuage bleu foncé: Eau mixte relativement jeune comprenant un taux élevé d'eau de surface et un faible taux d'eau souterraine (18 échantillons sur 8 sites). Droite de corrélation pour l'ensemble des 29 valeurs:  $y = -9.5x + 27$ ;  $r = 0.68$  ■ Nuage gris: Eaux souterraines anciennes non mélangées provenant de sources du Trias (6 échantillons sur 2 sites).



La «zones alluviales moyennes» de la Vallée de Blenio, Canton du Tessin.

par une infiltration assez importante des eaux du Brenno. Le troisième groupe, enfin, comprend les échantillons provenant des sources du Trias qui sont caractérisés par des concentrations élevées à la fois en  $\text{SO}_4^{2-}$  et en Rn.

La concentration en radon, combinée ici avec la teneur en sulfates, permet donc d'évaluer l'âge et le taux de mélange des eaux souterraines. Suivant la qualité de l'eau souterraine, on s'attend à rencontrer dans ces habitats phréatiques des biocénoses différentes. Une caractérisation complète des habitats phréatiques doit donc comprendre des études biologiques et géochimiques détaillées en plus des aspects hydrologiques présentés ici.



Eduard Hoehn, hydrogéologue et chercheur à la division «Ressources aquatiques et eau potable», dirige le groupe «Zones alluviales» dans le projet «Eco-électricité». Domaines de recherche: Echanges entre eaux souterraines et eaux de surface, pollution des eaux souterraines, méthodes utilisant des traceurs.

Cocuteurs: Tom Gonser, Doris Hohmann, Ruth Stierli

[1] Brunke M., Gonser T. (1997): The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology* 37, 1–33.  
 [2] Hoehn E., von Gunten H.R. (1989): Radon in groundwater – a tool to assess infiltration from surface waters to aquifers. *Water Resources and Research* 25, 1795–1803.  
 [3] Holocher J., Matta V., Aeschbach-Hertig W., Beyerle U., Hofer M., Peeters F., Kipfer R. (2001): Noble gas and major element constraints on the water dynamics in an alpine floodplain. *Ground Water* 39, 841–852.  
 [4] Mazor E., Vuataz F. (1990): Hydrology of a spring complex, studied by geochemical time-series data, Acquarossa, Switzerland. *Applied Geochemistry* 5, 563–569.  
 [5] Pastorelli S., Marini L., Hunziker J.C. (1999): Water chemistry and isotope composition of the Acquarossa thermal system, Ticino, Switzerland. *Geothermics* 28, 75–93.

# Éléments conservatifs vers de nouveaux horizons

**Un nouveau modèle des échanges gazeux dans les eaux souterraines basé sur l'idée d'un équilibre entre l'eau et l'air emprisonné dans le sol donne une explication physique à la présence occasionnelle d'air en excès dans les eaux souterraines. Il permet ainsi une interprétation pertinente des concentrations gazeuses de l'atmosphère de même qu'une meilleure quantification de l'hélium radiogène, ce qui permet de dater les eaux souterraines jeunes avec une plus grande exactitude.**

Au cours des trois dernières décennies, des méthodes impliquant des traceurs ont été employées avec succès pour étudier la formation d'eau profonde dans les océans et les grands lacs [1, 2]. Ces méthodes sont basées sur la mesure de gaz conservatifs à l'état de trace comme p. ex. les gaz rares. Si l'on suit l'évolution dans le temps des concentrations de ces traceurs transitoires, on peut reconnaître des lois générales simples: l'eau s'enrichit en  $^3\text{He}$  (hélium) puisque le tritium ( $^3\text{H}$ ), isotope radioactif de l'hydrogène lié aux molécules d'eau, se désintègre en  $^3\text{He}$ . Les concentrations en traceurs transitoires dans l'eau donnent donc une indication sur le temps écoulé depuis que l'eau a entre tenu pour la dernière fois des échanges avec l'atmosphère (âge de l'eau).

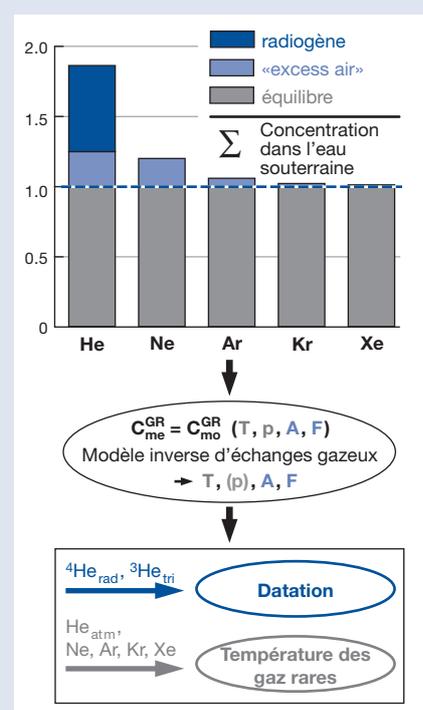
Il était évidemment tentant d'essayer de transposer ces concepts efficace à l'étude des eaux souterraines et d'utiliser ce genre de traceurs pour déterminer leur temps de séjour dans les nappes ainsi que leur taux de renouvellement. Mais étant donné que les échanges gazeux entre l'air du sol et l'eau souterraine s'effectuent selon des mécanismes beaucoup plus complexes qu'entre l'eau libre et l'atmosphère, il n'était pas possible d'appliquer telles quelles les lois valables pour les océans. Notamment la présence d'air en excès dans les eaux souterraines rend la datation au  $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$  particulièrement délicate. Pour parer à ces difficultés, le groupe «Isotopes de l'environnement» de l'EAWAG s'attache depuis plusieurs années à mieux comprendre les échanges gazeux entre l'atmosphère, le sol et les eaux souterraines.

## Air en excès dans les eaux souterraines

Étant donné que la solubilité des gaz rares dans l'eau dépend fortement de la température, leur concentration d'équilibre donne une indication directe sur la température à laquelle se sont effectués les échanges gazeux. Contrairement à l'eau libre, les eaux souterraines présentent des concentrations en gaz rares atmosphériques nettement supérieures à leurs concentrations d'équilibre (Fig. 1). Pour déterminer la température de l'échange, il faut donc distinguer que les concentrations mesurées sont composées des concentrations d'équilibre contenant les informations paléoclimatiques, ainsi que des composantes excédentaires. L'excédent fait partie d'une fraction appelée air en excès ou «excess air», qui a à peu près la composition de l'atmosphère. Bien que la présence d'air en excès dans les eaux souterraines soit connue depuis des décennies et qu'elle constitue un obstacle à l'utilisation des gaz rares atmosphériques pour la détermination de la température, on a très peu cherché à comprendre comment l'«excess air» se formait dans les eaux souterraines.

Dans l'eau, le néon (Ne), l'argon (Ar), le krypton (Kr) et le xénon (Xe) proviennent uniquement de l'atmosphère alors que l'hélium peut également avoir une origine non atmosphérique. Sans compter l'hélium, on dispose donc de quatre gaz rares atmosphériques dont les concentrations peuvent servir à la résolution d'un système d'équations pour caractériser les échanges gazeux dans l'eau souterraine (Fig. 1). Ceux-ci sont décrits par trois principaux paramètres arbi-

traires: la température, la quantité d'air en excès et son fractionnement (composition modifiée par rapport à l'atmosphère). La pression est souvent clairement définie par l'altitude de la zone d'infiltration; elle est donc connue. Ces équations peuvent être résolues de manière itérative à l'aide de méthodes statistiques appropriées et livrent



**Fig. 1: Modèle explicatif de la sursaturation en gaz rares dans les eaux souterraines.** Les concentrations en gaz rares atmosphériques mesurées ( $\Sigma$ ) sont nettement plus élevées que leurs concentrations d'équilibre (en gris) qui sont déterminées en fonction de la pression (p), de la température moyenne (T) et de la solubilité spécifique des gaz. Plus un gaz rare est léger, plus sa concentration excédentaire est importante («excess air», A, en bleu clair). L'excédent relatif de gaz rares purement atmosphériques (Ne, Ar, Kr, Xe) est similaire à celui de l'atmosphère, mais enrichie en gaz lourds (F, fractionnement). He est le seul gaz rare à être de plus produit par désintégration d'autres atomes ( $^4\text{He}$ : désintégration de l'U et du Th,  $^3\text{He}$ : désintégration du  $^3\text{H}$ ). Dans le modèle, les paramètres T, A, F et p ainsi que les concentrations des 4 gaz rares atmosphériques Ne, Ar, Kr et Xe ( $C_{me}^{GR}$ , me = mesurée, mo = modélisée) interviennent. Des méthodes statistiques permettent dans ce modèle de calculer les composantes atmosphériques et radiogènes de la concentration en He, ce qui autorise une bonne datation des eaux souterraines.

des valeurs pour la température et les autres paramètres arbitraires [3]. Des modèles établis sur des bases physiques plus ou moins solides ont déjà été proposés pour décrire les concentrations en gaz rares atmosphériques des eaux souterraines. Dans la plupart des cas, ils n'expliquent cependant pas l'excédent d'hélium atmosphériques que l'on peut déduire des concentrations en  $^3\text{He}$  et  $^4\text{He}$  mesurées dans des eaux souterraines jeunes appropriées [3].

## L'air emprisonné dans le sol

Il existait donc un besoin important d'une nouvelle approche des échanges gazeux dans les eaux souterraines prenant davantage en compte les rapports réels existant dans le sol entre l'eau et l'air et livrant de surcroît une prévision réaliste du comportement de l'hélium.

Contrairement à ce que les termes laissent supposer, il existe dans le profil du sol une transition continue entre la zone non saturée (interstices remplis d'air et d'eau) et la zone saturée (interstices remplis uniquement d'eau). Dans cette zone transitoire quasi saturée, entre 10 et 20% des pores restent remplis d'air. L'air intersticiel y reste emprisonné et immobilisé. Cet air emprisonné ou «entrapped air» contrôle d'une manière prépondérante la formation d'eau phréatique étant donné qu'il présente un obstacle temporaire mais efficace à l'infiltration.

Même si l'«entrapped air» a été bien étudié par la pédologie, ce sont nos travaux qui les premiers ont établi une relation fonctionnelle entre «excess air» et «entrapped air» et

mis ainsi l'étude des échanges gazeux dans les eaux souterraines sur une nouvelle base [4, 5]. Les vitesses d'écoulement de l'eau sont très faibles dans la zone quasi saturée (1 m par jour ou moins); de plus, la pression y est de 5 à 10% plus élevée que la pression atmosphérique sous l'effet du surcroît de charge hydrostatique. On peut donc supposer qu'à cause de la pression localement plus élevée, il s'établit un nouvel équilibre entre l'air emprisonné dans le sol et l'eau environnante, chaque gaz atteignant son propre équilibre de solution. Etant donné que l'air emprisonné constitue un réservoir gazeux limité par rapport à l'eau et qu'en même temps la pression dans les bulles doit correspondre à la pression externe, les pressions partielles à l'intérieur des bulles de gaz vont s'adapter aux nouvelles conditions. Par rapport à l'air non fractionné, la composition élémentaire des bulles de gaz va se décaler vers les gaz rares légers. Par contre l'eau s'enrichit par rapport à l'«excess air» pur en gaz rares lourds et plus solubles (Fig. 1).

Ce nouveau modèle d'échanges gazeux qui postule l'existence d'un équilibre entre l'eau souterraine et «entrapped air» prédit donc exactement l'excès relatif de gaz rares qui est typique des eaux souterraines. Il met en particulier les excès de gaz rares en relation avec des grandeurs physiques directement observables dans la zone quasi saturée, comme p. ex. la surpression due à l'eau en cours d'infiltration (Fig. 2), ce qui fait de l'«excess air» un paramètre supplémentaire pour les interprétations d'ordre paléoclimatique [5–7]. D'autre part, le modèle proposé est à l'heure actuelle le seul concept à pré-

dire des concentrations d'hélium atmosphériques «réalistes» au sens statistique du terme.

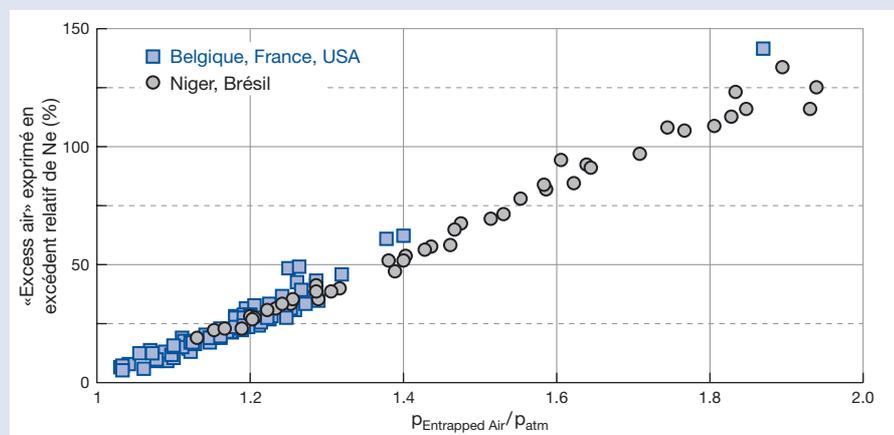
## Conclusion: Une datation exacte de l'eau souterraine

En rétrospective, on constate que la nouvelle approche a non seulement étendu les conceptions actuelles sur les échanges gazeux, et ainsi établi des bases physiques solides pour la détermination de la température à l'aide de gaz rares, mais qu'elle a également amélioré considérablement la qualité de la datation au  $^3\text{H}\text{-}^3\text{He}$  des eaux souterraines jeunes. Le modèle donne en général un âge de l'eau moins élevé et donc plus réaliste que les anciennes approches basées sur le fractionnement qui donnaient souvent des temps de séjour trop longs pour être crédibles.



**Rolf Kipfer**, physicien de l'environnement, dirige le groupe «Isotopes de l'environnement». Domaines de recherche: Méthodes utilisant des traceurs naturels pour l'étude des eaux souterraines et des lacs, méthodes numériques pour l'analyse de données et modélisation de systèmes aquatiques.

**Coauteurs:** Werner Aeschbach-Hertig, Urs Beyerle, Matthias Brennwald, Markus Hofer, Johannes Holocher, Frank Peeters



**Fig. 2:** «Excess air» dans des eaux souterraines situées à différentes latitudes. Les eaux souterraines des régions arides (Niger, Brésil) présentent généralement davantage d'«excess air» que celles des zones tempérées (Belgique, France, USA). Des échantillons prélevés au Niger dans des eaux souterraines âgées de plus de 5000 ans ont p. ex. des proportions d'«excess air» particulièrement élevées. Des études paléoclimatiques rapportent que le climat de la région actuelle du Sahel était alors beaucoup plus humide qu'aujourd'hui («green Sahara»). On peut supposer que ces conditions humides ont favorisé la recharge des nappes phréatiques et que cette période était caractérisée par une oscillation importante du niveau des nappes. L'augmentation consécutive de la surcharge hydraulique a alors induit une augmentation de pression dans la zone quasi saturée, ce qui a finalement entraîné une libération accrue d'«excess air» dans les eaux souterraines [6].

- [1] Hohmann R., Kipfer R., Kocsis O., Peeters F., Schurter M., Sturm M., Imboden D. (1996): Den Geheimnissen des Baikalsees auf der Spur. In: EAWAG-Jahresbericht, Dübendorf, p. 3–8.
- [2] Imboden D. (1994): Der Vierwaldstättersee – fast ein helvetischer Ozean. In: EAWAG-Jahresbericht, Dübendorf, p. 7–12.
- [3] Aeschbach-Hertig W., Peeters F., Beyerle U., Kipfer R. (1999): Interpretation of dissolved atmospheric noble gases in natural waters. *Water Resources Research* 35, 2779–2792.
- [4] Aeschbach-Hertig W., Peeters F., Beyerle U., Kipfer R. (2000): Palaeotemperature reconstruction from noble gases in ground water taking into account equilibration with entrapped air. *Nature* 405, 1040–1044.
- [5] Holocher J., Peeters F., Aeschbach-Hertig W., Beyerle U., Braunwald M., Hofer M., Kipfer R. (2000): New insights into the processes controlling the formation of excess air in ground water. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union, San Francisco*, 81, F 441.
- [6] Aeschbach-Hertig W., Beyerle U., Holocher J., Peeters F., Kipfer R. (2001): Excess in groundwater as a potential indicator of past environmental changes. In: International conference on the study of environmental change using isotope techniques, IAEA, Vienna, p. 34–36.
- [7] Peeters F., Beyerle U., Aeschbach-Hertig W., Holocher J., Kipfer R. (2000): Recharge temperature, excess air fractionation and groundwater dating: improving the analysis by including noble gas isotopes, *EOS, Trans. Am. Geophys. Union, San Francisco*, 81, F 440–441.

# Les facteurs de risque dans l'eau

## Une interview avec Ruth Gonseth

**Ruth Gonseth a été représentante des Verts au Conseil National de 1991 à mai 2001. Dans ces fonctions, elle s'est activement penchée sur le problème des polluants dans les eaux suisses et a soumis au parlement les dossiers «Substances à activité endocrinienne. Nécessité de développer la recherche» et «Réduire l'emploi des substances agissant sur le système hormonal». Par ailleurs, Mme Gonseth dirige un cabinet de dermatologie et est un membre actif de l'association des «Médecins en faveur de l'environnement». L'EAWAG news l'a interrogée sur les motifs de son engagement, sur le rôle international de la Suisse et sur les missions de la recherche.**

**EAWAG news: Vous êtes très engagée sur la question des polluants. Quels sont vos motifs?**

**Ruth Gonseth:** Il y a déjà longtemps que cette question me préoccupe. J'ai appris à travers de nombreux reportages publiés dans la presse que les produits chimiques déversés dans l'environnement pouvaient avoir des effets néfastes sur les animaux et

sur les êtres humains, même à des concentrations infinitésimales. En même temps, je vois aussi toujours les choses avec les yeux du médecin. Je suis très préoccupée par l'augmentation de la fréquence de perturbations des fonctions de reproduction tant chez l'homme que chez la femme ou par le nombre croissant de cas de cancer du sein, des testicules et de la prostate, mala-

dies qui sont aussi mises en rapport avec les polluants endocrines de l'environnement. Mais c'est surtout après avoir lu le rapport de l'OFEFP «Substances à effets endocrines dans l'environnement», auquel l'EAWAG a également participé, que je suis vraiment devenue active. C'est un rapport sur l'état actuel des connaissances sur le sujet qui montre bien à quel point on en sait peu. J'ai été choquée de constater que la Suisse n'avait jusque là consacré que 500 000 francs en 5 ans à ce domaine de recherche très important. C'est pourquoi j'ai déposé en 1999 une première interpellation que j'ai renouvelée quand j'ai constaté au printemps 2000 que le Conseil Fédéral n'avait toujours pas pris de mesures convaincantes. D'autre part, l'OCDE avait entretemps publié un rapport qui révélait que la disparition d'espèces animales et végétales était plus importante en Suisse que dans d'autres pays, et que cela pouvait en partie être dû à la pollution des eaux. 45 des 54 espèces piscicoles présentes en Suisse y sont menacées. C'est réellement choquant!

**Etes-vous satisfaite du résultat de vos interpellations?**

Oui, pour le moment je suis plutôt contente. Suite à mes demandes répétées, le Conseil Fédéral a décidé de lancer un programme de recherche national intitulé «Perturbateurs endocriniens: Importance pour les êtres humains, les animaux et les écosystèmes». Dans ce cadre, la Confédération met 15 millions de francs à la disposition de la recherche pour les 5 prochaines années. La Suisse compte dans ce domaine d'excellents chercheurs qui sont en mesure de tirer profit des crédits accordés pour acquérir des connaissances indispensables.

**Au niveau de la recherche, on voit donc que les choses sont en train de bouger. Au-delà de ça, quelles mesures l'Etat doit-il prendre à court et à moyen terme pour endiguer le problème de la pollution des eaux?**

Pour pouvoir prendre des décisions, il faut tout d'abord établir un registre exhaustif des émissions de polluants. Comme c'est déjà



Foto: S. Wey, Zurich

«Il faut appliquer le principe du pollueur-payeur et introduire des taxes d'incitation ainsi qu'une responsabilité civile plus étendue.»

le cas pour les polluants atmosphériques, il doit faire état des quantités de polluants déversés et des risques potentiels qu'ils représentent. Je crois que nous sortirions vraiment de notre torpeur si nous avions devant les yeux la liste de tous les polluants que nous déversons dans les eaux et dans l'environnement et si nous réalisions l'énorme quantité que cela représente.

En même temps, de nombreux produits qui sont déjà sur le marché, comme p. ex. les filtres solaires, doivent être soumis à de nouvelles analyses pour détecter une éventuelle activité hormonale. Là où il est démontré que des produits présentent un effet néfaste sur les êtres vivants ou sur l'environnement, comme c'est par exemple le cas des nonylphénols contenus dans les produits d'entretien, je suis en faveur d'une interdiction pure et simple.

Mais il ne faut pas en rester uniquement à un traitement des symptômes. Les producteurs et les distributeurs des substances doivent faire preuve de plus de responsabilités. Il faut appliquer le principe du pollueur-payeur et introduire des taxes d'incitation et une responsabilité civile plus étendue. L'industrie serait alors vraiment motivée et se sentirait obligée de soumettre les nouvelles substances à des analyses complètes et au moindre doute de renoncer à leur mise sur le marché.

**Pensez-vous qu'il est possible d'appliquer le principe du pollueur-payeur?**

Cela sera sûrement difficile car l'industrie productrice dispose d'un très fort lobby. En même temps, de nombreux utilisateurs des produits chimiques n'ont aucun intérêt à voir s'appliquer des mesures plus strictes. Notre agriculture intensive représente par exemple un énorme problème. Les pesticides qui sont encore employés en grande quantité dans l'agriculture sont déversés dans l'environnement. Nous devons nous fixer comme objectif de pouvoir nous passer de ces poisons. C'est pourquoi je soutiens énergiquement l'agriculture biologique. La demande croissante en produits bio de la part des consommateurs constitue

certainement une chance à saisir afin de prendre un tournant décisif dans ce domaine. La compétitivité des produits bio doit cependant être accrue par des taxes d'incitation sur les pesticides.

**Les polluants sont un problème global. Quels doivent être les objectifs politiques de la Suisse au niveau international?**

La Suisse doit absolument s'engager dans les commissions internationales. Il est urgent de parvenir à la définition de seuils internationaux pour les polluants. En Suisse, nous sommes bien placés, nous sommes dans le château d'eau de l'Europe, mais par exemple les pays situés plus en aval du Rhin ont encore de sérieux problèmes. Même si les concentrations de polluants dans le Rhin ont continuellement baissé ces dernières années, la bataille n'est pas encore gagnée. C'est pourquoi le travail de la «Commission Internationale pour la Protection du Rhin» est si important. Elle parvient à réunir autour d'une même table les divers états riverains pour qu'ils cherchent ensemble des solutions.

Le deuxième problème extrêmement préoccupant concerne les pays du Sud. De nombreuses personnes n'ont pas accès à de l'eau potable non polluée. Nous savons maintenant que l'eau se fera encore plus rare au XXI<sup>ème</sup> siècle et qu'elle sera source de conflits. En tant que pays privilégié, il est de notre devoir de transmettre notre savoir-faire. Il serait par exemple urgent d'agir au niveau de l'épuration des eaux usées qui fait totalement défaut même dans les grandes villes. Les technologies d'économie de l'eau devraient être employées dans le domaine de l'agriculture. En effet, près de deux tiers de l'eau y est gaspillée – elle s'évapore – alors qu'il existe des systèmes d'irrigation bien plus efficaces. La recherche suisse est donc également demandée dans ce domaine.

**Dans votre intervention parlementaire pour une convention internationale sur l'eau vous demandez également aux hommes politiques de devenir actifs. Quels sont les buts de cette convention?**

J'aimerais que le Conseil fédéral soutienne l'idée d'une convention internationale sur l'eau auprès des commissions responsables, comme par ex. lors de RIO 2002. Les principaux aspects de cette convention sont la définition de l'eau comme un bien public et commun qui doit être protégé et la définition de l'accès à l'eau potable non polluée comme un droit de l'homme. Pour garantir ce droit de l'homme, il faut fournir de gros efforts, notamment à cause des tendances de privatisation du secteur de l'alimentation en eau potable qui se font



«L'eau est un bien public et commun.»

sentir dans le monde entier. Cela ne veut pas dire que je suis opposée à une collaboration avec les entreprises privées, mais je pense que la surveillance et le contrôle de l'alimentation en eau potable doit rester affaire de l'Etat.

**Une dernière question pour finir: Quels devoirs la politicienne Ruth Gonseth donne-t-elle aux chercheurs?**

Je suis très heureuse que le programme de recherche national «Perturbateurs endocriniens» soit financé par la Confédération. Il est urgent d'acquérir les connaissances de base qui nous manquent encore, de rechercher inlassablement les causes de la disparition des espèces, de la progression du cancer, etc. Mais il me semble également que le monde scientifique devrait davantage discuter de ces problèmes en public pour que les gens cessent de consommer l'eau sans réfléchir.

Deuxièmement, je pense que les scientifiques devraient davantage intervenir au niveau politique. Le transfert de connaissances qui se fait très bien au sein du monde scientifique à travers les revues spécialisées doit absolument aussi être assuré entre chercheurs et politiciens.

**Je vous remercie beaucoup de cet entretien.**

Interview: Martina Bauchrowitz

Pour vos commandes, veuillez utiliser le bulletin encarté au milieu du présent numéro.

- 2870 **Von Gunten U., Salhi E.** (2000): Bromat im Trinkwasser – Ein Problem in der Schweiz? Gas, Wasser, Abwasser 80 (10), 705–710.
- 2871 **Zah R., Niederöst M., Uehlinger U.** (2000): Application of photogrammetry in freshwater ecology: analysing the morphology of a high Alpine flood-plain. Internat. Arch. Photogramm. & Remote Sensing 23 (B7), 1739–1746.
- 2872 **Magnuson J.J., Robertson D.M., Benson B.J., Wynne R.H., Livingstone D.M., Arai T., Assel R.A., Barry R.G., Card V., Kuusisto E., Granin N.G., Prowse T.D., Stewart K.M., Vuclin-ski V.S.** (2000): Historical trends in lake and river ice cover in the northern hemisphere. Science 289, 1743–1746.
- 2873 **Boller M., von Gunten U., Pianta R., Solcà L.** (2000): Modelling full scale advanced micropollutant oxidation. In: Chemical water and wastewater treatment VI, Proc. 9<sup>th</sup> Gothenburg Sympos. October 2–4, Istanbul, Turkey (Eds. H. Hahn et al.) Springer Verlag, Berlin, pp. 125–136.
- 2874 **Bundi U., Peter A., Truffer B., Wagner W., Mauch U., Scheidegger A.** (2000): The quality of aquatic ecosystems as an indicator for sustainable water management – country paper of Switzerland. In: Let the fish speak: the quality of aquatic ecosystems as an indicator for sustainable water management (Ed. J.A. van de Kraats). EurAqua technical review No. 4, pp. 205–215.
- 2875 **Bundi U.** (2000): Nachhaltige Wassernutzung in der Schweiz, in Europa und weltweit. Thema Umwelt (Hrsg. PUSCH – Praktischer Umweltschutz Schweiz) H. 1, 22–23.
- 2876 **Holm P.** (2000): Der Fischfangrückgang in den schweizerischen Fließgewässern – Auslöser des Projektes «Fischnetz» und Konsequenzen für die Forschung. In: Festschrift 100 Jahre Sportfischer-Verein (Hrsg. Sportfischer-Verein, Bern), S. 109–113.
- 2877 **Känel B., Bundi U., Peter A.** (2000): Ansätze zur ökomorphologischen Analyse und Verbesserung von Fließgewässer-Systemen. Protokoll der 34. Tagung des Cercl'eau der Vereinigung der kantonalen GewässerschutzlimnologInnen und -chemikerInnen, 23. März in Neuchâtel, 7 S.
- 2878 **Biedermann R., Bundi U., Traber H.** (1999): Wege zu einer nachhaltigen Landwirtschaft im Klettgau. Mitt. Naturforsch. Ges. Schaffhausen 44, 21–30.
- 2879 **Bonting C.F.C., Gerards R., Zehnder A.J.B., Kortstee G.J.J.** (1999): Purification and properties of pyrophosphatase of *Acinetobacter johnsonii* 210A and its involvement in the degradation of polyphosphate. Biodegradation 10, 393–398.
- 2880 **Burkhardt-Holm P., Bloesch J.** (2000): Fish as bioindicators for pollutants in the Danube River: an approach. Proc. 33<sup>rd</sup> Internat. Assoc. Danube Res. Conf. Osijek, September 3–9, Croatia. Grafika, Osijek, pp. 375–382.
- 2881 **Jaggy M., Schenker R., Riet R., Schenker F.** (2000): Voruntersuchung einer Schiessanlage – Vorgehen am Beispiel des belasteten Standorts Grosswiyer, Goldau SZ. Schriftenreihe Umwelt-Materialien Nr. 124 (Altlasten/Gefährdungsabschätzung), BUWAL Bern, 49 S.
- 2882 **Krušpán P.R.** (2000): Natürliche und technische Petrogenese von Puzzolanen: Ein Beitrag zur Herstellung mineralischer Sekundärrohstoffe. Diss. ETHZ No. 13 732, Zürich.
- 2883 **Faist M.** (2000): Ressourceneffizienz in der Aktivität Ernähren: Akteurbezogene Stoffflussanalyse. Diss. ETHZ No. 13 884, Zürich.
- 2884 **Kasemir B., Toth F., Masing V.** (2000): Climate policy, venture capital and european integration. J. Common Market Studies 38 (5), 891–903.
- 2885 **Beer J.** (2000): Neutron monitor record in broader historical context. Space Sci. Rev. 93, 107–119.
- 2886 **Beer J.** (2000): Long-term indirect indices of solar variability. Space Sci. Rev. 94, 53–66.
- 2887 **Sigg L., Xue H., Kistler D., Schönenberger R.** (2000): Size fractionation (dissolved, colloidal and particulate) of trace metals in the Thur river, Switzerland. Aquatic Geochemistry 6, 413–434.
- 2888 **Ahel M., Molnar E., Ibric S., Giger W.** (2000): Estrogenic metabolites of alkylphenol polyethoxylates in secondary sewage effluents and rivers. Water Sci. Technol. 42 (7–8), 15–22.
- 2889 **Strauss M., Larmie S.A., Heinss U., Montanero A.** (2000): Treating faecal sludges in ponds. Water Sci. Technol. 42 (10–11), 283–290.
- 2890 **Arscott D.B., Tockner K., Ward J.V.** (2000): Aquatic habitat diversity along the corridor of an alpine floodplain river (fiume Tagliamento, Italy). Arch. Hydrobiol. 149 (4), 679–704.
- 2891 **Donath U., Robinson C.T.** (2001): Ecological characteristics of lake outlets in Alpine environments of the Swiss Alps. Arch. Hydrobiol. 150 (2), 207–225.
- 2892 **Gruber N., Wehrli B., Wüest A.** (2000): The role of biogeochemical cycling for the formation and preservation of varved sediments in Soppensee (Switzerland). J. Paleolimnology 24, 277–291.
- 2893 **Wüest A., Carmack E.** (2000): A priori estimates of mixing and circulation in the hard-to-reach water body of Lake Vostok. Ocean Modelling 2, 29–43.
- 2894 **Pinkernell U., Nowack B., Gallard H., von Gunten U.** (2000): Methods for the photometric determination of reactive bromine and chlorine species with abts. Water Res. 34 (18), 4343–4350.
- 2895 **Looser P.W., Berg M., Fent K., Mühlemann J., Schwarzenbach R.P.** (2000): Phenyl- and butyltin analysis in small biological samples by cold methanolic digestion and GC/MS. Anal. Chemistry 72 (12), 2483–2488.
- 2896 **Uehlinger U.** (2000): Resistance and resilience of ecosystem metabolism in a flood-prone river system. Freshwater Biol. 45, 319–332.
- 2897 **Landini P., Volkert M.R.** (2000): Regulatory responses of the adaptive response to alkylation damage: a simple regulon with complex regulatory features. J. Bacteriol. 182 (23), 6543–6549.
- 2898 **Volkland H.-P., Harms H., Müller B., Repphun G., Wanner O., Zehnder A.J.B.** (2000): Bacterial phosphating of mild (unalloyed) steel. Appl. Environ. Microbiol. 66 (10), 4389–4395.
- 2899 **Hoehn E., Johnson C.A., Huggenberger P., Amirbahman A., Peter A., Zweifel H.R.** (2000): Investigative strategies and risk assessment of old unlined municipal solid waste landfills. Waste Managem. Res. 18, 577–589.
- 2900 **Kasemir B., Dahinden U., Swartlin A.G., Schüle R., Tabara D., Jaeger C.C.** (2000): Citizens' perspectives on climate change and energy use. Global Environ. Change 10, 169–184.
- 2901 **Zobrist J., Dowdle P.F., Davis J.A., Oremland R.S.** (2000): Mobilization of arsenite by dissimilatory reduction of adsorbed arsenate. Environ. Sci. Technol. 34 (22), 4747–4753.
- 2902 **Looser P.W., Fent K., Berg M., Goudsmit G.-H., Schwarzenbach R.P.** (2000): Uptake and elimination of triorganotin compounds by larval midge *Chironomus riparius* in the absence and presence of aldrich humic acid. Environ. Sci. Technol. 34 (24), 5165–5171.
- 2903 **Ingallinella A.M., Sanguinetti G., Fernandez R.G., Strauss M., Montanero A.** (2000): Cotreatment of sewage and septage in stabilization ponds. International Conference on Waste Stabilisation Ponds, Cali, Colombia, October.
- 2904 **Montanero A., Strauss M.** (2000): Faecal sludge management – strategic aspects and treat-

ment options. International Workshop on Biosolids Management and Utilization at Nanjing and to the Forum on Biosolids Management and Utilization at Hongkong, 14 pp.

2905 **Montangero A., Strauss M.** (2000): When septic tanks are full – challenges in faecal sludge management and treatment. AIDIS Conference, Mendoza, Argentina, 14 pp.

2906 **Strauss M., Heinss U., Montangero A.** (2000): On-site sanitation: when the pits are full – planning for resource protection in faecal sludge management. In: Water, sanitation and health – resolving conflicts between drinking-water demands and pressures from society's wastes (Eds. I. Chorus et al.) Schriftenreihe des Vereins Wasser-, Boden- und Lufthygiene 105, IWA Publishing House and WHO Water Series pp. 353–360.

2907 **Montangero A., Strauss M., Dembélé A.** (2000): Gestion des boues de vidange: Parent pauvre de l'assainissement et défi à relever. 12e conférence des centres du réseau international de formation à la gestion de l'eau et des déchets (RIF/ITN) d'Afrique, Ouagadougou, Burkina Faso, 12 pp.

2908 **Goss K.-U., Schwarzenbach R.P.** (2001): Linear free energy relationships used to evaluate equilibrium partitioning of organic compounds. Environ. Sci. Technol. 35 (1), 1–9.

2909 **Wick L.Y., Colangelo T., Harms H.** (2001) Kinetic of mass transfer-limited bacterial growth and solid PAHs. Environ. Sci. Technol. 35 (2), 354–361.

2910 **Wagner G., Masarik J., Beer J., Baumgartner S., Imboden D., Kubik P.W., Synal H.-A., Suter M.** (2000): Reconstruction of the geomagnetic field between 20 and 60 kyr BP from cosmogenic radionuclides in the GRIP ice core. Nuclear Instruments and Methods in Physics Res. B 172, 597–606.

2911 **Schweigert N., Hunziker R.W., Escher B.I., Eggen R.I.L.** (2001): Acute toxicity of (chloro-) catechols and (chloro-)catechol-copper combinations in *Escherichia coli* corresponds to their membrane toxicity *in vitro*. Environ. Toxicol. Chem. 20 (2), 239–247.

2912 **Eichler A., Schwikowski M., Gäggeler H.W., Furrer V., Synal H.-A., Beer J., Saurer M., Funk M.** (2000): Glaciochemical dating of an ice core from upper Grenzgletscher (4200 m a.s.l.). J. Glaciology 46 (154), 507–516.

2913 **Beer J.** (2000) Solar activity: long-term records. In: Encyclopedia of astronomy and astrophysics (Eds. O. Sol et al.) Nature Publishing Group, Vol. 3, pp. 2475–2479.

2914 **Wüest A.** (2000): Archaisches Leben im verborgenen Extrem? Anspruchsvolle Erkundung eines einzigartigen Ökosystems. Neue Zürcher Zeitung, Nr. 261, 8. November.

2915 **Wedekind C., Müller R., Steffen A., Eggler R.** (2001): A low-cost method of rearing multiple batches of fish. Aquaculture 192, 31–37.

2916 **Yang H., Zehnder A.J.B.** (2001): China's regional water scarcity and implications for grain supply and trade. Environ. Planning A 33, 79–92.

2917 **Malard F., Tockner K., Ward J.V.** (2000): Physico-chemical heterogeneity in a glacial riverscape. Landscape Ecology 15, 679–695.

2918 **Pianta R., Boller M., Urfer D., Chappaz A., Gmünder A.** (2000): Costs of conventional vs. membrane treatment for karstic spring water. Desalination 131, 245–255.

2919 **Bucheli-Witschel M., Egli T.** (2001): Environmental fate and microbial degradation of aminopolycarboxylic acids. FEMS Microbiol. Rev. 25, 69–106.

2920 **Goudsmit G.-H., Lemcke G., Livingstone D.M., Lotter A.F., Müller B., Sturm M.** (2000): Hagelseewli: a fascinating high mountain lake – suitable for palaeoclimate studies? Verh. Internat. Verein. Limnol. 27, 1013–1022.

2921 **Emmenegger L., Schönenberger R., Sigg L., Sulzberger B.** (2001): Light-induced redox cycling of iron in circumneutral lakes. Limnol. Oceanogr. 46 (1), 49–61.

2922 **Muscheler R., Beer J., Wagner G., Finkel R.C.** (2000): Changes in deep-water formation during the younger dryas event inferred from <sup>10</sup>Be and <sup>14</sup>C records. Nature 408, 567–570.

2923 **Bernet D., Schmidt H., Wahli T., Burkhardt-Holm P.** (2001): Effluent from a sewage treatment works causes changes in serum chemistry of brown trout (*Salmo trutta* L.). Ecotoxicol. Environ. Safety 48 B, 140–147.

2924 **Durner R., Zinn M., Withold B., Egli T.** (2001): Accumulation of poly(R)-2-hydroxyalkanoates in *Pseudomonas oleovorans* during growth in batch and chemostat culture with different carbon sources. Biotechnol. Bioeng. 72 (3), 278–288.

2925 **Xue H.B., Jansen S., Prasch A., Sigg L.** (2001): Nickel speciation and complexation kinetics in freshwater by ligand exchange and DPCSV. Environ. Sci. Technol. 35 (3), 539–546.

2926 **Zehnder A.J.B.** (2001): 21<sup>st</sup> century, a challenge for microbes, engineers, and environmental scientists. The Internat. Symposium of the COE, University of Tokyo, February 5–7.

2927 **Kipfer R., Peeters F.** (2000): Some speculations on the possibility of changes in deep-water renewal in Lake Baikal and their consequences. In: Lake Baikal, (Ed. K. Minoura) Elsevier, Amsterdam, pp. 273–280.

2928 **Muscheler R.** (2001): Letzte Kaltphase mit reduzierter Ozeanströmung. Neue Zürcher Zeitung, Nr. 1, 3. Januar.

2929 **Burkhardt-Holm P., Studer C.** (2000): Hormonaktive Stoffe im Abwasser – Sind Fische und andere wasserlebende Tiere betroffen? Gas, Wasser, Abwasser 80, 504–509.

2930 **Gächter R.** (2000): Zehn Jahre Seenbelüftung. Ein Erfahrungsbericht. Gewässerökologie Norddeutschlands 4, 158–165.

2931 **Pimenov N.V., Rusanov I.I., Yusupov S.K., Fridrich J., Lein A.Y., Wehrli B., Ivanov M.V.** (2000): Microbial processes at the aerobic-anaerobic interface in the deep-water zone of the Black Sea. Microbiology 69 (4), 436–448.

2932 **Ivanov M.V., Lein A.Y., Miller Y.M., Yusupov S.K., Pimenov N.V., Wehrli B., Rusanov I.I., Zehnder A.J.B.** (2000): The effect of microorganisms and seasonal factors on the isotopic composition of particulate organic carbon from the Black Sea. Microbiology 69 (4), 449–459.

2933 **Balmer H., Hoehn E., Boller M.** (2001): Zuströmbereiche für Grundwassererfassungen – Konzeptionelle Überlegungen zu Zweck und Abgrenzung. Gas, Wasser, Abwasser 81, 21–28.

2934 **Brancelj A., Sisko M., Lami A., Appleby P., Livingstone D.M., Rejec-Brancelj I., Ogrin D.** (2000): Changes in the trophic level of an Alpine lake, Jezero v. Ledvici (NW Slovenia), induced by earthquakes and climate change. J. Limnol. 59 (Suppl. 1), 29–42.

2935 **Lotter A.F., Hofmann W., Kamenik C., Lami A., Ohlendorf C., Sturm M., van der Knapp W.O., van Leeuwen J.F.N.** (2000): Sedimentological and biostratigraphical analyses of short sediment cores from Hagelseewli (2339 m a.s.l.) in the Swiss Alps. J. Limnol. 59 (Suppl. 1), 53–64.

2936 **Ohlendorf C., Bigler C., Goudsmit G.-H., Lemcke G., Livingstone D.M., Lotter A.F., Müller B., Sturm M.** (2000): Causes and effects of long periods of ice cover on a remote high Alpine lake. J. Limnol. 59 (Suppl. 1), 65–80.

2937 **Ventura M., Camerero L., Buchaca T., Bartumeus F., Livingstone D.M., Catalan J.** (2000): The main features of seasonal variability in the external forcing and dynamics of a deep mountain lake (Redó, Pyrenees). J. Limnol. 59 (Suppl. 1), 97–108.

2938 **Burgherr P.** (2000): Spatio-temporal community patterns of lotic zoobenthos across habitat gradients in an Alpine glacial stream ecosystem. Diss. ETHZ Nr. 13 829, Zürich.

2939 **Weirich D.** (2000): Influence of organic ligands on the adsorption of copper, cadmium, and nickel on goethite. Diss. ETHZ Nr. 13 917, Zürich.

2940 **Zah R.** (2000): Patterns, pathways, and trophic transfer of organic matter in a glacial stream ecosystem in the Alps. Diss. ETHZ Nr. 13 998, Zürich.

2941 **Burgherr P.** (2000): Struktur der Wirbellosenfauna an der Flusssohle eines voralpinen Fließgewässers (Necker SG). Ber. St.Gall. Naturwiss. Ges. 89, 137–154.

2942 **Enz C.A., Schäffer E., Müller R.** (2000): Growth and survival of Lake Hallwil whitefish (*Coregonus* sp.) larvae reared on dry and live food. Arch. Hydrobiol. 148 (4), 499–516.

2943 **Livingstone D.M., Hajdas I.** (2001): Climatically relevant periodicities in the thicknesses of biogenic carbonate varves in Soppensee, Switzerland (9740–6870 Calendar yr BP). J. Paleolimnol. 25, 17–24.

2944 **Mattle N., Kinzelbach W., Beyerle U., Huggenberger P., Hoosli H.H.** (2001): Exploring an aquifer system by integrating hydraulic, hydrogeologic and environmental tracer data in a three-dimensional hydrodynamic transport model. J. Hydrol. 242, 183–196.

2945 **Johnson C.A., Schaap M.G., Abbaspour K.C.** (2001): Model comparison of flow through a municipal solid waste incinerator ash landfill. J. Hydrol. 243, 55–72.

2946 **Tockner K., Malard F., Ward J.V.** (2000): An extension of the flood pulse concept. Hydrol. Process. 14, 2861–2883.

2947 **Gurnell A.M., Petts G.E., Hannah D.M., Smith B.P.G., Edwards P.J., Kollmann J., Ward J.V., Tockner K.** (2001): Riparian vegetation and

- island formation along the gravel-bed Fiume Tagliamento, Italy. *Earth Surf. Process. Landforms* 26, 31–62.
- 2948 **Genoni G.P., Behra R., Montague C.L., Güttinger H., Ternay-Aegerter R.** (2001): Complex dynamics of adaptation in a nonaxenic *Microcystis* culture – 1. Effects of dinitrophenol on population growth. *Ecotoxicol. Environ. Safety* 48, 235–240.
- 2949 **Montague C.L., Behra R., Bosma T.N.P., Genoni G.P., Güttinger H.** (2001): Complex dynamics of adaptation in a nonaxenic *Microcystis* culture – 2. Computer simulation of dinitrophenol effects. *Ecotoxicol. Environ. Safety* 48, 241–254.
- 2950 **Wagner G., Livingstone D.M., Masarik J., Muscheler R., Beer J.** (2001): Some results relevant to the discussion of a possible link between cosmic rays and the earth's climate. *J. Geophys. Res.* 106 (D4), 3381–3387.
- 2951 **Beer J.** (2000): Polar ice as an archive for solar cycles and the terrestrial climate. Proc. 1<sup>st</sup> Solar and Space Weather Euroconference, Santa Cruz de Tenerife, Tenerife, Spain.
- 2952 **Beardall J., Berman T., Heraud P., Kadiri M.O., Light B.R., Patterson G., Roberts S., Sulzberger B., Sahan E., Uehlinger U., Wood B.** (2001): A comparison of methods for detection of phosphate limitation in microalgae. *Aquatic Sci.* 63, 107–121.
- 2953 **Kominkova D., Kuehn K.A., Büsing N., Steiner D., Gessner M.O.** (2000): Microbial biomass, growth, and respiration associated with submerged litter of *Phragmites australis* decomposing in a littoral reed stand of a large lake. *Aquatic Microb. Ecol.* 22, 271–282.
- 2954 **Eggen R.I.L.** (2001): Moderne biologische Analyse. *Gas, Wasser, Abwasser* 81 (3), 167–171.
- 2955 **Soldo D.** (2000): Tolerance analyses in algal communities and populations exposed to pollutants. Diss. ETHZ No. 13 768, Zürich.
- 2956 **Gerecke A.C.** (2001): Phenylurea herbicides in the aquatic environment – sources and elimination processes. Diss. ETHZ No. 14 111, Zürich.
- 2957 **Lendenmann U., Senn H., Snozzi M., Egli T.** (2000): Dynamics of mixed substrate growth of *Escherichia coli* in batch culture: the transition between simultaneous and sequential utilisation of carbon substrates. *Acta Universitatis Carolinae Environmentalica* 14, 21–30.
- 2958 **Klein B., Tockner K.** (2000): Biodiversity in springbrooks of a glacial flood plain (Val Roseg, Switzerland). *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 27, 704–710.
- 2959 **Robinson C.T., Gessner M.O.** (2000): Leaf breakdown in an Alpine spring brook. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 27, 744–747.
- 2960 **Frutiger A., Niederhauser D.** (2000): Effects of water abstraction on new-winged midges (Diptera: Blephariceridae). *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 27, 942–946.
- 2961 **Reichert P., Borchardt D., Henze M., Rauch W., Shanahan P., Somlyódy L., Vanrolleghem P.** (2001): River water quality model no. 1 (RWQM1): II. Biochemical process equations. *Water Sci. Technol.* 43 (5), 11–30.
- 2962 **Jacquinot P., Müller B., Wehrli B., Hauser P.C.** (2001): Determination of methane and other small hydrocarbons with a platinum-nafion electrode by stripping voltammetry. *Analytica Chimica Acta* 432, 1–10.
- 2963 **Oellers S., Singer H. P., Fässler P., Müller S.R.** (2001): Simultaneous quantification of neutral and acidic pharmaceuticals and pesticides at the low-ng/l level in surface and waste water. *J. Chromatogr. A* 911, 225–234.
- 2964 **Weyhenmeyer G.A., Bloesch J.** (2001): The pattern of particle flux variability in Swedish and Swiss lakes. *Sci. Total Environ.* 266, 69–78.
- 2965 **Schweigert N., Zehnder A.J.B., Eggen R.I.L.** (2001): Chemical properties of catechols and their molecular modes of toxic action in cells, from microorganisms to mammals. *Environ. Microbiol.* 3 (2), 81–91.
- 2966 **Egli K., Fanger U., Alvarez P.J.J., Siegrist H.-R., van der Meer J.R., Zehnder A.J.B.** (2001): Enrichment and characterization of an anammox bacterium from a rotating biological contactor treating ammonium-rich leachate. *Arch. Microbiol.* 175, 198–207.
- 2967 **Andren A.W., Mackay D., DePinto J.V., Fox K., Thibodeaux L.J., McLachlan M., Haderlein S.** (2000): Inter-media partitioning and transport. In: Evaluation of persistence and long-range transport of organic chemicals in the environment (Eds. G. Klecka et al.) *Soc. Environ. Toxicol. Chem. (SETAC)*, pp. 131–168.
- 2968 **Royer T.V., Robinson C.T., Minshall G.W.** (2001): Development of macroinvertebrate-based index for bioassessment of Idaho Rivers. *Environ. Managem.* 27 (4), 627–636.
- 2969 **Larsen T.A., Boller M.A.** (2001): Perspectives of nutrient recovery in DESAR concepts. In: Decentralised sanitation and reuse: concepts, systems and implementation (Eds. P. Lens et al.). IWA Publishing, London, pp. 387–410.
- 2970 **Bosma T.N.P., Harms H., Zehnder A.J.B.** (2001): Biodegradation of xenobiotics in environment and technosphere. In: The handbook of environmental chemistry, Vol. 2, Part K, Biodegradation and persistence, (Ed. B. Beek) Springer-Verlag, Berlin.
- 2971 **Canonica S., Freiburghaus M.** (2001): Electron-rich phenols for probing the photochemical reactivity of freshwaters. *Environ. Sci. Technol.* 35 (4), 690–695.
- 2972 **Larsen T., Alder A., Eggen R., Maurer M., Muncke J., Peters I.** (2001): Testlauf im Kraftwerk1. *Magazin UniZürich* 1/01 – *Bull. ETHZ* Nr. 281, 47–49.
- 2973 **Alder A.C., Giger W., Reiser R., Schaffner C., Ahel M., Albrecht A.** (2001): Detergentien-chemikalien in Seesedimenten. In: *Moderne Wasch- und Reinigungsmittel – Umweltwirkungen und Entwicklungstendenzen. Münchner Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flussbiologie, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München, Band 54, 289–301.*
- 2974 **Larsen T.A., Udert K.M.** (1999): Urinseparierung – ein Konzept zur Schliessung der Nährstoffkreisläufe. *Wasser & Boden* 51 (11), 6–9.
- 2975 **Tillman D.** (2000): Entscheidungsabläufe in der Wasserversorgung. 4. Lippuner Seminar in Vaduz FL: Fachtagung Wasser 2000 «Wasserverteilung». Verlag Lippuner, Bad Ragaz, S. 21–24.
- 2976 **Boller M.** (2000): Nutzen der Netzwerkanalyse für die Qualitätssicherung in der Wasserversorgung. 4. Lippuner Seminar in Vaduz FL: Fachtagung Wasser 2000 «Wasserverteilung». Verlag Lippuner, Bad Ragaz, S. 25–31.
- 2977 **Schmidt T.C., Duong H.-A., Berg M., Haderlein S.B.** (2001): Analysis of fuel oxygenates in the environment. *Analyst* 126, 405–413.
- 2978 **Larsen T.A.** (1999): Nährstoffkreisläufe in der Siedlungswasserwirtschaft. *Schweiz. Ingenieur & Architekt* 19, 394–392.
- 2979 **Zehnder A.J.B.** (2001): Sind wir zur Nachhaltigkeit bereit? *Gaia* 10 (1), 25–26.
- 2980 **Jung D.K.J., Klaus T., Fent K.** (2001): Cytochrome P450 induction by nitrated polycyclic aromatic hydrocarbons, azaarenes, and binary mixtures in fish hepatoma cell line PLHC-1. *Environ. Toxicol. Chem.* 20 (1), 149–159.
- 2981 **Boller M.** (2001): Belastung des Regenwassers mit Schadstoffen und neue technische Reinigungsverfahren mit Adsorbentien. VSA-Hauptmitgliederversammlung 30. März, Entsorgung des Regenwassers, 1–15.
- 2982 **Steingruber S.M.** (2001): Nutrient transformations in a wetland pond. Diss. ETHZ No. 13 939, Zürich
- 2983 **Rinke K., Robinson C.T., Uehlinger U.** (2001): A note on abiotic factors that constrain periphyton growth in Alpine glacier streams. *Internat. Rev. Hydrobiol.* 86 (3), 361–366.
- 2984 **Stemmler K., Glod G., von Gunten U.** (2001): Oxidation of metal-diethylenetriamine-pentaacetate (DTPA)-complexes during drinking water ozonation. *Water Res.* 35 (8), 1877–1886.
- 2985 **von Gunten U., Driedger A., Gallard H., Salhi E.** (2001): By-products formation during drinking water disinfection: a tool to assess disinfection efficiency? *Water Res.* 35 (8), 2095–2099.
- 2986 **Schmidt-Posthaus H., Bernet D., Wahli T., Burkhardt-Holm P.** (2001): Morphological organ alterations and infectious diseases in brown trout *Salmo trutta* and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* exposed to polluted river water. *Diseases Aquat. Org.* 44, 161–170.
- 2987 **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. *Environ. Sci. Technol.* 35 (9), 1840–1844.

## Livres

- Jaggy M., Schenker R., Tietz R., Schenker F.** (2000): Voruntersuchung einer Schiessanlage – Vorgehen am Beispiel des belasteten Standorts Grosswiyer, Goldau SZ. *Schriftenreihe Umwelt-Materialien* Nr. 124 (Altlasten/ Gefährdungsabschätzung), BUWAL Bern, 49 Seiten. [2881]
- Larsen T.A., Gujer W.** (2000): Waste design and source control lead to flexibility in wastewater management. Preprint 1<sup>st</sup> IWA World Water Congress, Paris, Book 5, pp. 93–300.
- Sigg L., Behra P., Stumm W.** (2000): *Chimie des milieux aquatiques*, Dunod, Paris, 3ème éd., 567 p.

## L'EAWAG à la foire de Hanovre 2001

Du 23 au 28 avril 2001, l'EAWAG était présent à la foire de Hanovre au stand commun du domaine de l'EPF et de l'initiative «Technologie-Standort Schweiz». Le but était de présenter l'EAWAG à un large public international et de contribuer au transfert de connaissances et de technologies.

Dans un cadre très agréable, l'EAWAG a pu présenter ses activités dans les domaines de la recherche, de l'enseignement et du conseil. Point de mire du stand de l'EAWAG, le projet «Le cuivre dans l'environnement – de nouveaux filtres contre la diffusion» de Michele Steiner a éveillé l'intérêt des visiteurs. Le cuivre présente d'excellentes propriétés de construction et se trouve largement utilisé pour la couverture des toits et

des façades ainsi que pour les conduites d'eau. A travers l'eau de pluie, il atteint le sol et les eaux de surface et souterraines où il présente un effet toxique sur divers organismes. Pour empêcher la diffusion du cuivre dans l'environnement, l'EAWAG conseille l'utilisation d'un nouveau filtre silico-calcaire à l'hydroxyde de fer qui immobilise ce métal.

La présence de l'EAWAG à la foire de Hanovre a permis de faire connaître le problème du cuivre et le système de filtration à un large public. La foire a d'autre part été l'occasion de nouer des contacts intéressants et de discuter de l'utilisation du nouveau filtre dans d'autres domaines.



## Aquatic Sciences a un nouveau visage

La revue *Aquatic sciences* repose sur une longue tradition. Elle fut créée en 1920 par la Commission d'hydrobiologie de la «Société helvétique des Sciences naturelles» sous le nom de *Zeitschrift für Hydrologie*. Depuis, la plupart des rédacteurs ont fait partie de l'EAWAG.

En 2002, *Aquatic Sciences* paraîtra avec une nouvelle orientation, un nouveau format et une nouvelle équipe rédactionnelle. Cette réorientation a été motivée par le souhait d'une meilleure résonance internationale du journal. Comme le sous-titre – *Research Across Boundaries* – l'indique, la revue publiera davantage d'articles faisant état de travaux de recherche qui dépassent le cadre des frontières et portent sur les écosystèmes aquatiques et environnants et sur les effets de l'homme sur ces systèmes. Une importance particulière sera accordée aux résultats de recherche sur la gestion durable des eaux naturelles.



*Aquatic Sciences – Research Across Boundaries* publie des articles originaux ainsi que des revues. Des numéros spéciaux seront de plus consacrés à des thèmes actuels

particuliers. Vous êtes cordialement invités à soumettre vos articles et vos suggestions de numéros spéciaux à *Aquatic Sciences*. Pour plus d'information:

[http://www.eawag.ch/publications/aquatic\\_sciences/](http://www.eawag.ch/publications/aquatic_sciences/)

## Atelier CEAC: Détection des composés polluants

L'atelier d'été proposé cette année par le Centre d'excellence en chimie analytique de l'EPF de Zurich (CEAC = Center of Excellence in Analytical Chemistry) s'est tenu les 12 et 13 juillet à l'AKADEMIE de l'EAWAG et de l'EMPA. Cet atelier était consacré cette année aux «Méthodes analytiques de séparation et de détection dans le nouveau millénaire». Des spécialistes des domaines de l'environnement, du contrôle des aliments et du contrôle anti-dopage ont donné un bon aperçu des développements récents et des domaines d'application actuels des méthodes chimiques et biologiques. Les spécialistes ont insisté sur l'attrait de pro-

cedés couplés qui combinent des techniques de séparation et des techniques de détection (comme p. ex. la CG/SM). Les méthodes présentées permettent de détecter des substances à problèmes dont on parle beaucoup actuellement, qu'il s'agisse de polluants organiques persistants, d'agents dopants comme l'hormone peptidique érythropoïétine (EPO), d'organismes génétiquement modifiés ou des prions à l'origine de l'ESB.

L'atelier a été organisé par Walter Giger et Hans-Peter Kohler de l'EAWAG et par Peter Schmid de l'EMPA.

Pour en savoir plus: [www.ceac.ethz.ch](http://www.ceac.ethz.ch)

## PKD – Was ist das?

«Proliferative kidney disease» – la Maladie rénale proliférative (MRP) donne du fil à retordre à nos poissons et pourrait bien être impliquée dans les phénomènes de baisse des taux de capture et de déclin de la santé des poissons dans les eaux suisses bien souvent observés ces derniers temps. Dans le cadre du projet «Fischnetz» les diverses relations de cause à effet sont examinées de près.

Au mois de juillet, «Fischnetz» a invité des spécialistes mondiaux de la MRP à participer à un colloque à l'EAWAG à Kastanienbaum. Au cours de deux journées de travail, des exposés et débats ont permis de faire le point des connaissances actuelles et d'identifier d'éventuelles lacunes. On sait aujourd'hui que l'hôte intermédiaire du pa-

rasite responsable de la maladie, un bryozoaire, affectionne les eaux chaudes, sales et à écoulement lent. Cette constatation a permis, en complément d'informations sur les conditions régnant en Suisse, d'émettre des propositions de mesures à prendre. Celles-ci seront prochainement communiquées aux services compétents pour tenter de limiter le développement de la MRP.



## «Festival science et cité»

Le grand hall de la gare de Zurich a été du 4 au 12 mai 2001 le théâtre du «Festival science et cité» des Hautes Ecoles de Zurich. Il s'agissait de l'une des dix manifestations organisées dans toute la Suisse par la fondation «Science et Cité» dans le but de favoriser le dialogue entre la recherche et le public.

L'EAWAG était représenté à travers ses projets «Désinfection solaire de l'eau» (SODIS) et «Toilettes NoMix». Tant les WC d'un nouveau genre qui recueillent l'urine séparément, que la technologie SODIS d'une incroyable simplicité, ont attiré de nombreux

visiteurs. Ceux-ci n'ont pas laissé passer l'occasion d'entrer directement en contact avec les chercheurs et d'en apprendre davantage sur les activités de l'EAWAG. Le projet pilote «Table ronde» présenté à l'occasion du festival a également suscité un grand intérêt. Il s'agit là d'un forum de discussion entre chercheurs de l'EAWAG et citoyens.

Avec ses quelque 100 000 visiteurs qui ont chacun consacré environ 30 minutes au festival, le premier «Festival science et cité» zurichois a été un franc succès qui a suscité un grand intérêt médiatique national.



[www.eawag.ch/events/science\\_et\\_cite/](http://www.eawag.ch/events/science_et_cite/)

## La Suisse et l'EAWAG définissent des standards internationaux pour la certification de produits Eco-électricité

Le 27 juin 2001, près de 40 chercheurs sont venus d'Europe, des USA, du Canada et du Japon pour discuter de l'avenir d'un mode d'exploitation de l'énergie hydraulique respectueux de l'environnement. Le thème principal de la «Second International Conference on Hydropower as Green Electricity» était l'établissement de procédés crédibles et comparables entre eux au niveau international pour la certification de produits Eco-électricité. Les délégués ont unanimement conclu que les procédés de certification assez sommaires qui sont utilisés actuellement dans divers pays européens n'avaient pas d'avenir à long terme. Etant donné que

ces méthodes s'appuient sur une simple limite d'âge ou de rendement des installations, elles ignorent notamment les atteintes portées aux écosystèmes aquatiques au niveau local et régional.

Par contre, l'écolabel suisse *naturemade star* a été unanimement salué en tant que solution exemplaire ralliant crédibilité scientifique et applicabilité pratique. La certification des usines hydroélectriques pour l'obtention du label *naturemade star* s'effectue selon le procédé *greenhydro* mis au point par l'EAWAG. Le procédé de certification a déjà été appliqué avec succès dans le cas de plusieurs usines hydroélectriques suisses, comme l'a montré un représentant de l'EWZ (Compagnie d'électricité de la ville de Zurich). D'après le représentant de la «World Commission on Dams», l'approche suisse peut donc faire office de «directive

**greenhydro** ●●

Standard for environmentally compatible hydropower, EAWAG Switzerland

internationale pour la certification Eco-électricité d'usines hydroélectriques». Tous les spécialistes étaient unanimement d'avis qu'il fallait profiter des groupes d'intérêts réunis lors de la conférence pour parvenir notamment le plus rapidement possible à la définition d'un concept pour l'établissement d'un label de niveau international pour la certification de l'énergie hydroélectrique «verte».

Pour plus d'information: Bratrich C., Truffer B. (2001): Ökostrom-Zertifizierung für Wasserkraftanlagen. EAWAG Ökostrom Publikationen 6, p. 113.

[www.hydropower.ch](http://www.hydropower.ch), [www.naturemade.org](http://www.naturemade.org)



## Deuxième «Réunion des péniches» à Gersau

Le Lac des Quatre-Cantons a été les 7 et 8 juillet 2001 le théâtre de la deuxième «Réunion des péniches». De nombreux bateaux de marchandises s'étaient donné rendez-vous à Gersau. André Steffen et Daniel Steiner du Centre de Recherches Limnolo-

giques à Kastanienbaum y ont présenté l'EAWAG sur la péniche «Unterwalden» à travers le thème de «La vie dans l'eau». Les deux techniciens ont guidé les visiteurs avec un grand engagement au sein de l'exposition et se sont appliqués à répondre aux nombreuses questions fusant du public. L'organisation et les activités de recherche de l'EAWAG étaient présentées à travers un film et divers posters. Dans une présentation en Powerpoint, les visiteurs et visiteuses ont pu plonger dans l'univers du phytoplancton et du zooplancton. Mais c'est la salle de microscopie qui a eu le plus de succès. Dans cet espace, les grands et

les petits ont pu observer le plancton à la loupe binoculaire dans des échantillons d'eau fraîchement prélevés dans le lac. Il était extrêmement difficile d'y obtenir une place. Plus de 3000 visiteurs se sont rendus à cette deuxième édition du «Réunion des péniches».



### Nouvelle rédactrice



**Martina Bauchrowitz** est responsable de la rédaction de l'EAWAG news depuis mars 2001. Vous pouvez lui adresser directement vos questions ou suggestions.

E-Mail: [martina.bauchrowitz@eawag.ch](mailto:martina.bauchrowitz@eawag.ch)