

news



**Nouvelles méthodes
et potentialités d'analyse
environnementale**

Sommaire

Dossier



4 Pour un meilleur accès aux données

Les données sur l'environnement sont trop peu disponibles, estime Janet Hering. La directrice de l'Eawag plaide pour une meilleure accessibilité.



6 Micropolluants: la fin de l'incognito ?

Les analyses classiques devaient se limiter à un nombre restreint de polluants connus. Aujourd'hui, même les substances inconnues sont détectables.



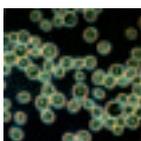
12 La pollution racontée par les isotopes

L'analyse des rapports isotopiques de composés spécifiques permet de déterminer l'origine et le devenir des polluants dans l'environnement.



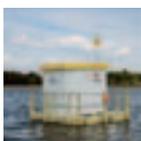
18 L'attrait du prélèvement passif

L'échantillonnage passif donne une meilleure image de la dynamique spatio-temporelle de la pollution fluviale que les prélèvements ponctuels.



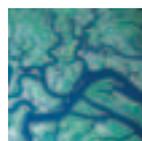
23 L'argent, perturbateur intracellulaire

Les méthodes omiques permettent d'étudier les effets des toxiques sur les êtres vivants à l'échelle moléculaire.



28 Les lacs sous surveillance automatique

Une plate-forme flottante de mesures enregistre les variations journalières et saisonnières des communautés algales lacustres avec la profondeur.



Forum

32 Biodiversité : une question de contacts

Les patrons de biodiversité observés dans les systèmes fluviaux naturels peuvent être obtenus en laboratoire avec des réseaux ramifiés reconstitués.



36 L'eutrophisation en Chine

Suite à une forte croissance économique et démographique, le bassin du fleuve Haihe connaît un grave problème d'eutrophisation.



41 Pas sans l'être humain !

Les problèmes écologiques ont avant tout une origine sociétale. Les approches incluant les sciences sociales livrent les meilleures solutions.

Notes

46 Entrée dans le manuel des denrées alimentaires

46 Dübendorf inaugure l'ozonation dans l'épuration

47 Prix de la fondation Gates

Mentions légales

Eawag, Case postale 611, 8600 Dübendorf, Suisse, Tél. +41 (0)58 765 55 11, Fax +41 (0)58 765 50 28, www.eawag.ch

Rédaction: Andres Jordi / Collaboration: Andri Bryner / Traductions: Jeff Acheson (e), Laurence Frauenlob (f) / Graphisme: Peter Penicka, Peter Nadler

Paraît deux fois par an en allemand, en anglais et en français. Reproduction possible sous réserve de l'accord de la rédaction.

Abonnements et changements d'adresse: eawag.news@eawag.ch

ISSN 1420-3928

Photo de couverture: Le chimiste Heinz Singer préparant des échantillons pour une analyse en chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse haute résolution. (Photo: Aldo Todaro)



Rik Eggen, biologiste moléculaire, est directeur adjoint de l'Eawag et enseigne à l'EPF de Zurich.

La course à la rapidité, à la sensibilité et à la spécificité

Ces dernières années, les techniques d'analyse ont connu un développement phénoménal dans le domaine de l'environnement. Les progrès réalisés dans le décryptage du patrimoine génétique et les avancées dans le domaine des technologies de l'information et de la chimie analytique offrent aujourd'hui des possibilités insoupçonnées aux laboratoires de recherche et de contrôle environnemental. Que ce soit en analyse chimique ou biologique, la tendance est à la recherche de méthodes toujours plus rapides, toujours plus efficaces et toujours plus sensibles et les procédés sont volontiers combinés pour répondre aux questionnements les plus divers. Le bagage instrumental et méthodologique dont nous disposons aujourd'hui nous permet enfin d'étudier et de comprendre les systèmes complexes dans leur globalité.

En chimie de l'environnement, les techniques actuelles permettent par exemple de doser les substances isolément ou en mélange dans les différents compartiments et ce, à des concentrations infinitésimales. De nouvelles méthodes permettent même de détecter des substances inconnues et de découvrir leur identité potentielle. De ce point de vue, la spectrométrie de masse haute résolution a révolutionné la chimie environnementale en la faisant passer de l'ère du dosage individuel d'un petit nombre de composés à celle du dosage simultané et ultrasensible d'une multitude de polluants. Il est aujourd'hui possible d'évaluer à la fois le nombre de substances présentes dans un milieu, leurs concentrations, leurs voies de rejet et leur comportement. De nouveaux concepts de surveillance environnementale peuvent alors être imaginés pour relever les défis actuels en matière de qualité des eaux.

Pour évaluer les effets des polluants chimiques sur les organismes biologiques, la méthode traditionnelle consiste à mesurer un certain nombre de paramètres comme le taux de mortalité. Les techniques de biologie moléculaire modernes permettent aujourd'hui d'examiner, en complément, la totalité des réactions de l'organisme au niveau métabolique, biochimique et génétique. Elles permettent donc une approche globale – au sens systémique du terme – qui englobe tous les niveaux d'organisation biologique. Grâce aux progrès réalisés ces dernières années dans le domaine bioanalytique et bioinformatique, les chercheurs disposent aujourd'hui d'instruments performants pour effectuer une évaluation différenciée des risques écotoxicologiques. De plus en plus souvent, des tests standardisés sur cultures cellulaires peuvent être alors utilisés pour évi-

ter le recours à l'expérimentation animale. Ces nouveaux tests sont intégrés aussitôt que possible aux systèmes d'évaluation utilisés dans la pratique environnementale.

L'Eawag a défini trois axes de recherche pour les années à venir : « l'eau et le fonctionnement des écosystèmes », « l'eau, le bien-être et la santé humaine » et « la gestion des conflits d'intérêt liés à l'eau ». Alors que le premier axe vise une meilleure compréhension des écosystèmes aquatiques et de leurs exigences, le second se concentre sur les conditions à respecter pour pouvoir utiliser les ressources aquatiques et bénéficier à long terme de leurs bienfaits. Les nouveaux outils d'analyse environnementale sont des alliés précieux dans ces thématiques de recherche et il en va de même pour la résolution de problèmes concrets dans la pratique.

Pour vous en convaincre, ce nouveau numéro d'Eawag News vous présente un certain nombre d'exemples. Si l'une des méthodes exposées vous intéresse particulièrement, si vous souhaitez en apprendre plus à son sujet ou encore l'utiliser dans votre domaine d'activité, n'hésitez pas à prendre contact avec le ou la scientifique responsable.

Un meilleur accès aux données environnementales

Les informations sur l'environnement sont une base de travail essentielle pour les scientifiques. Avec le développement des nouvelles technologies de l'information, les données collectées n'ont jamais été aussi abondantes. Mais beaucoup d'entre elles sont difficilement accessibles aux chercheurs et aux acteurs de terrain, observe Janet Hering. Forte de ce constat, la directrice de l'Eawag plaide pour un accès plus libre aux données environnementales.

Jamais nous n'avons disposé d'autant de données sur notre planète. Grâce aux satellites, la surface est observée en continu et d'innombrables programmes de surveillance enregistrent en permanence à peu près tout ce qu'il est possible de mesurer sur Terre: qualité des eaux, biodiversité, etc. L'ère de l'information dans laquelle nous nous trouvons actuellement doit être un véritable paradis pour les scientifiques, non ?

Oui, bien sûr. La recherche a énormément profité des avancées technologiques en matière d'information. Des possibilités jusque là insoupçonnées lui sont aujourd'hui offertes. Les données d'observation de l'environnement constituent une ressource inestimable pour la science et la société. Elles seules permettent de réellement comprendre le fonctionnement des écosystèmes et leurs réactions face aux changements. Les données collectées sur de longues périodes de temps, notamment, sont indispensables pour détecter les tendances évolutives à long terme et pour estimer quels peuvent être les impacts des activités humaines sur l'environnement.

Ces longues séries sont d'autre part indispensables au suivi des actions de restauration.

Sur quelles données la recherche s'appuie-t-elle dans le domaine aquatique ?

Les données fondamentales sont celles relatives aux précipitations, au débit des rivières, au niveau des lacs et des nappes phréatiques, à la qualité de l'eau et à la biodiversité aquatique. Mais d'autres types de données peuvent intervenir et motiver, parce qu'elles existent, certaines problématiques de recherche. Par exemple, les enregistrements de température effectués depuis des décennies dans les eaux suisses permettent aujourd'hui d'étudier les effets du changement climatique sur la thermique des lacs et cours d'eau.

Est-ce que certaines données font encore défaut ?

Le problème n'est pas tant le manque de données que l'incertitude par rapport à l'avenir des relevés. En effet, les programmes de surveillance à long terme sont indispensables à la recherche environnementale dans beaucoup de domaines. Il me semble d'autre part tout aussi important de maintenir les informations à jour après la fin de ces programmes de surveillance. Enfin, il serait pertinent d'intégrer de nouveaux types de données, comme les analyses génétiques, dans les paramètres suivis. Mais il ne suffit pas de collecter les informations sur l'environnement, il faut aussi les rendre accessibles à ceux qui en ont besoin.

Et ce n'est pas le cas en Suisse ?

Pas toujours, malheureusement. Pour vous donner un exemple, l'Office fédéral de l'environnement (Ofev) consolide les données des programmes d'observation environnementale des cantons mais

Tout n'est pas à faire, des solutions techniques existent déjà

n'en met qu'une petite partie en accès libre. La collecte des données est de la responsabilité des cantons qui, d'après la loi sur la protection des eaux, ne sont tenus de les

communiquer qu'aux autorités fédérales. Rien n'est prévu pour une diffusion plus large. L'accès aux données sur l'environnement est d'autre part rendu difficile par les questions de propriété intellectuelle. De nombreuses structures de recherche suisses enregistrent de longues séries de données sans toujours les communiquer à l'Ofev. Si toutes les données existantes étaient accessibles, ce serait déjà un grand progrès.



Peter Pernicka

L'Eawag collecte-t-il également des données ?

Oui, avec l'Ofev et l'Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), nous gérons le réseau de mesures hydrologiques du programme de « surveillance nationale continue des cours d'eau suisses » (NADUF). D'autre part, nous travaillons actuellement à la numérisation des données collectées depuis des décennies sur le phytoplancton de cinq lacs suisses que nous convertissons en formats standardisés. Mais contrairement au WSL, par exemple, l'Eawag est encore assez peu impliqué dans la collecte des données environnementales.

Comment pourrait-on rendre les données plus accessibles ?

La loi fédérale sur le principe de la transparence dans l'administration a déjà préparé le terrain en imposant le droit d'accès aux documents officiels. Il faut maintenant que tous les détenteurs des données prennent conscience du fait que les avantages d'une large diffusion l'emportent sur leurs intérêts privés et que celle-ci permettrait de tirer un profit maximum des investissements humains et financiers consentis. Une fois cette étape franchie, les principaux d'entre eux doivent se concerter pour mettre au point un système commun de gestion des données. Le coût d'une telle entreprise resterait modéré du fait de l'approche partenariale et de l'utilisation commune des ressources. Par ailleurs, des solutions techniques existent déjà, il ne serait pas nécessaire de partir de zéro.

Une telle plate-forme de données devrait impliquer toutes les personnes et institutions actives dans le domaine de l'environnement :

les offices fédéraux, les services cantonaux chargés de la collecte des informations, les bureaux d'étude impliqués dans les programmes de surveillance et, bien entendu, les instituts de recherche dont l'expérience de la saisie et de la gestion des données profiterait à tous. Il serait par ailleurs souhaitable qu'un système de libre échange de données se mette en place en Suisse au sein du domaine des sciences de l'environnement.

Y a-t-il déjà des initiatives dans ce sens ?

De plus en plus de personnes sont favorables à un accès libre aux données. Ainsi, à l'issue d'un séminaire organisé fin 2011 par l'Ofev et la Commission suisse d'hydrologie, les participants ont conclu à l'unanimité que l'accessibilité des données environnementales devait être améliorée de toute urgence. En se basant sur la loi sur la géoinformation, l'Ofev a lancé un programme d'actions dans ce sens (pour en savoir plus : hugo.aschwanden@bafu.admin.ch). La recherche environnementale suisse doit profiter de cet

élan et soutenir ces initiatives en insistant sur l'intérêt scientifique de la disponibilité de l'information. Je souhaiterais vivement que les partenariats entre l'Eawag et les autres acteurs du secteur des sciences de

l'environnement se multiplient dans ce domaine. Dans le cadre du travail sur la plate-forme de données scientifiques qui se met actuellement en place au Centre de compétences Environnement et durabilité du domaine des EPF (www.swiss-experiment.ch), les liens avec le WSL sont en train de se resserrer (pour en savoir plus : sandro.bischof@wsl.ch).

Un accès général aux données existantes serait déjà un grand progrès

Les grands acteurs de l'observation de l'environnement

Section Observation de l'environnement de l'Ofev : C'est la section de l'Office fédéral de l'environnement chargée de la surveillance environnementale. Elle coordonne notamment le travail avec les services cantonaux et gère la plate-forme d'information et de coordination dédiée à l'observation de l'environnement (IKUB).

Organe d'information et de coordination pour l'observation de l'environnement (IKUB) : Cet organe fédère les principaux producteurs et utilisateurs de données environnementales des administrations fédérales et cantonales et de la recherche. L'IKUB coordonne les activités d'observation dans les différents domaines environnementaux et promeut l'échange d'informations entre les acteurs impliqués.

Réseau suisse d'observation de l'environnement (ROS) : Ce réseau a été créé pour garantir un accès facile et rapide aux données environnementales à l'ensemble des utilisateurs potentiels. Le réseau sera doté d'équipements techniques performants pour pouvoir mettre en

place et gérer une base de données harmonisée à l'échelle suisse.

Envirocat : Ce catalogue indique les données environnementales de la Confédération et des cantons actuellement disponibles et donne un récapitulatif des activités d'observation menées par ces services. www.envirocat.ch

Organe de coordination de la géoinformation au niveau fédéral (GCS) : Le GCS est chargé de concevoir et de superviser la coordination de la géoinformation au sein de l'administration fédérale et de gérer la plate-forme geo.admin.ch. Cet organe est constitué de représentants des sept départements de l'administration fédérale et de la chancellerie et présidé par le directeur de l'Office fédéral de la topographie. www.geo.admin.ch

Coordination, Services et Informations Géographiques (COSIG) : La structure COSIG est chargée d'assurer la mise en application des décisions stratégiques du GCS et du développement et de la gestion de l'infrastructure fédérale de données géographiques.

Coordination intercantonale des géoinformations (CIGEO) : Ce comité réunit les associations professionnelles cantonales des domaines des forêts, de la géoinformation, du cadastre, de l'agriculture, de l'aménagement du territoire, de l'environnement, des transports et de la mensuration et vise à garantir une représentation commune des intérêts des cantons auprès des autorités fédérales.

Communautés d'informations spécialisées (CIS) : On entend par communauté d'informations spécialisées un regroupement représentatif des acteurs impliqués dans la saisie, le stockage, la mise à jour et l'utilisation des géodonnées relatives à un certain domaine thématique. Il en existe ainsi une dans le domaine des eaux et des milieux aquatiques.

Geocat : Ce catalogue regroupe des métadonnées sur l'ensemble des géodonnées suisses et offre un point de départ idéal pour entamer une recherche sur les sujets spécifiques (présence de sources et aquifères, risques naturels, etc.) ou dans une catégorie donnée (photographies aériennes par exemple). www.geocat.ch

Micropolluants : bientôt la fin de l'incognito ?

Toxiques à très faible dose, les micropolluants organiques sont des invités indésirables dans les cours d'eau. Les techniques d'analyse classiques imposent de limiter les contrôles au dosage d'un nombre restreint de composés connus. De nouvelles méthodes permettent maintenant de détecter des substances jusque là passées inaperçues.



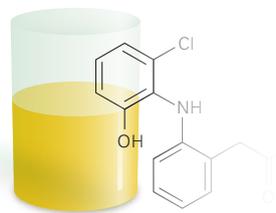
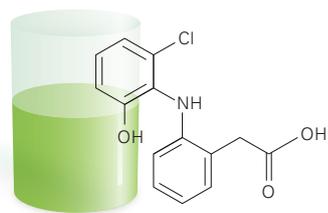
Heinz Singer, chimiste environnementaliste, étudie la présence des composés traces organiques dans le milieu aquatique.
Coauteurs : Mathias Ruff et Juliane Hollender



Une grande diversité de micropolluants issus des ménages et des activités industrielles et agricoles se déversent dans le Rhin (photo : le port rhénan à Bâle).

SciFinder, la plus grande base de données sur les substances chimiques en recense actuellement plus de 65 millions dont une majorité de composés organiques de synthèse. 156 000 viennent s'y ajouter chaque jour et aucun ralentissement de cette tendance n'est en vue. Rien d'étonnant à cela si l'on considère que, théoriquement,

le nombre de structures chimiques possibles s'élève à un décillion (un 1 suivi de 60 zéros). On ne sait pas exactement combien de ces substances sont réellement utilisées dans des quantités notables mais le nombre de composés enregistrés depuis l'entrée en vigueur en 2007 du règlement européen sur les produits chimiques Reach



Stratégie 1	Substance connue/ Substance de référence disponible	Identification et dosage possibles
	Le nombre de substances analysées en un passage est pratiquement illimité.	
Stratégie 2	Nature de la substance supposée/pas de substance de référence	Détection qualitative possible
	Pour la détection, seules la structure moléculaire et donc la masse exacte sont nécessaires. L'identification peut être confirmée par comparaison avec les banques de spectres ou avec les spectres de substances de référence acquises <i>a</i> <i>posteriori</i> .	
Stratégie 3	Substance inconnue	Identification de la structure moléculaire souvent possible
	Tous les signaux de masse restants sont émis par des subs- tances inconnues présentes dans l'échantillon. La masse exacte et les résultats de la fragmentation permettent souvent de déterminer la structure moléculaire correspondante.	

Fig. 1 : Stratégies possibles pour la détection des polluants par la spectrométrie de masse à haute résolution couplée à la chromatographie en phase liquide (LC-HRMS) [1].

peut en donner une idée. D'après ces chiffres, l'Union européenne produit ou importe environ 140 000 substances chimiques.

Des modèles permettent aujourd'hui d'évaluer par quelle voie et en quelle quantité les produits chimiques se déversent dans le milieu aquatique. La fiabilité des résultats reste cependant limitée étant donné le caractère souvent lacunaire des informations disponibles sur les quantités employées, les lieux d'utilisation et les propriétés des composés. Étant donné la diversité presque inimaginable des molécules possibles, le nombre de celles qui peuvent être évaluées de cette manière et qui ont réellement été mises en évidence dans le milieu aquatique semble totalement dérisoire même s'il s'élève déjà à plusieurs milliers.

Des analyses plus complètes sont possibles

Ces dernières dizaines d'années, les organismes de recherche et les autorités ont détecté et surveillé de nombreuses familles de polluants chimiques dans les eaux usées et le milieu aquatique : pesticides, médicaments, détergents, plastifiants, hormones, etc. issus de produits de la vie courante, de l'industrie et de l'agriculture. Des méthodes de détection de plus en plus sensibles permettent d'affiner les analyses.

Depuis les années 1990, la chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (cf. encadré page 11) est la technique privilégiée pour de nombreux composés volatiles non polaires. Le couplage de la chromatographie en phase liquide et de la spectrométrie de masse en tandem est quant à lui indiqué pour les molécules polaires hydrophiles. Ces deux techniques ne permettent cependant aujourd'hui de doser que quelques dizaines de polluants par analyse. De plus, elles impliquent une sélection préalable des

composés à rechercher afin d'adapter la sensibilité des détecteurs aux analystes ciblés. Dans ces conditions, il est impossible d'identifier les composés se trouvant dans un échantillon.

L'apparition de la spectrométrie de masse à haute résolution a totalement changé la donne. Cette technique permet en effet de déterminer la masse des molécules avec une extrême précision. Elle est capable de séparer les molécules à partir d'une différence de masse d'à peine 0,001 unité de masse atomique (soit $1,66 \times 10^{-30}$ kg). A ce niveau, chaque substance détectée émet son propre signal. La méthode est d'autre part utilisable dans toute la gamme des masses présentées par les polluants dans la nature. Couplée à la chromatographie en phase liquide, elle permet d'identifier une grande partie des substances avec une grande sensibilité. Contrairement aux méthodes précédentes, elle ne nécessite pas de substances de référence pour identifier les molécules. Ces étalons n'interviennent que dans l'étape de quantification. Trois grandes stratégies d'analyse peuvent être adoptées (Fig. 1).

Grâce à ces avantages, la chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse à haute résolution (LC-HRMS) est aujourd'hui utilisée pour les analyses de routine des programmes d'observation de la qualité des eaux. En plus de permettre la détection d'un nombre quasiment illimité de substances avec une précision inégalée, elle livre des données de haute résolution qui pourront éventuellement être utilisées ultérieurement pour identifier de nouveaux composés. Lorsque, par exemple, un composé jusque là inconnu ou considéré comme inoffensif s'avère préoccupant pour la qualité de l'eau, il est possible de le rechercher dans les analyses passées et de retracer l'évolution de la pollution au cours du temps.



Fig. 2: A la suite de la catastrophe de Schweizerhalle en 1986, les Etats riverains ont installé toute une série de stations d'observation et d'enregistrement sur le Rhin.

Médicaments et produits de dégradation (39,6%)



Fig. 3: 318 micropolluants connus sont actuellement analysés chaque jour à la station d'observation du Rhin installée près de Bâle. L'objectif est de suivre l'évolution de la pollution et de détecter les anomalies le plus rapidement possible.

Les enseignements de l'accident de Schweizerhalle

La station internationale de surveillance des eaux du Rhin de Weil am Rhein près de Bâle fait appel à cette technique depuis plusieurs années. Le Rhin sert à l'alimentation en eau potable de plus de 20 millions de personnes. Son bassin versant s'étend des Alpes suisses à la mer du Nord en passant par les régions les plus peuplées d'Allemagne et des Pays-Bas. Ses eaux recueillent aussi bien des effluents domestiques et industriels traités que les eaux de ruissellement de terrains voués à l'agriculture intensive ou à un habitat humain plus ou moins concentré. La station d'observation a été mise en place en 1992, à la suite de l'accident industriel survenu en 1986 dans l'usine Sandoz de Schweizerhalle (Fig. 2). Suite à un incendie, de grandes quantités de produits chimiques s'étaient déversées dans le Rhin avec les eaux d'extinction, provoquant une véritable catastrophe écologique et la mise à l'arrêt prolongé des stations de production d'eau potable situées en aval.

Depuis cette époque, des échantillons sont prélevés quotidiennement à Weil am Rhein pour suivre l'évolution à long terme de la qualité de l'eau et pour détecter avec rapidité avaries et déversements accidentels. Pour cette surveillance, l'Eawag a développé en partenariat avec le Service de l'environnement et de l'énergie du canton de Bâle-Ville une stratégie d'analyse graduée basée sur la méthode LC-HRMS [2]. En l'espace de 24 heures, les échantillons sont analysés par étapes pour détecter successivement les substances

connues, suspectées et inconnues. La liste des composés connus comprend actuellement 318 polluants chimiques et métabolites appartenant aux familles des pesticides, des biocides, des médicaments, des anesthésiants, des produits chimiques industriels, des produits anticorrosion et des édulcorants (Fig. 3). Cette liste est actualisée en permanence en fonction des avancées scientifiques et des résultats d'analyse des programmes de surveillance nationaux et internationaux.

Les analyses montrent que 84 des 318 composés domestiques, industriels et agricoles recensés sont régulièrement détectés dans le Rhin (Fig. 4). La moitié d'entre eux sont présents à des concentrations inférieures à 10 nanogrammes par litre (ng/l) et participent de façon à peine mesurable à la pollution des eaux. Un petit nombre de substances dépassent le seuil de 100 ng/l fixé pour les pesticides par l'Ordonnance sur la protection des eaux. Avec un débit d'environ 1000 m³/s à cet endroit, le fleuve transporte environ 10 kg de chacune d'elles par jour vers l'Allemagne.

Comment débusquer les substances inconnues

Même si les capacités d'analyse ont énormément augmenté, toutes les substances présentes dans le Rhin ne sont pas détectées et on ignore encore quelle est la partie immergée de l'iceberg. Pour appréhender les substances inconnues, l'Eawag a développé un logiciel qui extrait tous les signaux individuels des spectres de masse,

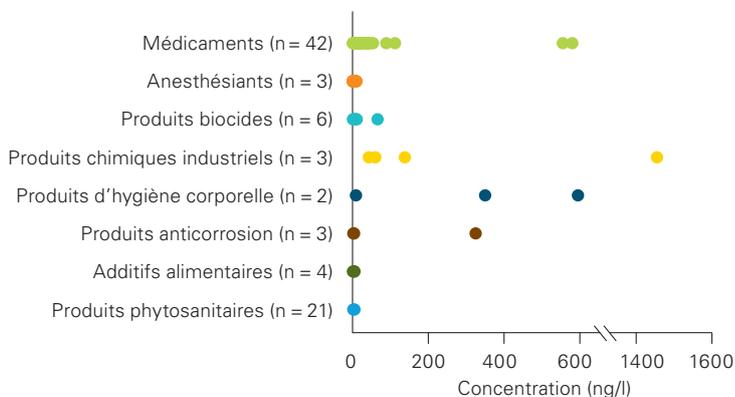
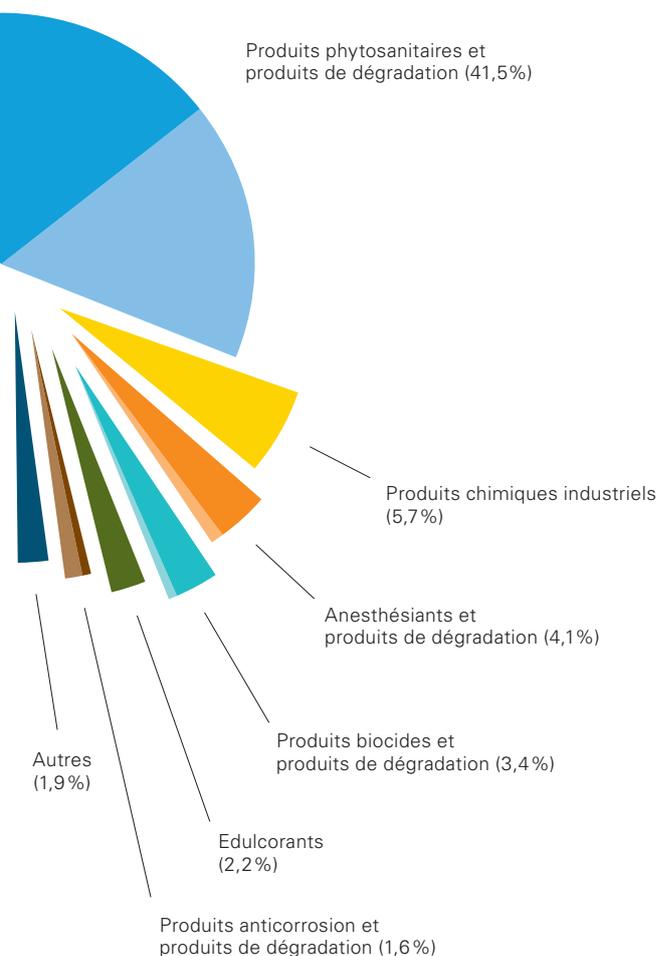


Fig. 4 : 84 composés d'origine domestique, industrielle ou agricole sont régulièrement détectés dans le Rhin.

les trie en fonction de leur intensité et élimine les bruits de fond. Les résultats montrent qu'en moyenne, un échantillon contient entre 2000 et 3000 composés non identifiés en plus des micropolluants dosés. 100 à 150 d'entre eux produisent des signaux dont l'intensité indique des concentrations supérieures à 10 ng/l. Une grande quantité de substances sont donc jusqu'à présent passées inaperçues. Rien ne permet encore de savoir s'il s'agit de composés naturels ou synthétiques.

Les informations disponibles sur ces substances inconnues se limitent à la masse moléculaire et éventuellement à la composition isotopique. La détection de composés suspects doit donc se faire selon la deuxième stratégie de la méthode graduée (Fig. 1). Étant donné l'absence de substances de référence, la démarche adoptée consiste à rechercher dans les fichiers de pesticides, biocides et médicaments les composés enregistrés qui présentent la même masse moléculaire. Dans un deuxième temps, le spectre de l'inconnu peut être comparé aux différents spectres enregistrés pour les substances entrant en ligne de compte.

Pour la plupart des composés inconnus, cette stratégie s'avère cependant insuffisante. Il convient alors de procéder à des analyses plus complexes (stratégie 3). La masse exacte et la composition isotopique permettent dans un premier lieu de déterminer la formule brute du composé. Les structures possibles sont ensuite obtenues

par consultation de bases de données spécialisées. Ensuite, les différentes molécules obtenues par fragmentation permettent par déduction d'identifier la structure la plus vraisemblable. Ce procédé nous a ainsi permis de détecter le moclobémide, un antidépresseur, dans le Rhin. Entre le 12 et le 28 janvier 2011, un fort signal de source inconnue était observé dans les échantillons. La formule brute correspondante était $C_{13}H_{17}Cl_1N_2O_2$ (Fig. 5). Une campagne de mesures effectuée sur toute la longueur du Rhin pendant une seconde période d'émission du 9 au 15 mars 2011 a permis d'identifier une source ponctuelle située entre Rheinfelden et Bâle. Les quantités déversées ont été estimées à 14 kg pendant ce second épisode et à 40 kg en janvier. Les traces de la substance ont pu être suivies jusqu'à la mer du Nord. Selon diverses estimations, les concentrations de moclobémide mesurées dans le Rhin ne sont pas susceptibles de représenter un danger ni pour l'écosystème ni pour les populations humaines alimentées en eau potable par filtration sur berge [3].

Cet événement montre bien que la LC-HRMS est une bonne méthode pour détecter les avaries et déversements accidentels. Étant donné que les responsables de tels accidents ignorent souvent qu'ils se produisent ou n'ont pas connaissance de la composition exacte des rejets, les contrôles quotidiens permettent de détecter rapidement les pics de pollution éventuels et, dans l'idéal, d'identifier les contaminants. Le processus d'identification est cependant

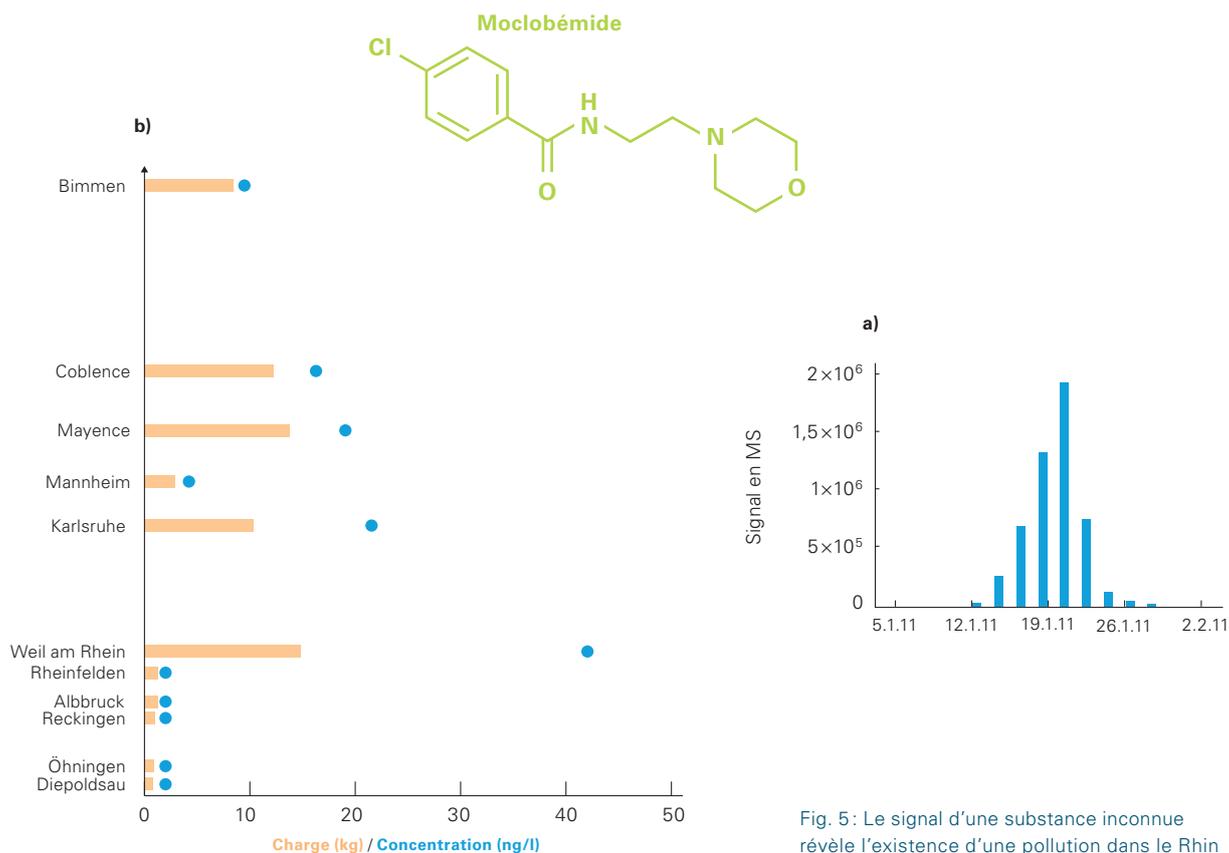


Fig. 5: Le signal d'une substance inconnue révèle l'existence d'une pollution dans le Rhin fin janvier 2011 (a). Lors d'une deuxième vague de contamination, la substance a pu être suivie du territoire helvète jusqu'aux Pays-Bas (b).

encore trop long et trop complexe pour entrer dans les analyses de routine. Dans une prochaine étape, il est prévu d'intégrer des analyses statistiques aux travaux effectués quotidiennement à la station pour détecter les masses apparaissant subitement.

Détection des produits de dégradation inconnus

Pour des raisons économiques, la surveillance des micropolluants organiques dans les grands bassins versants et à l'échelle nationale se concentre sur un nombre limité de substances emblématiques. Pour pouvoir vérifier le bien-fondé du choix de ces composés, l'Eawag a utilisé la technique LC-HRMS dans plusieurs projets pilotes en partenariat avec les autorités fédérales et cantonales. Des analyses ont été réalisées dans les réseaux d'observation des eaux souterraines (Naqua) et des eaux de surface (Nawa) ainsi que dans les lacs de Constance et des Quatre-Cantons. Des modèles d'exposition, dont la fonction est de prédire les niveaux de pollution, ont été utilisés en complément des mesures. Ainsi, dans le bassin du lac de Constance, les niveaux d'exposition ont tout d'abord été calculés à l'aide d'une modélisation des flux de matière pour pouvoir concentrer le travail d'analyse sur les sites sensibles [4].

L'efficacité de cette approche pour l'étude des grands bassins versants a été confirmée dans le projet de coopération internationale réalisé dans la région du fleuve Haihe au nord-est de la Chine (voir aussi l'article p. 36). Le bassin fluvial s'étend sur plus de 300 000 kilomètres carrés et abrite une population de plus de

20 millions d'habitants. Il est très difficile, dans un réseau aussi étendu, de prédire le lieu et la nature des micropolluants. La technique LC-HRMS a permis d'identifier les micropolluants significatifs à partir d'un petit nombre d'échantillons. Ces substances prioritaires ont ensuite été recherchées sur tout le bassin de façon à déterminer les points de rejet et à localiser les zones de forte pollution. Il est ainsi apparu que les stations d'épuration de Pékin étaient les principales responsables des émissions de composés traces organiques dans le bassin. Etant donné que plus de 90 % de l'eau sont ensuite utilisées en aval pour l'irrigation, ces micropolluants ne tardent pas à se retrouver dans les champs [5].

A côté du contrôle de la qualité des eaux, la spectrométrie de masse à haute résolution peut être utilisée pour obtenir des compléments d'information très utiles dans différentes études expérimentales. En étudiant les processus de biodégradation dans le traitement des eaux usées, l'Eawag a ainsi observé la formation de métabolites inconnus de substances pharmaceutiques [6]. Un système informatique a tout d'abord livré une liste des produits de dégradation possibles. La spectrométrie a ensuite été utilisée pour rechercher ces différentes molécules dans les effluents et la plupart d'entre elles ont finalement été identifiées en comparant les structures trouvées avec des substances de référence [7].

Ces exemples montrent bien tout le potentiel d'utilisation de la nouvelle technique d'analyse. Celui-ci ne peut cependant être en-



tièrement exploité que si le développement de logiciels efficaces et automatisables est poursuivi pour faciliter les applications pratiques. Car comme dans tous les domaines faisant appel à de grandes quantités de données, le succès des analyses dépend fortement des moyens de traitement et d'interprétation de l'information. L'association à des algorithmes informatiques puissants est la condition à remplir pour que les méthodes de spectrométrie de masse puissent à l'avenir développer pleinement leur potentiel.

heinz.singer@eawag.ch

- [1] Krauss M., Singer H., Hollender J. (2010): LC-high resolution MS in environmental analysis: From target screening to the identification of unknowns. *Analytical Bioanalytical Chemistry* 397, 943–951.
- [2] Singer H., Huntscha S., Hollender J., Mazacek J. (2009): Multi-komponenten-Screening für den Rhein bei Basel. Abschlussbericht, Eawag, in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Umwelt BAFU, S. 62.
- [3] F. Hoffmann-La Roche AG/Ltd Basel: Predicted no-effect concentration (PNEC) according to EU Technical Guidance Document (TGD) on Risk Assessment; derived no-effect level (DNEL) according to Straub and Flückiger, 2010, SETAC Europe.
- [4] Longrée P., Singer H., Moschet C., Götz C., Schärer M., Keusen M. (2011): Organische Mikroverunreinigungen im Bodensee. GWA 7.
- [5] Heeb F., Singer H., Pernet-Coudrier B., Qi W., Liu H., Longrée P., Müller B., Berg M. (2012): Organic micropollutants in rivers downstream of the megacity Beijing: Sources and mass fluxes in a large-scale wastewater irrigation system. *Environmental Science and Technology* 46, 8680–8688.
- [6] Helbling D., Hollender J., Kohler H.P., Singer H., Fenner K. (2009): High-throughput identification of microbial transformation products of organic micropollutants. *Environmental Science and Technology* 44, 6621–6627.
- [7] Kern S., Fenner K., Singer H., Schwarzenbach R., Hollender J. (2009): Identification of transformation products of organic contaminants in natural waters by computer-aided prediction and high-resolution mass spectrometry. *Environmental Science and Technology* 43, 7039–7046.

Méthodes d'analyse

La **chromatographie** est un procédé de séparation des constituants d'un mélange. L'échantillon est injecté à l'entrée du dispositif où il se dilue dans une phase mobile qui l'entraîne à travers une phase stationnaire (gel de silice modifié ou colonnes capillaires enduites) contenue dans une colonne. Les molécules sont retenues plus ou moins fortement selon leurs propriétés physiques et éluées à des vitesses différentes, ce qui permet de les séparer. Un système de détection placé en sortie de la colonne permet d'enregistrer le passage successif des composés qui apparaissent sous la forme de pics dans une courbe appelée chromatogramme. Les molécules peuvent ensuite être identifiées à l'aide des courbes d'éluion de substances de référence (courbes d'étalonnage). La hauteur et la largeur des pics permettent de calculer les quantités de composés présents dans l'échantillon. Dans la **chromatographie en phase gazeuse**, la phase mobile est un gaz (en général de l'hélium ou de l'hydrogène) alors que la **chromatographie en phase liquide** fait appel à de l'eau ou à des solutions organiques. Tandis que la première s'applique uniquement à l'étude des substances volatilisables, la seconde permet de séparer toutes les molécules solubles. En raison de sa sensibilité et de sa sélectivité, la technique de détection choisie est généralement la spectrométrie de masse.

La **spectrométrie de masse** permet de détecter et d'identifier les molécules par mesure de leur masse. Après leur séparation chromatographique, les composés à analyser sont tout d'abord ionisés sur une interface. Ils traversent ensuite un champ magnétique ou électrique qui les sépare en fonction de leur masse et de leur charge et peuvent ensuite être détectés. En général, le procédé s'accompagne d'une fragmentation de la molécule à analyser. La taille et la fréquence des fragments facilitent alors l'identification. Pour affiner la détection, deux analyseurs peuvent être utilisés en chaîne dans un système dit de **spectrométrie de masse en tandem**. De leur côté, les **spectromètres de masse haute résolution** sont d'une telle précision qu'ils permettent de séparer des espèces ioniques de masses et de charges quasiment identiques. Cette propriété est mise à profit pour déterminer la structure de composés totalement inconnus.

Quand les isotopes racontent l'histoire des polluants

Le devenir des micropolluants organiques dans le sol et le milieu aquatique est difficile à suivre avec les méthodes classiques. L'analyse des rapports isotopiques de composés spécifiques permet de retracer l'histoire des polluants et, par exemple, de déterminer l'origine de produits de lave-vaisselle ou la voie de dégradation des explosifs.



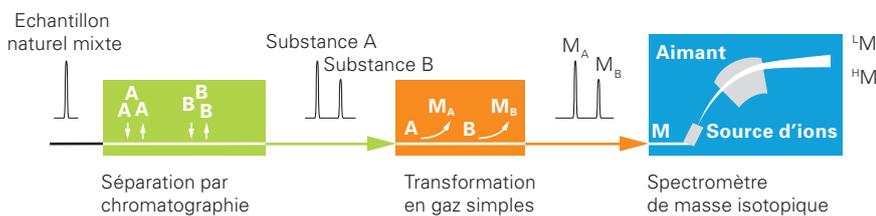
Thomas Hofstetter, chimiste environnementaliste, est chercheur au département de Chimie de l'environnement de l'Eawag et enseigne à l'EPF de Zurich en qualité de privatdocent. Coauteurs: Reto Wijker et Stephanie Spahr



Travaux d'assainissement sur le site contaminé d'une ancienne fabrique d'explosifs en Suisse: les analyses isotopiques permettent de caractériser les processus de biodégradation subis par les polluants dans le sol et le sous-sol.

L'étude des polluants organiques est primordiale pour l'appréciation de la qualité des eaux [1]. Que ce soit dans l'industrie, l'artisanat ou les activités domestiques, les produits chimiques utilisés chaque jour se comptent par dizaines de milliers. Beaucoup d'entre eux ne

sont que partiellement éliminés dans les stations d'épuration et rejoignent le milieu aquatique où ils peuvent avoir des effets délétères à très faible dose. A cette micropollution viennent s'ajouter les émissions provenant des décharges d'ordures ménagères et



Représentation schématique de la méthode CSIA (d'après [2]). Après avoir été séparés par chromatographie, les différentes substances sont transformées en gaz simples qui sont ensuite analysés par spectrométrie de masse isotopique. Dans le spectromètre, les gaz ionisés sont séparés en deux flux d'isotopomères lourds (HM) et légers (LM) qui sont détectés en parallèle.

des sites contaminés. Lorsqu'elle se manifeste, ce deuxième type de pollution se caractérise souvent par des concentrations bien supérieures à celles des micropolluants dans les sols et le milieu aquatique et peut nécessiter des mesures d'assainissement ou d'immobilisation des contaminants. Pour juger de la pertinence ou de l'urgence de telles interventions, les questions suivantes doivent être posées : D'où viennent les polluants et qui est responsable de leur émission ? Les composés sont-ils susceptibles de subir, dans le milieu, des transformations aboutissant à la formation de produits moins toxiques voire inoffensifs ?

Déterminer l'origine et le devenir des polluants

Les nouvelles techniques d'analyse comme le couplage de la chromatographie en phase liquide et de la spectrométrie de masse haute résolution (cf. article p. 6) permettent aujourd'hui d'identifier et de doser les polluants organiques même s'ils sont présents en très faible concentration. La détermination de l'origine d'une contamination peut toutefois s'avérer difficile lorsque plusieurs sources potentielles coexistent sur un même territoire. De même, une baisse de concentration dans l'environnement n'indique pas la nature des phénomènes qui l'ont entraînée : dilution, adsorption sur des particules en suspension ou des sédiments, volatilisation, biodégradation, les possibilités sont multiples. Des moyens très importants d'analyse et de simulation doivent alors être déployés pour caractériser et quantifier les transformations subies par les polluants. Par ailleurs, les produits de dégradation peuvent eux aussi présenter une certaine écotoxicité et doivent donc être pris en compte dans les analyses de risque.

L'Eawag développe des méthodes basées sur l'analyse des rapports isotopiques de composés spécifiques (en anglais « compound-specific isotope analysis », CSIA) pour étudier l'origine et la transformation des micropolluants organiques dans les milieux. Cette approche permet de mesurer les rapports d'isotopes stables comme le carbone ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), l'azote ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) et l'hydrogène ($^2\text{H}/^1\text{H}$) dans les polluants après les avoir isolés et de suivre leurs variations dans le contexte étudié (cf. encadré). La technique la plus souvent utilisée en CSIA est la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse isotopique à source gazeuse. De nombreux travaux sont menés actuellement pour tenter d'élargir la palette de méthodes de séparation utilisables (chromatographie en phase liquide par exemple) et l'éventail des isotopes analysables, comme chlore ($^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$), brome ($^{81}\text{Br}/^{79}\text{Br}$) etc. [2].

Analyse des rapports isotopiques des composés spécifiques (CSIA)

Les composés organiques sont constitués d'atomes qui peuvent être présents sous la forme de différents isotopes stables. Ils existent donc sous la forme d'une multitude d'« isotopomères » (molécules se différenciant uniquement par leur composition isotopique). C'est la raison pour laquelle il est impossible de mesurer les rapports isotopiques avec précision à partir de la masse moléculaire obtenue par la spectrométrie de masse traditionnelle.

Dans l'analyse des rapports isotopiques des composés spécifiques (CSIA, compound-specific isotope analysis), ce problème est contourné en transformant chaque substance en gaz de faible masse contenant seulement un ou deux atomes de l'élément à analyser. Les isotopes de ce dernier sont dosés simultanément dans un spectromètre de masse isotopique (IRMS, isotope ratio mass spectrometer) qui les sépare en deux flux ioniques d'isotopomères lourds (les plus rares) et d'isotopomères légers (les plus fréquents). Le squelette carboné d'un polluant est ainsi oxydé en CO_2 par combustion à une température d'environ $1000\text{ }^\circ\text{C}$ puis dosé au spectromètre de masse sous la forme de $^{12}\text{CO}_2$ et de $^{13}\text{CO}_2$. Pour étudier les isotopes de l'azote, de l'hydrogène et de l'oxygène, les gaz simples analysés sont respectivement N_2 , H_2 et CO .

La mesure des rapports isotopiques est extrêmement précise même lorsque les isotopes d'un même élément sont présents à des concentrations très différentes (le ^{13}C ne représente que 1,1 % du carbone total et le ^2H seulement 0,015 % de l'hydrogène). La méthode n'est toutefois applicable qu'aux éléments transformables en gaz simples analysables en continu.

Étant donné que la quantité d'isotopes mesurés varie d'un appareil à l'autre, les rapports isotopiques déterminés doivent toujours être standardisés avec des rapports isotopiques de référence. Ils sont alors exprimés sous la forme de **signatures isotopiques**, δ , qui représentent en ‰, pour mille, la déviation du rapport isotopique de l'échantillon par rapport à celui d'un standard international pris comme référence. La signature isotopique du carbone est ainsi :

$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = \frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C} (\text{échantillon})}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C} (\text{standard})} - 1$$

Avec le couplage chromatographie en phase gazeuse – spectrométrie de masse isotopique, les isotopes de carbone peuvent être dosés avec une incertitude d'environ $\pm 0,5\text{ ‰}$, ce qui correspond à une différence d'à peine 0,0000056 entre deux mesures de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$.

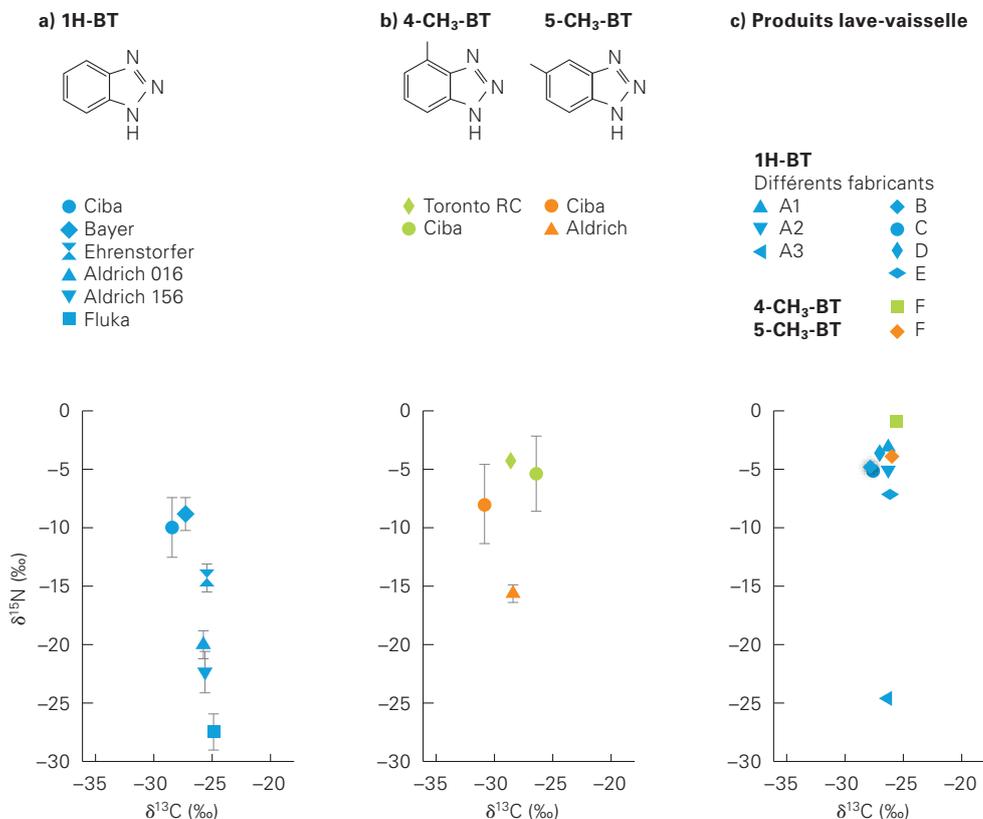


Fig. 1 : Signatures isotopiques du carbone et de l'azote du benzotriazole (1H-BT) et de deux méthylbenzotriazoles (4-CH₃-BT et 5-CH₃-BT) produits par différents industriels. La figure de droite indique les valeurs du δ¹³C et du δ¹⁵N de ces substances dans les produits lave-vaisselle de différents fabricants (d'après [6]).

Deux études récentes de l'Eawag illustrent bien les possibilités d'application de cette approche isotopique en chimie environnementale. L'étude des benzotriazoles montre ainsi que l'observation chez un polluant donné de rapports isotopiques identiques sur différents sites indique des modes de production et une source de matière première communs et permet d'identifier la source de contamination. Une modification des rapports isotopiques entre deux sites révèle de son côté que le polluant a subi une transformation, permet d'identifier les produits qui en ont résulté et – moyennant quelques informations supplémentaires – permet de déterminer la vitesse à laquelle les processus se déroulent. C'est ce qu'a montré l'étude de composés nitroaromatiques issus de sites contaminés par des explosifs [3].

L'origine des benzotriazoles dans les produits lave-vaisselle ?

De par leur utilisation massive comme agents anticorrosion et comme dégivrants dans l'industrie et chez les particuliers, les benzotriazoles se retrouvent très fréquemment à l'état de micropolluants dans les eaux suisses [4]. En raison de leur grande résistance aux dégradations biologiques, ils sont utilisés comme indicateurs de la présence de polluants organiques persistants et sont l'un des paramètres mesurés pour évaluer les performances des stations d'épuration [5]. La méthode CSIA peut être utilisée pour savoir si les traitements sont en mesure d'éliminer les benzotriazoles – et donc d'autres micropolluants du même type – et si oui, dans quelles conditions. Il suffit pour cela d'étudier les variations des

abondances en isotopes stables du carbone ou de l'azote dans le benzotriazole. La principale difficulté réside toutefois dans le fait qu'en raison des propriétés complexantes qui sont à l'origine de leur action anticorrosion, ces composés ne peuvent pas être analysés par la technique éprouvée de chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse isotopique. A l'Eawag, nous avons donc développé de nouvelles méthodes pour l'analyse des isotopes stables de tels micropolluants organiques polaires et les avons appliquées à l'identification de la provenance industrielle des benzotriazoles contenus dans les produits lave-vaisselle.

Conçue pour la comparaison de signaux d'intensités très différentes émis par des isotopes lourds ou légers, la spectrométrie de masse isotopique est nécessairement peu sensible. Basée sur la transformation des benzotriazoles en CO₂ et N₂ dans des réacteurs au nickel et au platine, notre méthode livre des mesures d'une grande exactitude à partir de 22 nanogrammes (ng) de carbone et 11 ng d'azote dans l'échantillon. Pour un volume injecté de 1 microlitre, ces quantités correspondent à des concentrations de benzotriazole de 30 à 40 mg par litre. Ces valeurs, plutôt faibles par rapport à celles habituellement mesurées en CSIA, sont cependant 10 000 fois supérieures aux concentrations rencontrées dans les cours d'eau ou les effluents d'épuration. Les benzotriazoles doivent donc tout d'abord être concentrés sans modifier les rapports isotopiques par une étape préliminaire d'extraction en phase solide. Cette approche nous a permis de déterminer les signatures isotopiques du carbone

Restes de TNT et de DNT sur un site contaminé.



Foto: Wijkjer

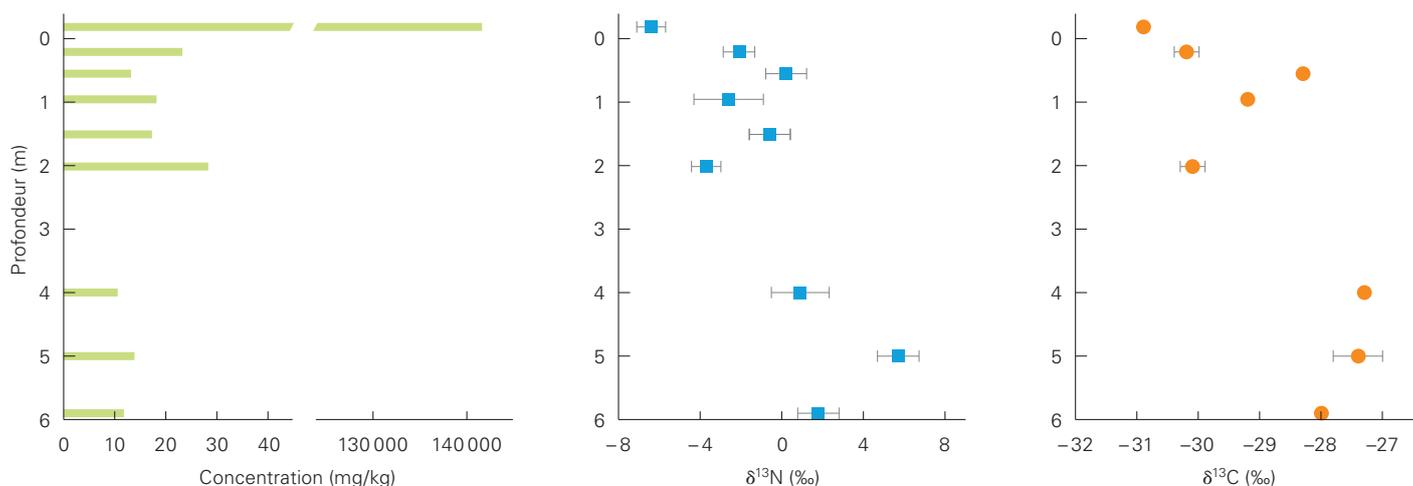


Fig. 2: Profils des concentrations et des signatures isotopiques de l'azote et du carbone de l'explosif 2,4-DNT sur six mètres de profondeur (d'après [7]).

et de l'azote du benzotriazole (1H-BT) et des méthylbenzotriazoles (4-CH₃-BT et 5-CH₃-BT) dans de l'eau du robinet, des effluents d'épuration, des boues d'épuration et des produits lave-vaisselle.

Chaque fabricant appose son empreinte isotopique

Les figures 1a et 1b présentent les variations des abondances des isotopes de carbone et d'azote ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$) dans les benzotriazoles et méthylbenzotriazoles produits par différents fabricants. Il apparaît nettement que le paramètre le plus discriminant est le rapport isotopique de l'azote. Cette particularité s'explique par le procédé de fabrication des composés. Alors que le noyau benzénique des produits pétrochimiques présente habituellement des valeurs du $\delta^{13}\text{C}$ de l'ordre de -25 à -30‰, le cycle triazolique doit être synthétisé en plusieurs étapes à partir de nitrobenzène chloré. D'autres composés azotés comme l'ammoniaque et l'acide nitrique

interviennent également dans le procédé de fabrication. Les valeurs très variables du $\delta^{15}\text{N}$ chez les benzotriazoles reflètent donc les différents rapports isotopiques de l'azote contenu dans les composés d'origine. Par ailleurs, les rapports isotopiques des réactifs et des produits se modifient lors des processus de synthèse industriels car les réactions chimiques ne sont jamais totales. Ces deux facteurs – les rapports isotopiques des réactifs natifs et leur modification au cours du processus industriel – composent l'empreinte isotopique des benzotriazoles.

Partant de ce constat, nous avons cherché à savoir si les benzotriazoles contenus dans les produits pour lave-vaisselle vendus en Suisse avaient tous la même provenance industrielle ou non (Fig. 1c). Les analyses ont montré qu'à une exception près, ils présentaient tous à peu près la même signature isotopique de l'azote

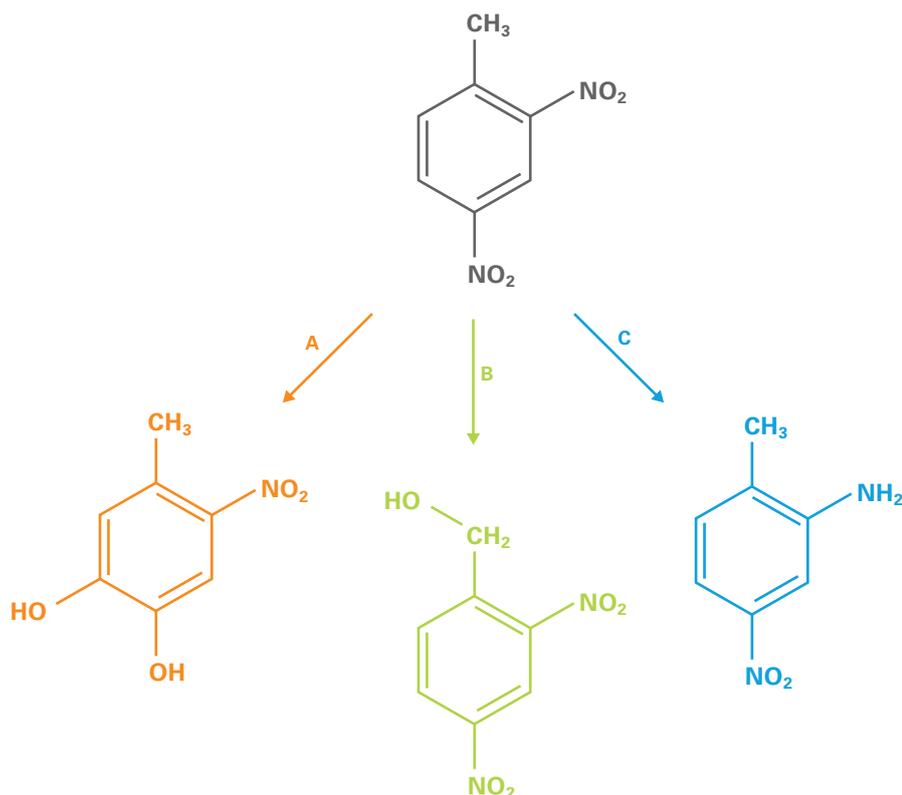


Fig. 3 : Premières étapes des trois types de réactions que peut subir le 2,4-DNT lors de sa biodégradation microbienne : (A) dioxygénéation, (B) oxydation des groupes méthyle et (C) réduction des groupes nitro (seule l'une des deux possibilités est montrée). Seule la dioxygénéation aboutit à une minéralisation totale du 2,4-DNT.

(-5‰), ce qui indique une origine industrielle commune. Dans une prochaine étape, nous appliquerons la même méthode pour déterminer la provenance des benzotriazoles présents dans les cours d'eau suisses. Cette étude sera réalisée dans le cadre d'un projet de recherche sur l'analyse isotopique spécifique des micropolluants organiques que l'Eawag vient de lancer en partenariat avec l'Université de Neuchâtel et le Centre Helmholtz de Munich avec le soutien du Fonds national suisse pour la recherche scientifique.

Traçage inverse de la dégradation des explosifs

La présence de composés toxiques nitroaromatiques comme le trinitrotoluène ou TNT et son précurseur, le dinitrotoluène ou DNT, dans les matériaux et terrains contaminés par les explosifs ou dans le sol et le sous-sol des anciens sites de production est un sujet de préoccupation en matière d'environnement. Bien que les réactions potentielles de dégradation de ces substances dans le milieu naturel soient connues, il est extrêmement difficile d'évaluer à quelle vitesse elles se produisent et d'estimer le degré de transformation à un moment donné. Cette difficulté d'évaluation est due, d'une part, à la cinétique de ces réactions qui s'étend sur plusieurs décennies et, d'autre part, au fait que les polluants et leurs produits de dégradation sont souvent fortement liés à la matrice organo-minérale des sols et sédiments, ce qui complique les analyses. De plus, beaucoup de composés nitroaromatiques subissent tout une série de transformations qui peuvent générer des produits de réaction eux-mêmes très toxiques comme, par exemple, des arylamines.

Pour la première fois, l'Eawag est parvenu à retracer les processus de dégradation subis par des composés nitroaromatiques sur un site contaminé en étudiant leur fractionnement isotopique à travers les variations des signatures de leurs isotopes de carbone et d'azote [7]. La figure 2 présente à titre d'exemple le profil des concentrations et rapports isotopiques du 2,4-DNT en fonction de la profondeur sur

un ancien site d'entreposage et de transbordement d'explosifs. Des données similaires ont été collectées pour le TNT et le 2,6-DNT. Les concentrations mesurées dans le sous-sol indiquent que le polluant a été transporté en profondeur. Elles ne permettent cependant pas de savoir s'il a subi une quelconque dégradation. Plusieurs études ont toutefois montré que les microorganismes étaient en mesure de dégrader le 2,4-DNT selon trois réactions différentes dont une seule conduit à une minéralisation (Fig. 3).

L'évolution des signatures isotopiques du carbone et de l'azote du 2,4-DNT avec la profondeur révèle la nature des phénomènes de dégradation microbienne qui se produisent dans le sol et le sous-sol. Plus la concentration de DNT y est faible, plus les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{15}\text{N}$ s'éloignent de leurs valeurs en surface. C'est le signe indubitable d'une transformation (bio)chimique du produit lors de son cheminement dans le sous-sol. En effet, un fractionnement isotopique de cette ampleur ne peut être entraîné par les seuls phénomènes de transfert mais résulte de la rupture de liaisons chimiques causée, dans notre cas, par une dégradation biologique. C'est ce que l'on appelle un effet isotopique cinétique. Etant donné que cet effet varie en fonction des éléments impliqués dans les réactions et de la nature des liaisons rompues, l'étude du fractionnement isotopique permet d'identifier les mécanismes réactionnels en jeu et donc de déterminer les voies de dégradation empruntées par les composés dans l'environnement et les produits de réaction résultants [8].

Si l'on met en relation le $\delta^{13}\text{C}$ et le $\delta^{15}\text{N}$ de la figure 2, on observe chez le 2,4-DNT une tendance générale à l'accroissement négatif des signatures isotopiques du carbone et de l'azote avec la profondeur. La comparaison de cette évolution avec les analyses de fractionnement isotopique du 2,4-DNT effectuées en laboratoire permet d'identifier les mécanismes impliqués sur le terrain (Fig. 4).

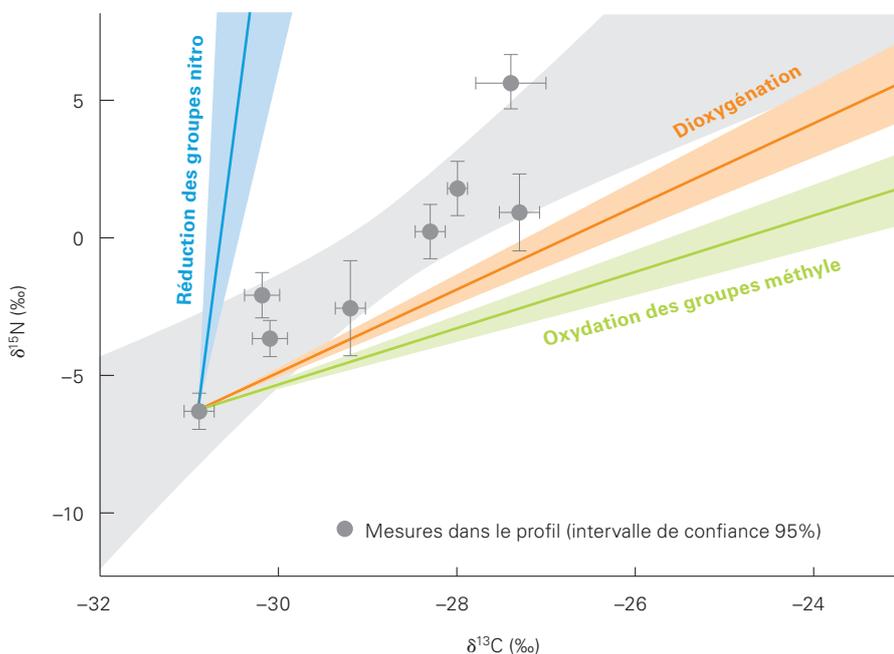


Fig. 4 : Analyse du fractionnement isotopique du 2,4-DNT dans le sol et le sous-sol d'un site contaminé (points gris). L'enrichissement en isotopes ^{13}C et ^{15}N au cours de la biodégradation est très proche de celui observé en laboratoire au cours de la minéralisation de ce composé par dioxygénation (tendance orange) et suit légèrement la tendance observée pour la réduction en aminonitrotoluènes (tendance bleue) (d'après [7]).

Lorsqu'un polluant subit simultanément plusieurs réactions de dégradation, l'étude du fractionnement isotopique donne une image moyennée de ces mécanismes. Dans notre cas, les résultats montrent que le 2,4-DNT est en grande partie éliminé par dioxygénation qui est le processus aboutissant à la minéralisation complète du composé. Le reste subit en revanche une réduction des groupes nitro qui donne naissance à des aminonitrotoluènes toxiques dont la présence dans nos échantillons a été attestée par analyse chimique.

Pour pouvoir utiliser l'analyse des rapports isotopiques des composés spécifiques dans une approche plus quantitative, nous étudions actuellement l'importance du fractionnement isotopique et les effets isotopiques cinétiques de différents mécanismes réactionnels. Les premiers résultats de laboratoire indiquent que, par rapport aux autres voies de dégradation, la dioxygénation entraîne un fractionnement relativement faible des isotopes d'azote et de carbone pour une même quantité de 2,4-DNT transformé. Etant donné qu'il s'agit du principal mécanisme réactionnel impliqué sur le site étudié, l'importance du fractionnement qui y a été mesuré indique qu'une grande quantité de polluant a déjà été minéralisée (probablement plus de 99%). Suite à la très forte contamination du site, la quantité d'explosif encore présente était toutefois encore bien mesurable. Si l'on confronte notre estimation des quantités biodégradées avec la durée connue de l'activité de production des composés nitroaromatiques, il apparaît que le 2,4-DNT présente une demi-vie de 10 à 50 ans dans le sous-sol. Même si le taux de biodégradation est entaché d'une incertitude de dix à vingt ans, l'analyse des rapports isotopiques des composés isolés a permis d'obtenir sur les mécanismes réactionnels des informations que nulle méthode traditionnelle n'aurait pu livrer.

thomas.hofstetter@eawag.ch

- [1] Schwarzenbach R.P., Egli T., Hofstetter T.B., von Gunten U., Wehrli B. (2010): Global water pollution and human health. *Annual Review of Environment and Resources* 35 (1), 109–136.
- [2] Elsner M., Jochmann M.A., Hofstetter T.B., Hunkeler D., Bernstein A., Schmidt T.C., Schimmelmann A. (2012): Current challenges in compound-specific stable isotope analysis of environmental organic contaminants. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 403 (9), 2471–2491.
- [3] Hofstetter T.B., Berg M. (2011): Assessing transformation processes of organic contaminants by compound-specific stable isotope analyses. *Trends in Analytical Chemistry* 30 (4), 618–627.
- [4] Hollender J., Zimmermann S.G., Köpke S., Krauss M., Mc Ardell C.S., Ort C., Singer H., von Gunten U., Siegrist H. (2009): Elimination of organic micropollutants in a municipal wastewater treatment plant upgraded with a full-scale post-ozonation followed by sand filtration. *Environmental Science and Technology* 43 (20), 7862–7869.
- [5] Götz C. et al. (2010): Mikroverunreinigungen – Beurteilung weitergehender Abwasserreinigerungsverfahren anhand Indikatortsubstanzen. *GWA* 4, 325–333.
- [6] Spahr S., Huntscha S., Bolotin J., Meier M.P., Elsner M., Hollender J., Hofstetter T.B. (2012): Compound-specific isotope analysis of benzotriazole and its derivatives. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. <http://dx.doi.org/10.1007/s00216-012-6526-1>
- [7] Wijker R.S., Bolotin J., Nishino S.F., Spain J.C., Hofstetter T.B. (en préparation): Evaluating nitroaromatic explosives biodegradation at a contaminated field site using compound-specific C and N isotope analysis. *Environmental Science and Technology*.
- [8] Hofstetter T.B., Schwarzenbach R.P., Bernasconi S.M. (2008): Assessing transformation processes of organic compounds using stable isotope fractionation. *Environmental Science and Technology* 42 (21), 7737–7743.

L'attrait du prélèvement passif

L'échantillonnage passif est souvent mieux adapté que les prélèvements ponctuels à l'étude de la contamination chimique de systèmes environnementaux dilués et variables comme les cours d'eau. Il permet en effet de rendre compte de la dynamique spatiotemporelle de la pollution et de mettre en évidence les contaminants présents dans l'eau à des concentrations inférieures au seuil de détection – comme par exemple les PCB dans la Birse.



Étienne Vermeirssen est biologiste et dirige une équipe de recherche au Centre Ecotox de l'Eawag et de l'EPFL.
Coauteurs: Juliane Hollender, Markus Zennegg (Empa)



Les polluants chimiques contenus dans l'eau viennent s'accumuler sur le capteur passif par simple diffusion.

Après avoir emprunté diverses voies de rejet, les polluants se retrouvent dans le milieu aquatique où ils peuvent souvent être dosés avec une grande fiabilité. Grâce aux progrès techniques, de plus en plus de composés peuvent être détectés avec une sensibilité toujours croissante. Mais quelle que soit leur qualité, les analyses

n'ont de valeur que si elles reposent sur des échantillons pertinents et représentatifs. A l'heure actuelle, la plupart des prélèvements se font de façon ponctuelle. Mais les échantillons ponctuels permettent-ils vraiment d'obtenir une image réaliste de la contamination d'un système environnemental ?

Les insuffisances des prélèvements ponctuels

L'écoulement des eaux dans une rivière est un processus fondamentalement dynamique. Les précipitations font varier le débit et modifient donc constamment le degré de dilution des polluants dans le milieu. De même, les rejets varient dans le temps : les polluants ruisselant des voiries (souvent des métaux) ou des terres agricoles (souvent des pesticides) se déversent par à-coups, les rejets industriels dépendent des rythmes d'activité. Par ailleurs, la pollution présente une certaine variabilité spatiale : étant donné que les polluants ne se mélangent pas instantanément avec les eaux réceptrices, leur répartition n'est pas homogène. Tous ces aspects font qu'il est très difficile de prélever des échantillons ponctuels représentatifs dans un cours d'eau. Lorsque l'on cherche à contrôler le bon respect de critères de qualité de l'eau ou à localiser les sources de pollution pour définir les priorités d'action, les prélèvements ponctuels s'avèrent souvent inadéquats. Les échantillonneurs automatiques, de leur côté, ne peuvent être utilisés que sur certains sites bien particuliers comme les conduites d'évacuation ou les tronçons bien brassés. D'autre part, leur coût élevé et leur besoin d'entretien les rendent souvent prohibitifs pour les programmes de surveillance de grande envergure.

Face aux limites des prélèvements ponctuels, l'échantillonnage passif se présente comme une solution intéressante. Il est basé sur le piégeage en continu des polluants présents dans le milieu par un échantillonneur placé dans le courant pendant une certaine durée (cf. encadré). Cette rétention produit un effet de pré-concentration qui autorise notamment le dosage de composés présents à l'état de traces. Originellement conçus pour l'étude de la pollution atmosphérique, les capteurs passifs sont également utilisés depuis une trentaine d'années pour la détection des métaux et des contaminants organiques hydrophobes dans le milieu aquatique [1, 2]. Les premiers systèmes passifs adaptés aux composés organiques hydrophiles ne sont apparus qu'il y a une dizaine d'années. L'Eawag

et le Centre Ecotox de l'Eawag et de l'EPF de Lausanne ont déjà travaillé sur les échantillonneurs passifs dans plusieurs projets. Deux exemples d'application montrent bien tout l'intérêt de cette approche.

Découverte de l'origine des PCB dans la Birse

La nouvelle fit l'effet d'une bombe lorsqu'en 2008, une forte contamination aux PCB (polychlorobiphényles) fut constatée dans une partie des poissons de la Birse jurassienne [3]. Les autorités cantonales recommandèrent aux pêcheurs de limiter leur consommation et interdirent même la pêche dans les tronçons les plus touchés. Mais l'étude des poissons ne permettait pas d'identifier les causes de la pollution. A l'initiative de l'Office jurassien de l'environnement et sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement, un projet de recherche regroupant le département de Chimie de l'environnement de l'Eawag, le département de Chimie analytique de l'Empa et les cantons de Berne, de Bâle-Campagne et du Jura a été lancé pour évaluer les possibilités d'utilisation des capteurs passifs pour localiser les rejets. En effet, ces systèmes semblaient particulièrement appropriés car, comme les poissons, ils ont la particularité d'accumuler les PCB au cours du temps. Forts de notre expérience, nous avons opté pour une phase d'accumulation composée d'un polymère de polydiméthylsiloxane (silicone) [2].

Dix bandes de silicone ont été réparties dans la Birse sur une distance d'environ 60 km. Au bout de quelques semaines d'exposition, nous avons extrait les PCB retenus sur les polymères et retracé l'évolution spatiale de la contamination de la rivière. Les analyses ont très nettement indiqué l'emplacement des rejets polluants (Fig. 1). Une deuxième campagne de mesures a ensuite permis d'identifier la source des polluants, un site industriel voisin. Le canton du Jura a alors très rapidement engagé des mesures d'assainissement pour stopper les émissions. Les contrôles effectués depuis ont montré que les teneurs en PCB avaient considérablement baissé et que

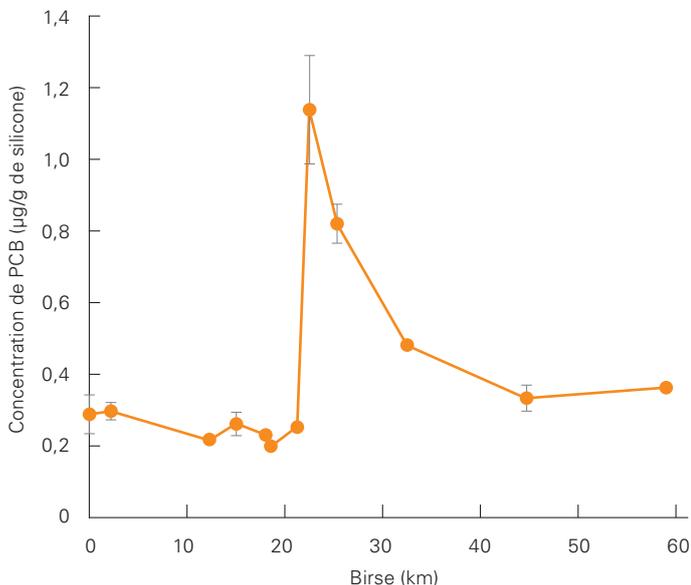


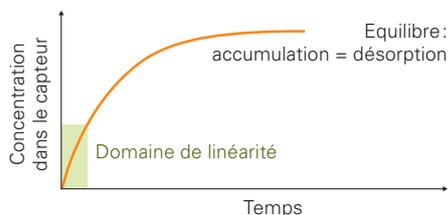
Fig. 1 : Concentrations de PCB mesurées à partir de capteurs passifs placés à intervalles réguliers dans la Birse. Le point de déversement des polluants peut être localisé avec exactitude. Les concentrations sont exprimées en équivalents toxiques (WHO-TEQ).

Les échantillonneurs passifs

Le prélèvement passif est basé sur le flux libre et non contraint des polluants du milieu échantillonné (l'eau, par exemple) vers la phase réceptrice du capteur sous l'effet d'une différence de potentiel de diffusion entre les deux milieux. Les composés sont retenus à la surface du capteur où d'autres processus de diffusion et de sorption se produisent. Selon la nature du polluant visé, la phase accumulatrice peut être composée d'un lipide, d'un solvant ou encore d'un polymère.

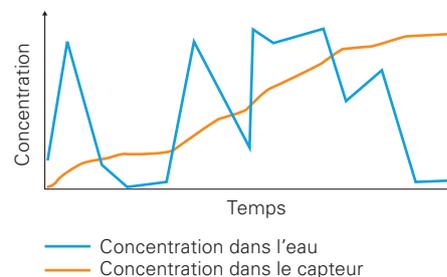
Le taux de diffusion du milieu échantillonné vers le capteur est proportionnel à la différence de potentiel entre les deux phases. Si cette différence est suffisante, les composés peuvent s'accumuler en continu. Dans sa phase initiale, la cinétique d'accumulation est linéaire et le taux d'échantillonnage est alors constant. Pour pouvoir réaliser un bon prélèvement passif intégratif, c'est-à-dire obtenir une concentration moyenne pondérée dans le temps, il est primordial que la durée d'exposition se situe dans cette phase de linéarité et reste très éloignée de la situation d'équilibre (figure du haut). Les différences de concentration dans l'eau se manifestent pas une accumulation plus ou moins forte dans le capteur et apparaissent sous la forme de différences de pente sur le graphique. L'échantillonnage passif intègre donc toutes les variations de concentration qui surviennent dans le cours d'eau pendant la durée d'exposition (figure du milieu).

Parmi les échantillonneurs utilisables pour les contaminants organiques, les systèmes de type Chemcatcher et POCIS (Polar Organic Chemical Integrative Sampler) sont particulièrement répandus. Ils sont constitués d'une phase accumulatrice solide recouverte d'une membrane encapsulée dans un dispositif qui peut être ensuite placé dans le cours d'eau pour la durée du prélèvement (figure du bas). Après quelques semaines d'exposition, le capteur est démonté et les substances séquestrées sont extraites puis analysées.



Cinétique d'accumulation des substances dans un échantillonneur passif à concentration environnementale constante. La concentration dans le capteur augmente jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint entre les phénomènes d'accumulation et de désorption.

Etant donné que le taux d'accumulation des molécules dans le capteur est constant en conditions stables pendant la phase de linéarité, la quantité de polluants séquestrés augmente plus ou moins fortement en fonction de la concentration dans le milieu aquatique.



Différents types d'échantillonneurs passifs. a) Bandes de silicone (captage des polychlorobiphényles), b) Système POCIS, c) Chemcatcher (captage des composés organiques hydrophiles).



Regula Haag, Etienne Vermeirissen

les mesures avaient été efficaces. Cette réussite a fait des émules et les capteurs en silicone sont aujourd'hui utilisés dans la Sarine, l'Aar et le bassin rhodanien pour surveiller la pollution aux PCB.

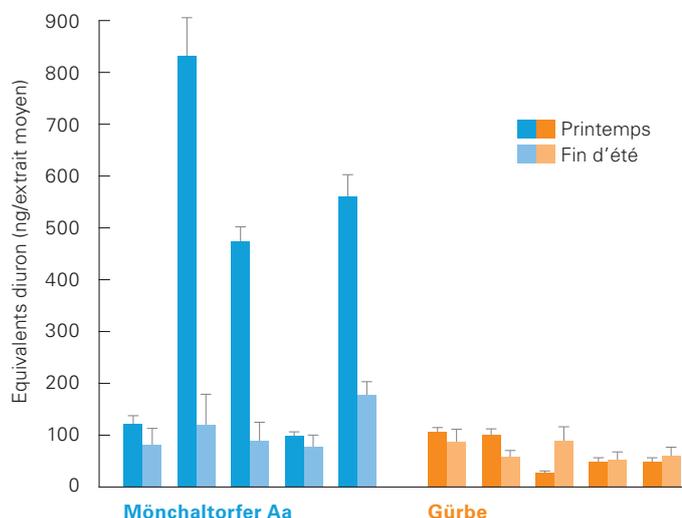
Une combinaison réussie avec les bioessais

L'échantillonnage passif a également été utilisé dans le projet « Gestion intégrée de la qualité de l'eau de rivière » (projet iWaQa) impliquant plusieurs départements de recherche de l'Eawag (www.eawag.ch/iwaqa). Ce projet fait partie du programme national de recherche 61 « Gestion durable de l'eau » et a pour objectif de caractériser l'état de la Mönchaltorfer Aa (ZH) et de la Gürbe (BE) sous leurs aspects les plus divers afin d'évaluer et de minimiser l'impact des activités humaines et des modes d'occupation du sol sur l'état écologique des cours d'eau. L'effet à long terme des différentes formes de gestion est finalement simulé par un modèle

mathématique. Pour les prélèvements, l'échantillonnage passif a été choisi pour sa représentativité et pour sa capacité à accumuler des quantités de polluants suffisantes pour pouvoir combiner analyses chimiques et essais biologiques en une étude complète de la qualité de l'eau.

Les prélèvements ont été effectués dans les deux rivières à l'aide de Chemcatchers installés dans le courant pendant deux semaines et renfermant une membrane de téflon imprégnée d'une phase réceptrice solide (cf. encadré). Nous avons ensuite évalué la qualité de l'eau au Centre Ecotox à l'aide de trois biotests : un test sur algues vertes détectant les herbicides inhibiteurs de la photosynthèse, un test d'inhibition enzymatique détectant les insecticides interférant dans les neurotransmissions et un test avec des cellules de levure génétiquement modifiées détectant les œstrogènes.

Fig. 2: Concentrations d'herbicides mesurées sur cinq sites de la Mönchaltorfer Aa et de la Gürbe. Les valeurs indiquées sont exprimées en équivalents diuron et correspondent à la moyenne de six capteurs placés sur chaque site (extrait moyen). Un équivalent diuron correspond à la concentration de diuron qu'il faudrait utiliser dans le test algal pour obtenir le même effet biologique que celui provoqué par le mélange d'herbicides contenu dans l'échantillon.



Les résultats du test algal, par exemple, ont montré que les prélèvements passifs mettaient bien en évidence les variations spatiotemporelles de la qualité de l'eau. Ils rendaient ainsi bien compte des différences de contamination entre la Mönchaltorfer Aa et la Gürbe et de la variabilité au sein des bassins versants. Ainsi, certains tronçons du cours d'eau zurichois étaient beaucoup plus fortement pollués que tous ceux de la rivière bernoise. En même temps, une certaine dynamique temporelle pouvait être observée. Les extraits obtenus en mai renfermaient ainsi nettement plus d'herbicides que ceux collectés en fin d'été (Fig. 2). Ce pic printanier correspond bien aux premières applications de pesticides au début de la période de végétation. Ces résultats confirment ceux d'une étude antérieure menée sur des effluents d'épuration qui avait déjà démontré la qualité des capteurs passifs pour le suivi de la pollution par les pesticides [4].

Prise en compte des facteurs environnementaux

Même si l'échantillonnage passif a déjà livré des résultats très utiles en combinaison avec les analyses chimiques ou biologiques, il doit encore être optimisé sur certains points. Ainsi, la vitesse d'accumulation sur la phase réceptrice n'est pas la même pour toutes les molécules. De ce fait, la toxicité de mélanges de polluants se fixant rapidement sur le substrat a tendance à être sous-estimée par rapport à celles de solutions plus lentes.

Les processus de diffusion qui sont à l'origine du piégeage des polluants dans les dispositifs sont influencés par les conditions environnementales comme la température ou la vitesse du courant et par les caractéristiques techniques des capteurs. Le rôle de la vitesse d'écoulement et de la présence d'une membrane limitant la diffusion a été étudié aux départements de Chimie de l'environnement et de Toxicologie environnementale de l'Eawag. Pour ce faire, nous avons construit un système modulaire de canaux expérimentaux dans lesquels nous avons pu ajouter des quantités connues

de polluants chimiques à de l'eau de rivière ou à des effluents d'épuration pour en étudier la fixation dans des capteurs passifs (Fig. 3). Nous avons constaté que les échantillonneurs passifs sans membranes limitatives comme les bandes de silicone ou les Chemcatchers sans membrane piégeaient davantage de polluants que les autres lorsque la vitesse d'écoulement était élevée. Ce phénomène s'explique par le fait que la distance de diffusion baisse à mesure que la vitesse du courant augmente en raison de processus hydrodynamiques. Ce type de résultats facilite l'interprétation et la normalisation des études de terrain.

La difficile détermination des concentrations

Pour déterminer les concentrations environnementales à partir de la masse de contaminants accumulée sur les échantillonneurs passifs, un étalonnage doit être effectué. Il peut être réalisé au laboratoire en exposant les capteurs pendant une durée déterminée à des solutions de concentration connue et en déterminant la cinétique d'accumulation à partir des quantités piégées. Mais cette calibration peut également être effectuée *in situ*. Pour ce faire, des échantillons d'eau sont prélevés à intervalles réguliers pendant une première campagne de mesures. La concentration moyenne dans l'eau peut ensuite être combinée à la quantité de substance fixée dans le capteur et à la durée d'exposition pour calculer un taux d'échantillonnage. Ainsi, si la concentration moyenne dans l'eau est de 5 ng/l et que le capteur fixe 50 ng de substance en 10 jours, le taux de prélèvement est de 1 litre par jour. Lors des utilisations suivantes, la concentration dans le milieu pourra être estimée à partir de la quantité de substance retenue en un temps donné et du taux d'échantillonnage [5].

Cette méthode fonctionne très bien lorsque les conditions sur le terrain sont assez proches des conditions d'étalonnage. Dans la réalité, les paramètres environnementaux – comme le débit de la rivière – varient constamment et les résultats obtenus avec les

Fig. 3: Dans un dispositif modulaire de canaux expérimentaux, les chercheurs Junho Jeon et Étienne Vermeirssen étudient l'influence de la membrane et des paramètres environnementaux sur le taux d'échantillonnage des préleveurs passifs [6].



Stefan Kubi

capteurs passifs sont entachés d'une certaine incertitude même lorsque les taux d'échantillonnage sont connus. Avec les biotests, la détermination des concentrations environnementales s'avère impossible. Ils sont en effet généralement réalisés avec des mélanges de substances. Si leur composition n'est pas connue, aucun taux d'échantillonnage ne peut être calculé et la toxicité des échantillons ne peut être exprimée que sous la forme d'une réponse par préleveur et non par volume d'eau.

Optimisation et normalisation

Un important travail de recherche doit encore être fourni avant que les méthodes de prélèvement passif rendent réellement compte des concentrations environnementales [5]. Mais malgré leur manque de fidélité sur ce point, ces systèmes alternatifs ont prouvé leur qualité pour la mise en évidence des disparités géographiques de la pollution dans les cours d'eau et donc pour la détection des sources de contamination dans un bassin. Ils permettent par ailleurs de dégager les tendances évolutives et de décrypter les dynamiques temporelles de rejet sur de longues périodes. Les capteurs passifs livrent des échantillons plus pertinents que les prélèvements ponctuels pour un coût généralement faible et une demande d'entretien très modérée.

Ils ont d'autre part l'avantage de concentrer la pollution, donnant accès à de nouvelles possibilités d'analyse. Des substances présentes dans l'eau à des concentrations inférieures aux limites de quantification deviennent alors détectables (comme les PCB dans la Birse) et les échantillons se prêtent enfin à la réalisation simultanée de plusieurs types de biotests comme dans l'étude comparative de la Mönchaltorfer Aa et de la Gürbe. Dans le cadre du réseau NORMAN, un réseau international de laboratoires de référence dont font partie l'Eawag et le Centre Ecotox, les méthodes d'échantillonnage passif font actuellement l'objet d'un important programme d'essais d'intercomparaison afin d'être optimisées et normalisées.

etienne.vermeirssen@oekotoxzentrum.ch

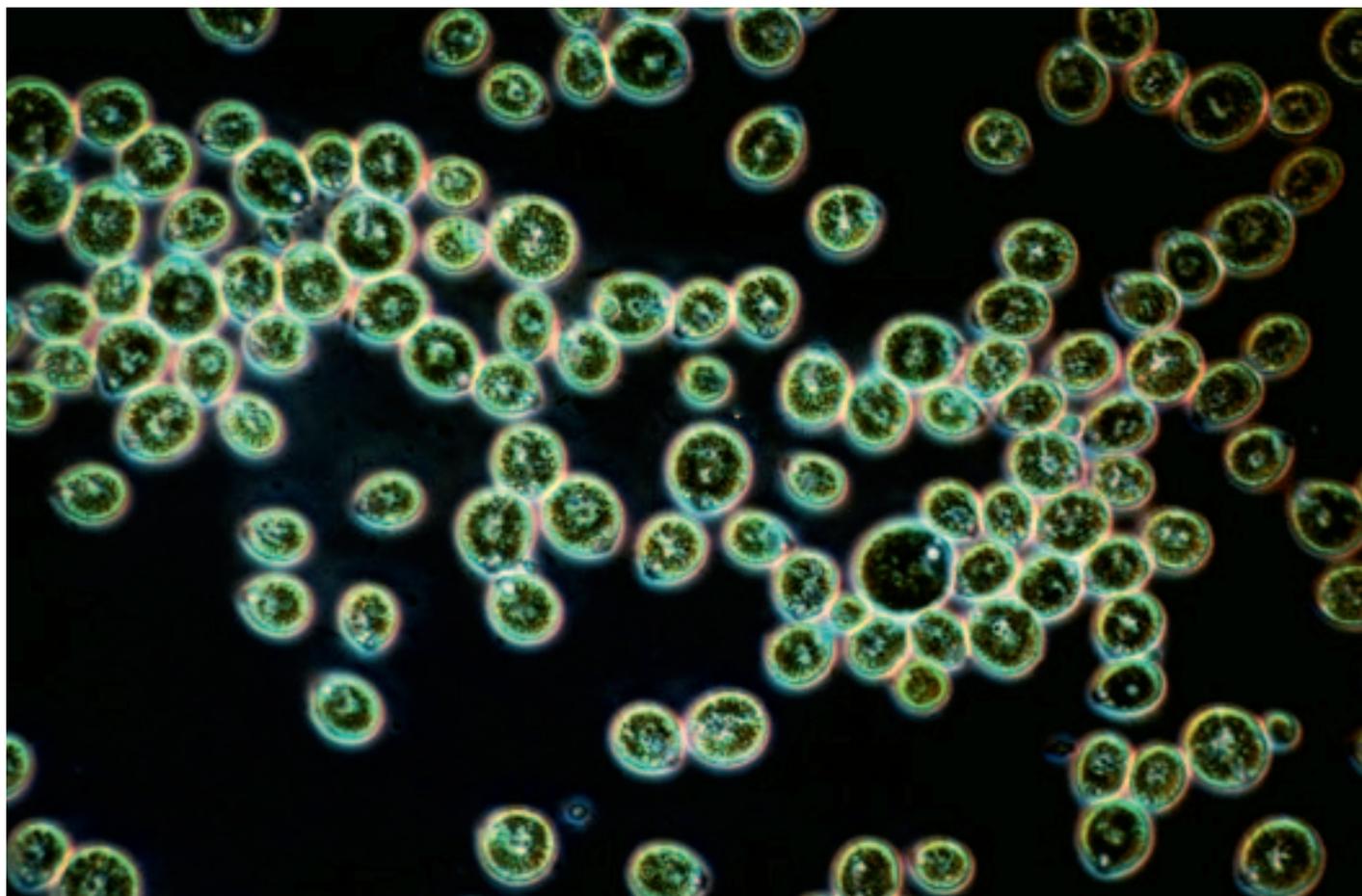
- [1] Meylan S., Odzak N., Behra R., Sigg L. (2004): Speciation of copper and zinc in natural freshwater – Comparison of voltammetric measurements, diffusive gradients in thin films (DGT) and chemical equilibrium models. *Analytica Chimica Acta* 510 (1), 91–100.
- [2] Kwon J.-H., Wüthrich T., Mayer P., Escher B. I. (2007): Dynamic permeation method to determine partition coefficients of highly hydrophobic chemicals between poly(dimethylsiloxane) and water. *Analytical Chemistry* 79 (17), 6816–6822.
- [3] Schmid P., Zenegg M., Holm P., Pietsch C., Brüscheweiler B., Kuchen A., Staub E., Tremp J. (2010): Polychlorobiphényles (PCB) dans les eaux en Suisse. Données concernant la contamination des poissons et des eaux par les PCB et les dioxines: évaluation de la situation. Série Connaissance de l'environnement n° 1002, Office fédéral de l'environnement.
- [4] Vermeirssen E.L.M., Hollender J., Bramaz N., van der Voet J., Escher B.I. (2010): Linking toxicity in algal and bacterial assays with chemical analysis in passive samplers deployed in 21 treated sewage effluents. *Environmental Toxicology and Chemistry* 29 (11), 2575–2582.
- [5] Harman C., Allan I.J., Vermeirssen E.L.M. (2012): Calibration and use of the polar organic chemical integrative sampler – A critical review. *Environmental Toxicology and Chemistry* 31 (12), 2724–2738.
- [6] Vermeirssen E.L.M., Dietschweiler C., Escher B.I., van der Voet J., Hollender J. (2012): Transfer kinetics of polar organic compounds over polyethersulfone membranes in the passive samplers POCIS and Chemcatcher. *Environmental Science and Technology* 46 (12), 6759–6766.

L'argent, perturbateur intracellulaire

L'évaluation de l'effet des polluants sur les êtres vivants est d'autant plus difficile qu'ils sont présents en petites quantités. Alors que les approches classiques s'avèrent souvent trop limitées, les méthodes dites omiques offrent des perspectives intéressantes en intervenant à l'échelle moléculaire. Elles ont ainsi révélé qu'une contamination du milieu par de l'argent modifiait l'activité génétique et le profil protéique des algues vertes.



Smitha Pillai est écotoxicologue et étudie les effets des polluants chimiques sur le système génétique et protéique des êtres vivants.



Les ions d'argent interfèrent avec le métabolisme cellulaire de *Chlamydomonas reinhardtii* et perturbent notamment la photosynthèse de l'algue verte.

On estime qu'au niveau mondial, 13 420 tonnes d'argent ont été rejetées dans la nature en 1997. Près de 400 tonnes ont été directement déversées dans le milieu aquatique avec les effluents domestiques et industriels [1]. Comme la plupart des métaux lourds, l'argent est toxique et, particulièrement stable, il s'accumule dans les tissus et la chaîne alimentaire [2]. Depuis quelques années,

ce métal est également présent sous la forme de nanoparticules qui, en raison de leurs propriétés antibactériennes, sont de plus en plus employées dans les textiles, les détergents, les cosmétiques, les revêtements de façades et même dans certains produits agricoles [3]. D'après les spécialistes, les nanoparticules d'argent atteindraient aujourd'hui dans les eaux de surface suisses des

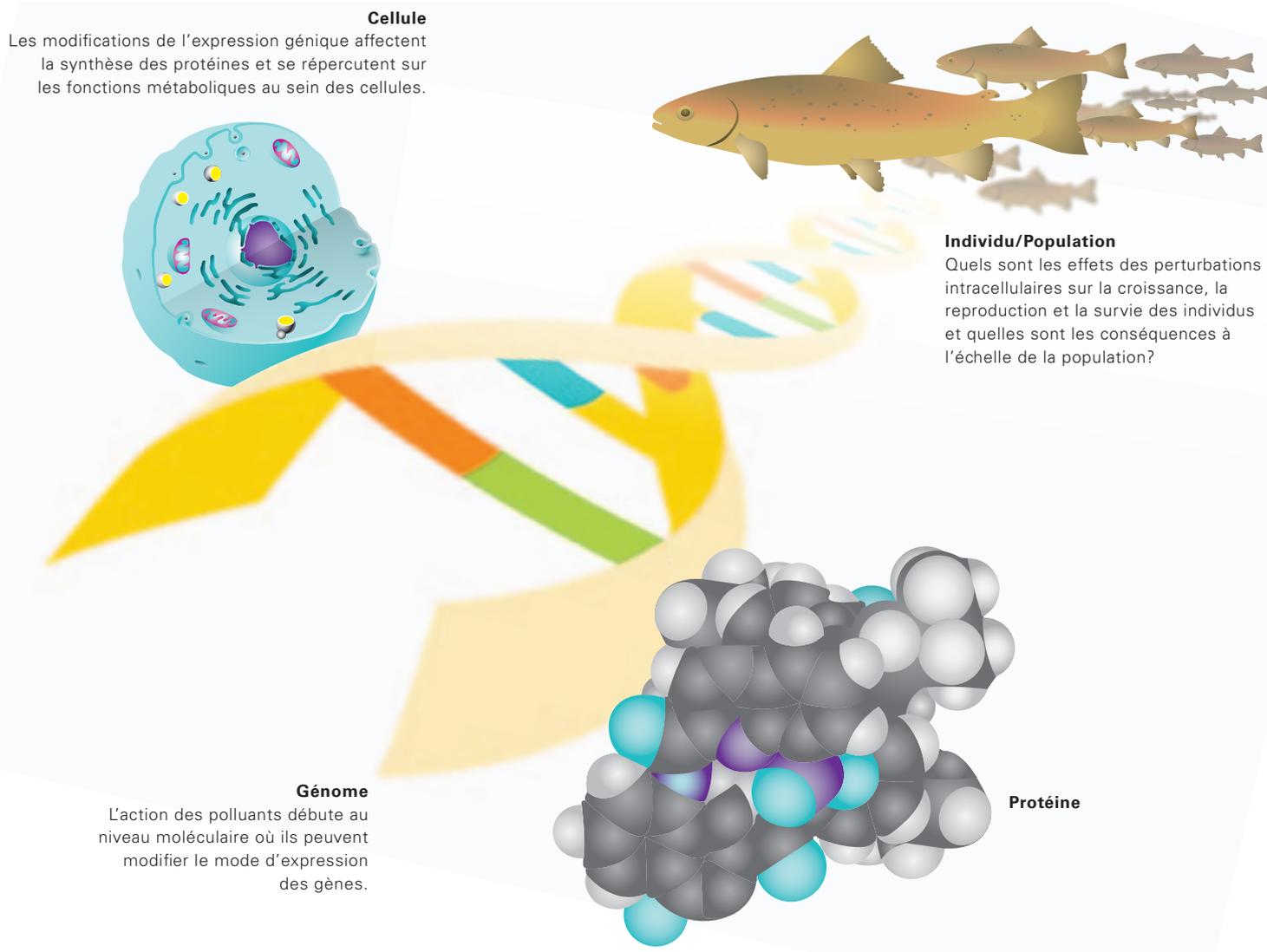


Fig. 1 : Les effets des polluants doivent être étudiés à tous les niveaux d'organisation biologique.

concentrations de l'ordre 30 à 80 nanogrammes par litre (ng/l) [4]. Plusieurs études montrent toutefois que les particules ne seraient pas toxiques en elles-mêmes mais que leur toxicité émanerait des ions d'argent qui s'en détachent [5]. Ces derniers représenteraient un réel danger pour la vie aquatique.

Dans les lacs et cours d'eau, les ions d'argent ne sont en général présents sous forme libre qu'à des concentrations particulièrement faibles de l'ordre de quelques ng/l. La majorité d'entre eux se lient en effet aux sulfates et aux chlorates pour former des complexes qui se déposent dans les sédiments ou se fixent aux particules en suspension. Toutefois, les ions libres s'avèrent toxiques pour certains organismes dès ces concentrations. Les algues vertes, par exemple, les absorbent très facilement et les emmagasinent dans leurs cellules. Et comme elles servent de nourriture à de nombreux autres êtres vivants, l'argent s'accumule le long de la chaîne alimentaire et peut finir par atteindre des concentrations problématiques pour les animaux supérieurs.

Observer tous les niveaux d'organisation biologique

Pour évaluer la dangerosité potentielle d'un polluant, la méthode traditionnelle consiste à étudier ses effets sur la reproduction, la

survie ou la croissance d'organismes modèles – généralement des levures, des algues ou des daphnies – dans le cadre d'essais standardisés. Cette approche permet de déterminer des seuils qui pourront être pris en compte dans la législation sur les produits chimiques [6]. Malheureusement, elle s'applique assez mal aux toxiques présents à très faible concentration. Dans ce cas-là, en effet, les perturbations ne se manifestent pas directement au niveau de la reproduction ou de la survie mais plus subtilement au niveau cellulaire, voire moléculaire. Il semble alors indispensable d'étudier les effets de substances telles que les ions d'argent à tous les niveaux d'organisation biologique : molécule, cellule, organisme, population, écosystème (Fig. 1).

Lorsqu'un être vivant est exposé à un produit chimique, la première réaction se produit toujours au niveau des biomolécules qui composent les cellules. Si l'on souhaite savoir comment le composé agit sur l'organisme, il faut donc commencer par comprendre ce qui se produit au niveau moléculaire. Cette démarche permet aussi d'obtenir une évaluation écotoxicologique plus différenciée. Grâce aux progrès techniques réalisés ces dernières années dans le domaine de la biologie, de l'analyse et de la bioinformatique, la recherche est aujourd'hui capable d'étudier les effets à cette

échelle. Les méthodes dites omiques permettent d'observer les différences facettes du système biologique affecté pour obtenir une vision globale : la génomique s'intéresse à l'activité de la totalité des gènes de l'organisme (génome), la transcriptomique étudie toutes les molécules d'ARN synthétisées à partir du génome (ADN) pour produire les protéines (transcriptome), la protéomique observe l'ensemble des protéines (protéome) et la métabolomique se penche sur l'arsenal des produits métaboliques synthétisés (métabolome).

Etudier l'activité génétique dans sa totalité

Alors que chaque cellule de l'organisme présente le même génome, l'activité des gènes diffère de l'une à l'autre selon sa fonction physiologique mais aussi selon la nature des stimuli qu'elle reçoit – les agressions chimiques par exemple. L'activité d'un gène, appelée expression génique, indique l'intensité avec laquelle il est lu et transcrit en ARN. Le transcriptome livre une image instantanée de l'ensemble des gènes qui sont exprimés dans l'organisme à un moment donné et dans des conditions données [7]. Les puces d'ADN ou microarrays et les nouvelles méthodes de séquençage permettent de suivre l'évolution du transcriptome sous l'effet d'une exposition à un toxique (cf. encadré). Les modifications des patrons d'expression des gènes permettent alors d'identifier le mode d'action de ce dernier.

Les brins d'ARN issus de la transcription servent de base à la synthèse des protéines par la machinerie cellulaire. Le profil protéique ou protéome d'un organisme livre donc des informations sur la manière dont les substances toxiques interfèrent dans les processus biochimiques. Il peut être analysé à l'aide de la spectrométrie de masse couplée à la chromatographie en phase liquide (cf. encadré). Le même principe s'applique à l'étude du métabolome. Regroupant l'ensemble des métabolites et molécules de faible masse produits par l'organisme, ce dernier décrit plus précisément l'état physiologique que le transcriptome ou le protéome. Grâce aux méthodes omiques et aux outils classiques de l'écotoxicologie, il est aujourd'hui possible d'étudier les processus qui se déroulent à l'intérieur des cellules de manière quantitative et de les mettre en relation avec les facteurs extérieurs qui peuvent les influencer [8]. Appliquées à une modélisation des effets à l'échelle de la population, ces analyses livrent un nouvel outil performant d'évaluation du risque écotoxicologique.

Modification de l'expression génique

Entre autres applications, l'Eawag utilise les méthodes omiques pour étudier la toxicité de l'argent pour l'algue verte unicellulaire *Chlamydomonas reinhardtii*. Cet organisme photosynthétique phytoplanctonique est à la base de la chaîne alimentaire aquatique et

Transcriptomique

Isolation

La totalité de l'ARN messager (transcriptome) est isolée à partir des cellules de l'organisme.

ARN complémentaire

L'ARN est transcrit en séquences complémentaires (ARNc).

Marquage

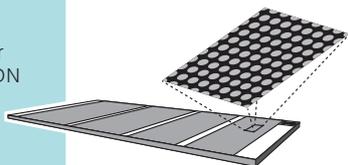
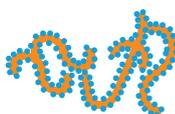
Les séquences d'ARNc sont marquées à l'aide d'un colorant fluorescent, le Cy3.

Hybridation

L'ARNc marqué est appliqué sur des microarrays renfermant l'ADN de la totalité du génome de l'organisme. Les fragments d'ARNc se lient aux séquences d'ADN correspondantes.

Détection

Le marquage fluorescent permet d'observer avec quelle intensité les séquences d'ADN sont lues et d'identifier les gènes exprimés et les fonctions concernées.



Protéomique

Extraction

La totalité des protéines de l'organisme sont isolées (protéome).

Fragmentation

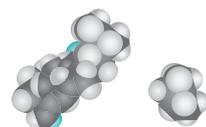
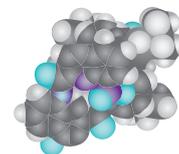
Les protéines sont fragmentées en leurs différents peptides à l'aide d'une enzyme, la trypsine.

Détermination de la masse des peptides

La masse des différents peptides est déterminée par spectrométrie selon la technique d'identification multidimensionnelle des protéines (MudPIT).

Identification

Les protéines présentes dans les cellules sont identifiées et quantifiées à l'aide des spectres de masse des peptides.



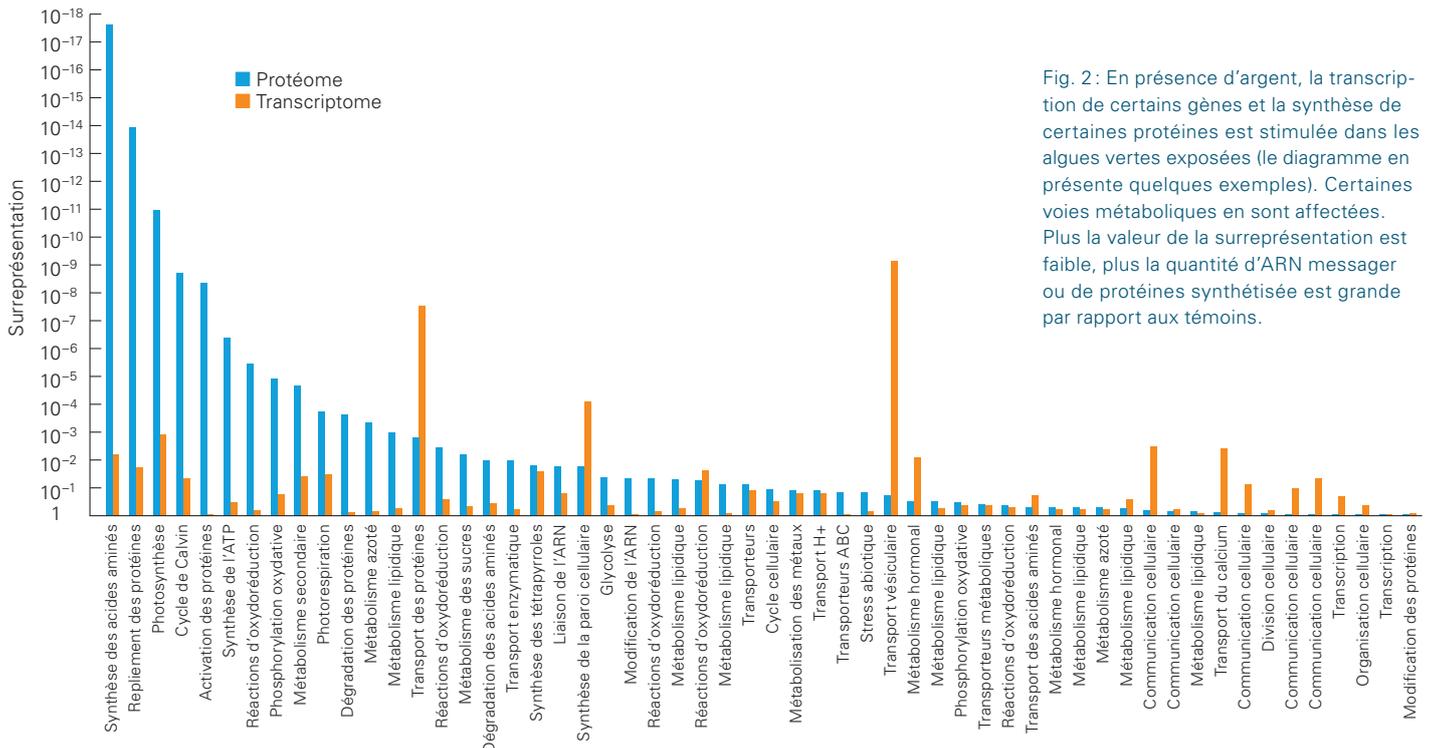


Fig. 2: En présence d'argent, la transcription de certains gènes et la synthèse de certaines protéines est stimulée dans les algues vertes exposées (le diagramme en présente quelques exemples). Certaines voies métaboliques en sont affectées. Plus la valeur de la surreprésentation est faible, plus la quantité d'ARN messager ou de protéines synthétisées est grande par rapport aux témoins.

constitue de ce fait un modèle de choix pour l'écotoxicologie. Par ailleurs, il est très facile à cultiver en laboratoire et son génome a été entièrement décrypté. Les ions d'argent dissous dans le milieu sont très rapidement absorbés par *Chlamydomonas reinhardtii* et s'accumulent dans les cellules. Ils peuvent alors s'avérer toxiques à partir de quelques nanogrammes par litre et venir perturber certaines fonctions métaboliques comme la croissance ou la photosynthèse. Les essais d'écotoxicité classiques permettent déjà de démontrer cette toxicité mais ils ne révèlent rien sur les mécanismes d'actions en jeu. Pour les élucider, nous avons étudié les modifications provoquées par les ions d'argent dans le transcriptome, le protéome et le métabolome de *Chlamydomonas reinhardtii*.

Dans une première série d'essais, nous avons exposé la chlorophycée à différentes concentrations d'argent et analysé le transcrip-

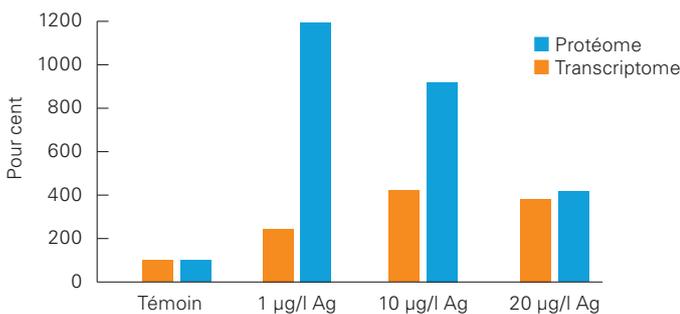


Fig. 3: En présence d'argent, les algues vertes produisent davantage de glutathione S-transférase, une protéine impliquée dans les mécanismes de défense contre le stress oxydatif. Les quantités de protéine (P) et d'ARN messager correspondant (T) sont accrues par rapport au témoin.

tome et le protéome à l'aide de microarrays et d'une technique particulière de spectrométrie de masse (stratégie MudPIT). Les quantités d'ARN messager produites dans les algues exposées étaient différentes des témoins pour plusieurs milliers de séquences transcrites. Cela signifie que l'expression des gènes correspondants avait été modifiée par les ions d'argent. Les effets étaient également visibles au niveau protéomique où près de 1000 protéines présentaient des niveaux anormaux. La plupart des transcrits et des peptides ont pu être mis en relation et reliés à une fonction spécifique dans l'organisme (Fig. 2). Les modifications transcriptomiques et protéomiques étaient observables à des niveaux de concentration d'argent équivalents à ceux pouvant être rencontrés dans la nature. Elles étaient toutefois nettement plus prononcées à des niveaux supérieurs.

Effets sur les fonctions métaboliques

Les modifications observables au niveau du transcriptome et du protéome s'accompagnaient d'une perturbation de plusieurs fonctions métaboliques – photosynthèse, biosynthèse pigmentaire, métabolisme énergétique et lipidique, biosynthèse des sucres et de l'amidon, etc. – se traduisant par une altération de l'état physiologique des cellules. Au niveau de la photosynthèse, les ions d'argent entraînent une perturbation du transfert des électrons et la formation d'espèces réactives de l'oxygène. A forte dose, ces dernières peuvent occasionner un stress oxydatif très nocif pour les lipides, les peptides et l'ADN auquel la cellule réagit en produisant des protéines antioxydantes devant neutraliser les composés réactifs. Une telle réaction de défense a été observée chez les algues unicellulaires en présence des ions d'argent, ce qui indique que ce métal provoque effectivement un stress oxydatif chez les sujets exposés (Fig. 3). Par ailleurs, une réduction du rendement de la photosynthèse et de la production d'ATP (l'unité d'échange énergétique des cellules) était observée à mesure que les concentrations d'argent augmentaient.

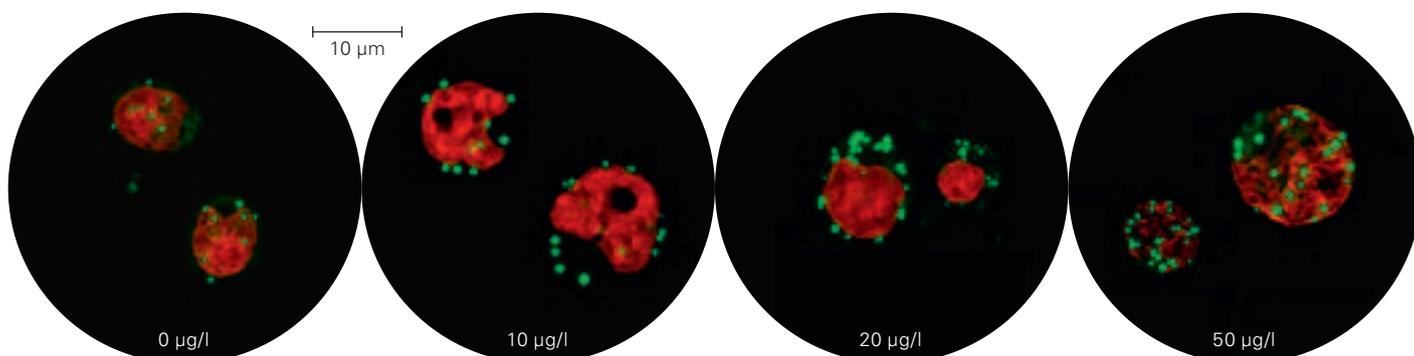


Fig. 4: Les cellules algales contiennent d'autant plus de liposomes (en vert) que les teneurs en argent dans le milieu sont élevées.

Une autre perturbation était enregistrée au niveau de la synthèse des liposomes. Ces organites cellulaires stockent les triacylglycérides, les précurseurs des acides lipidiques. D'après la littérature, les cellules réagissent souvent au stress en accroissant leur production de liposomes. Un phénomène semblable a été observé dans notre essai : les cellules algales en étaient d'autant plus riches que la concentration d'argent dans le milieu était élevée (Fig. 4). Parallèlement, des corrélations étaient également observées avec d'autres réactions au stress oxydatif. Par ailleurs, les ions d'argent n'altèrent pas uniquement les processus de transcription et de traduction mais peuvent aussi attaquer les protéines directement. Notamment lorsqu'elles renferment des atomes de cuivre dans leur groupe prosthétique, l'argent est susceptible de les désactiver. Cet effet supplémentaire peut alors à son tour transparaître au niveau du transcriptome et du protéome.

Détermination du mécanisme d'action

Les résultats des analyses transcriptomiques et protéiques et des observations physiologiques permettent, par déduction, de comprendre comment les ions d'argent agissent sur *Chlamydomonas reinhardtii*. Il semble ainsi que les ions métalliques pénètrent assez rapidement dans les cellules où ils agissent sur des protéines impliquées dans différents processus métaboliques et perturbent de ce fait diverses fonctions comme la photosynthèse ou la production d'ATP. Ces altérations provoquent un stress oxydatif qui agresse à son tour protéines et matériel génétique. Ces effets au niveau intracellulaire ont des répercussions à des niveaux supérieurs comme celui de l'organisme et de la population et se traduisent notamment par une baisse de croissance des cellules et des cultures algales.

Les méthodes omiques offrent donc une piste intéressante pour la détermination des modes d'action des polluants au niveau cellulaire et l'évaluation de leurs effets sur les processus métaboliques. En complément des critères habituels tels que la mortalité ou la crois-

sance, elles livrent par ailleurs de nouveaux paramètres, particulièrement sensibles, pour quantifier les effets biologiques. Dans le cas de *Chlamydomonas*, l'accumulation des liposomes pourrait remplir une telle fonction. Un atout supplémentaire pour l'évaluation du risque écotoxicologique.

smitha.pillai@eawag.ch

- [1] Eckelman M.J., Graedel T.E. (2007): Silver emissions and their environmental impacts: A multilevel assessment. *Environmental Science and Technology* 41 (17), 6283–6289.
- [2] O'Connor T.P. (1996): Trends in chemical concentrations in mussels and oysters collected along the US coast from 1986 to 1993. *Marine Environmental Research* 41 (2), 183–200.
- [3] Wijnhoven S.W.P. et al (2009): Nano-silver: A review of available data and knowledge gaps in human and environmental risk assessment. *Nanotoxicology* 3 (2), 109–138.
- [4] Müller N.C., Som C., Nowack B. (2009): Exposure modeling of engineered nanoparticles in the environment. *Nanotech Conference & Expo 2009, Technical Proceedings* 1, 159–162.
- [5] Piccapietra F., Allué C. G., Sigg L., Behra R. (2012): Intracellular silver accumulation in *Chlamydomonas reinhardtii* upon exposure to carbonate coated silver nanoparticles and silver nitrate. *Environmental Science and Technology* 46 (13), 7390–7397.
- [6] Kramer V.J. et al. (2011): Adverse outcome pathways and ecological risk assessment – Bridging to population-level effects. *Environmental Toxicology and Chemistry* 30 (1), 64–76.
- [7] Schirmer K., Fischer B.B., Madureira D.J., Pillai S. (2010): Transcriptomics in ecotoxicology. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 397 (3), 917–923.
- [8] Garcia-Reyero N., Perkins E.J. (2011): Systems biology – Leading the revolution in ecotoxicology. *Environmental Toxicology and Chemistry* 30 (2), 265–273.

Suivi automatique du plancton lacustre



Francesco Pomati est microbiologiste et dirige l'équipe Biodiversité du phytoplancton du département d'Ecologie aquatique de l'Eawag. Coauteur : Andri Bryner

Les algues ont, elles aussi, leur horloge biologique. En plus de dépendre de la profondeur, leur répartition en nombre et en espèces varie en fonction des heures du jour et des saisons. Un radeau de mesures de l'Eawag et de l'EPF de Zurich cofinancé par le Fonds national suisse livre aujourd'hui des données suffisamment précises pour permettre l'étude de cette dynamique et des processus qui la gouvernent.

Les écosystèmes dulçaquicoles présentent une biodiversité exceptionnelle. Mais ils font également partie des milieux naturels les plus menacés de la planète et présentent un des taux d'extinction les plus élevés [1].

Le phytoplancton: la base de la chaîne alimentaire

Le phytoplancton constitue la base du réseau trophique des lacs. Une modification de sa composition peut donc avoir des répercussions sur l'ensemble des être vivants de l'écosystème. On ignore encore, cependant, si l'abondance et la nature de ces organismes végétaux et bactériens en suspension dans l'eau sont le fruit d'une sélection aléatoire à partir du pool d'espèces présentes localement ou si elles sont déterminées par des mécanismes

particuliers. Le fait est que ces deux paramètres peuvent varier extrêmement rapidement. Les blooms algaux, dont certains sont très toxiques (cyanobactéries), peuvent ainsi apparaître en l'espace de quelques heures à la faveur de certains événements météorologiques. L'étude de l'évolution spatio-temporelle du phytoplancton et de son environnement est donc fondamentale pour la recherche sur les écosystèmes lacustres. Elle se heurte toutefois à un manque de données différenciées.

Les programmes habituels de surveillance du plancton s'appuient généralement sur des prélèvements effectués mensuellement, au mieux hebdomadairement, à une profondeur et un endroit donnés dans le lac. « C'est comme si on étudiait l'évolution d'une forêt en



Le laboratoire de limnologie flottant sur le lac de Greifen.

jetant un coup d'œil tous les deux mille ans pour voir si quelque chose s'est produit entre-temps», commente Bas Ibeling de l'Institut F.-A. Forel de Genève qui participe au projet. Il est d'autre part devenu quasi impossible de trouver des lacs naturels non perturbés qui puissent servir de référence. Par ailleurs, la multitude de facteurs de stress pouvant agir simultanément sur les écosystèmes aquatiques rend leur étude et *a fortiori* leur gestion particulièrement difficile : les changements climatiques, l'eutrophisation et la pollution peuvent ainsi favoriser les blooms algaux isolément ou dans une action conjuguée.

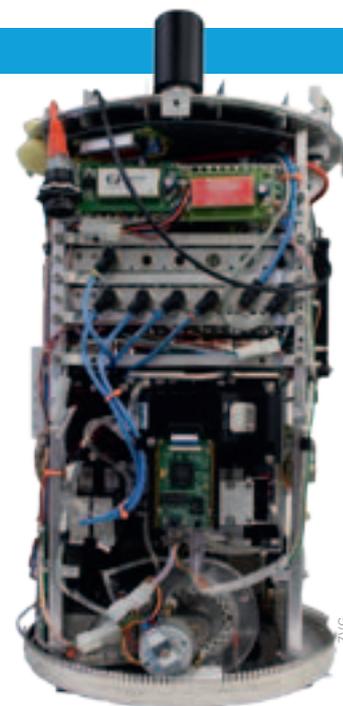
Un laboratoire flottant

Avec le soutien financier du Fonds national suisse, l'Eawag a créé et testé une plate-forme flottante capable

- ▶ d'analyser le phytoplancton de façon automatisée à différentes profondeurs et à intervalles de temps réguliers et rapprochés,
- ▶ de relier en continu les données de surveillance du plancton avec les paramètres physicochimiques du milieu et
- ▶ d'assurer, par radiocommunication mobile, une transmission des données en temps réel vers le laboratoire central où elles peuvent être exploitées pour modéliser et prédire la dynamique d'évolution du phytoplancton [2].

L'élément central de la plate-forme de mesure et d'observation est un cytomètre en flux de type Cytobuoy du fabricant hollandais du même nom adapté aux besoins particuliers de l'étude. Cet appareil est en mesure d'analyser les organismes de 1 à 700 micromètres de diamètre et de longueur inférieure à 1 millimètre ; il est donc capable d'appréhender aussi bien les cellules minuscules du picoplancton que les grandes cyanobactéries. Deux faisceaux laser parcourent la

Le cytomètre en flux Cytobuoy mesure 54 caractéristiques des particules planctoniques.



surface des particules à partir d'angles différents en utilisant différentes longueurs d'onde, ce qui permet de définir leur forme et leurs dimensions. D'autre part, les pigments photosynthétiques peuvent être identifiés à partir de la longueur d'onde des signaux fluorescents qu'ils émettent sous l'impact des rayons laser : chlorophylle a, phycocyanine, phycoérythrine ou pigments dégradés. L'appareillage permet ainsi d'obtenir pour chaque particule 54 données descriptives qui permettent de déterminer le groupe fonctionnel auquel elle appartient. Cette approche automatisée n'a pas la précision d'une étude taxonomique systématique au microscope mais elle livre une description assez fidèle de la diversité des communautés de phytoplancton en évolution dynamique. D'autre part, la qualité de la détermination au microscope dépend fortement de la personne qui la réalise et livre donc des résultats peu reproductibles. A l'inverse, l'analyse répétée d'un même échantillon avec notre système livre des résultats comparables.



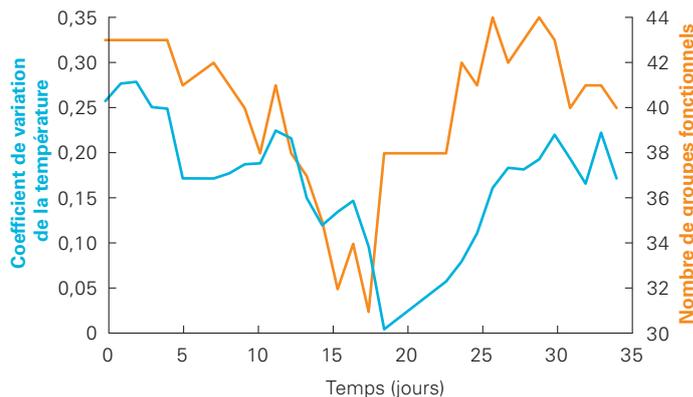
Laboratoire cantonal zurichois, René Schlittli

Développement massif de cyanophycées dans le lac de Greifen (août 2011).

Le retour des interdictions de baignade ?

Contrairement à l'Union européenne et à de nombreux pays comme l'Australie, la Suisse ne dispose pas de seuil de concentration pour les toxines algales dans les eaux de baignade. Lors du développement massif de l'algue bleue *Microcystis aeruginosa* au lac de Greifen en 2011, les chercheurs de l'Eawag et de l'université de Zurich sont intervenus avec le service des eaux du canton de Zurich (AWEL) pour évaluer la gravité de la situation. Fort heureusement, la souche algale responsable du bloom n'a pas produit de microcystine, la principale toxine des cyanobactéries. Mais les densités cellulaires atteintes – plus de 100 000 cellules par millilitre – ont suffi à rendre la situation préoccupante. A de telles concentrations, des réactions allergiques et des diarrhées peuvent se manifester chez les enfants et les personnes sensibles ou même chez les chiens ayant absorbé de l'eau même en l'absence de toxines. Grâce aux progrès réalisés dans la lutte contre la pollution des eaux, les blooms algaux se sont raréfiés dans les lacs suisses depuis les années 1970. Se pourrait-il qu'ils connaissent désormais une recrudescence à la faveur du réchauffement climatique ? La plate-forme flottante pourra, espérons-le, apporter des réponses à ce type de questions [4]. Et que se passerait-il si les nouvelles conditions environnementales favorisaient le développement d'algues beaucoup plus toxiques comme *Cylindrospermopsis raciborskii* encore inconnue en Suisse mais déjà répandue chez nos voisins d'Europe de l'Est [5] ? Encore une raison d'intensifier la surveillance automatisée des eaux lacustres.

Fig. 2 : Evolution de la diversité du phytoplancton dans le lac de Lugano pendant la période de mesures, de fin avril à fin mai 2010 (ligne orange). La ligne bleue indique l'évolution du coefficient de variation de la température dans la colonne d'eau (de 0 à 12 m de profondeur) : plus sa valeur est élevée, plus le lac est stratifié. Un coefficient nul indique un brassage total des eaux du lac.



Couplage avec une sonde multiparamètres

Le cytomètre en flux est couplé à une sonde multiparamètres Ocean Seven du fabricant italien Idronaut qui, grâce à un capteur de pression, permet le prélèvement d'échantillons à des profondeurs définies. En plus de commander la prise d'échantillons, l'Idronaut mesure en continu de nombreux paramètres tels que la température, la conductivité de l'eau, le pH, la teneur en oxygène et la concentration en nitrates. La sonde est d'autre part équipée d'un fluorimètre Trilux qui permet de mesurer les niveaux de chlorophylle a, de phycocyanine et de phycoérythrine et donc de contrôler la plausibilité des résultats de la cytométrie en flux.

La plate-forme flottante est un projet commun de l'Eawag et de l'Institut de biologie intégrative de l'EPF de Zurich. Pour que les cellules de plancton ne soient pas endommagées lors du pompage des échantillons, le dispositif a été optimisé dans les ateliers de l'Eawag : il a été doté d'un conduit de prélèvement recouvert d'un film antimicrobien et d'une cellule de plexiglas intercalée avant la pompe, à partir de laquelle le cytomètre est alimenté.

Etude des cycles nycthémeraux

La plate-forme a été inaugurée en 2010 et testée pendant la période estivale dans une zone calme du lac de Lugano entre Laveno et

Figino. Les données collectées montrent pour la première fois avec une telle exactitude en eau douce que la répartition du phytoplancton varie selon un cycle nycthémeral (Fig. 1).

Etant donné que les paramètres physiques du milieu comme la température présentaient peu de variations entre le jour et la nuit, nous supposons que les variations journalières du phytoplancton étaient davantage liées à des facteurs biologiques qu'environnementaux. La régularité et la constance du rythme nycthémeral révélé par les données de haute résolution dans ce lac – et ultérieurement dans d'autres écosystèmes lacustres – étayent cette hypothèse. Il semble donc que le phytoplancton possède sa propre horloge biologique et les recherches seront poursuivies pour caractériser ce biorythme plus en détail.

Une régénération rapide après le brassage du lac

Alors que le lac de Lugano était fortement stratifié au début des mesures, un brassage des eaux s'est produit au cours des premières semaines suite à une tempête et à une chute brutale des températures. Les données planctoniques de la plate-forme de mesures reflètent cette évolution : le nombre de groupes fonctionnels, qui était élevé au début de l'étude, a progressivement chuté jusqu'à l'achèvement du brassage complet des eaux du lac (coefficient de

La modélisation ouvre la voie aux prévisions

A quels facteurs environnementaux la dynamique des populations de plancton obéit-elle ? [3] Etant donné le nombre incalculable de données livrées par la plate-forme de mesures automatiques, la modélisation numérique s'avère être la solution privilégiée pour répondre à cette question et tenter une prédiction des phénomènes. Nous avons développé pour cela un logiciel basé sur un modèle de régression linéaire multiple. Les principales grandeurs d'entrée sont la température de l'eau et celle de l'air, la conductivité et l'hétérogénéité du milieu physique dans la colonne d'eau (coefficient de variation). Le modèle décrit déjà fidèlement les dynamiques planctoniques observées dans le lac. Il semble ainsi que la communauté de phytoplancton réagisse aux modifications des conditions environnementales avec un décalage de 24 à 48 heures.

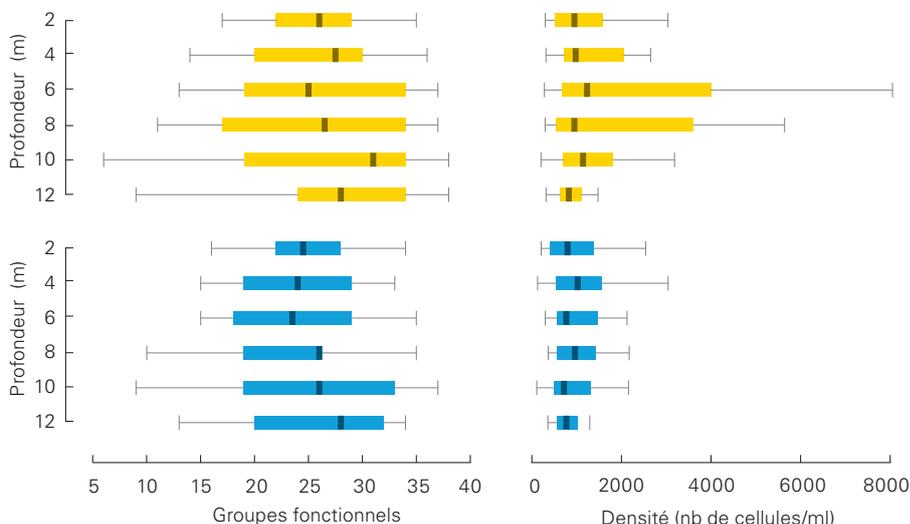


Fig. 1 : La diversité (nombre de groupes fonctionnels identifiés) et la distribution du plancton en fonction de la profondeur se modifient fortement entre la journée (en jaune ; 15 h) et la nuit (en bleu ; 3 h).

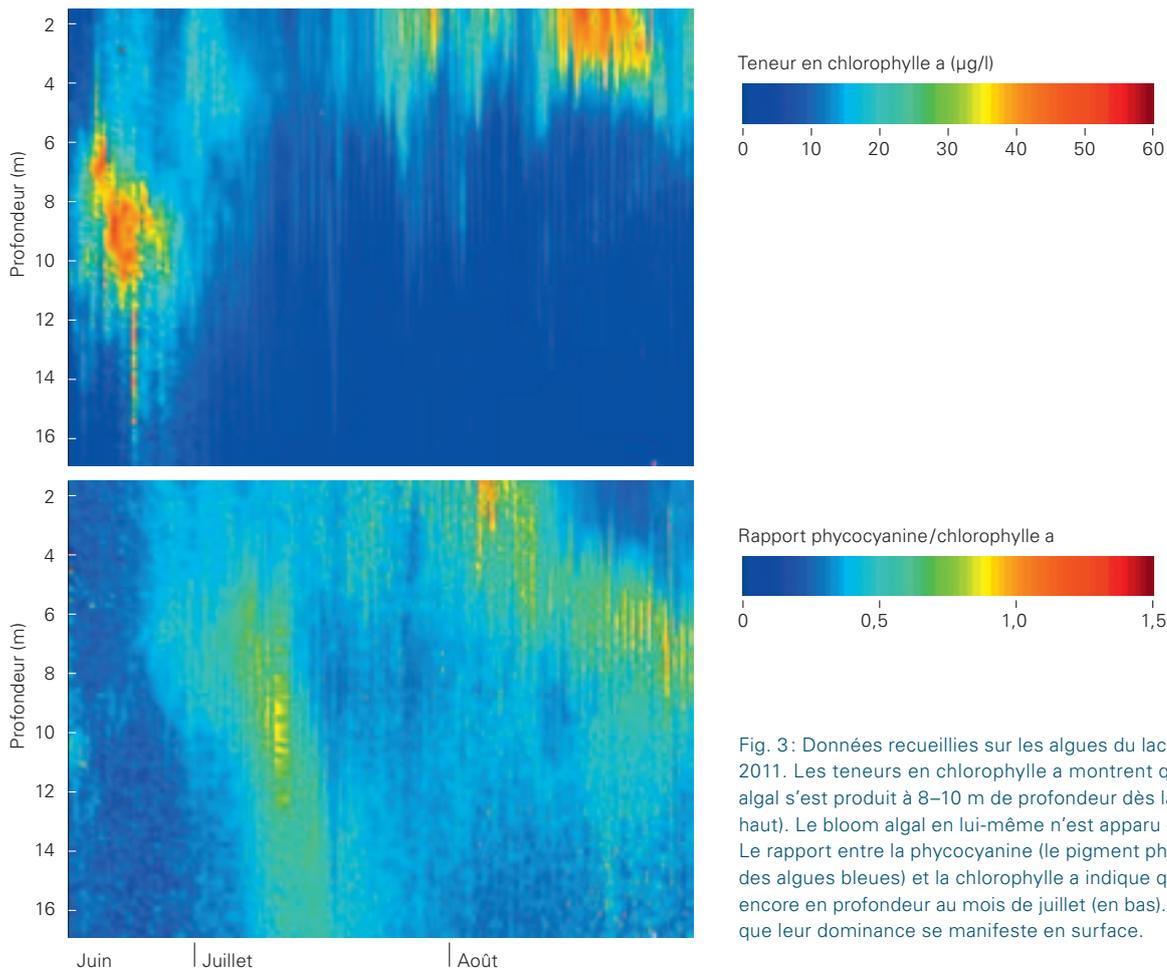


Fig. 3: Données recueillies sur les algues du lac de Greifen pendant l'été 2011. Les teneurs en chlorophylle a montrent qu'un fort développement algal s'est produit à 8–10 m de profondeur dès la fin du mois de juin (en haut). Le bloom algal en lui-même n'est apparu qu'au milieu du mois d'août. Le rapport entre la phycocyanine (le pigment photosynthétique spécifique des algues bleues) et la chlorophylle a indique que les cyanophycées étaient encore en profondeur au mois de juillet (en bas). Ce n'est qu'au mois d'août que leur dominance se manifeste en surface.

variation des températures nul). Fait intéressant, le plancton semble s'être ensuite totalement régénéré en l'espace de quelques jours (Fig. 2). Les mécanismes présidant à cette dynamique n'ont pas encore été caractérisés.

Un bloom de cyanophycées au lac de Greifen

Depuis le printemps 2011, la plate-forme de mesures évolue dans la partie septentrionale du lac de Greifen avec l'aimable autorisation des autorités cantonales zurichoises. Ce lac a déjà fait l'objet de nombreuses études et la grande quantité de données recueillies par l'Eawag et les services cantonaux a déjà permis de mieux comprendre l'écosystème. Les mesures du radeau sont venues ajouter une nouvelle pièce au puzzle et un événement particulier y a fortement contribué. Au désespoir des baigneurs mais pour le plus grand bonheur des scientifiques, un bloom algal de cyanophycées s'est produit juste au moment de notre première campagne de mesures (cf. encadré « Le retour des interdictions de baignade? »). La présence de la plate-forme sur le site a permis de documenter ce phénomène avec une précision sans précédent et, même si toutes les données n'ont pas encore été exploitées, son évolution au cours de l'été a pu être reconstituée. La figure 3 montre que les algues bleues s'étaient déjà fortement développées en profondeur au mois de juin et avaient commencé à dominer près de la surface vers la fin du mois de juillet. A ce moment-là l'espèce présente était *Microcystis aeruginosa*. Une période de vent et de refroidissement survenue début août a ensuite dispersé le plancton et ramené les cyanobactéries plus en profondeur. Mais peu de temps après, l'arrêt soudain de ce brassage a à nouveau favorisé leur développement en surface jusqu'à ce que le bloom finisse par apparaître mi-août. La forte intensité lumineuse au sommet de la colonne d'eau a probablement

provoqué un arrêt de la production de phycocyanine chez les algues bleues, ce qui explique qu'elles ne soient pas visibles dans la partie inférieure de la figure 3. La forte production de bulles de gaz qui facilite la remontée des algues vers la surface est, de son côté, probablement responsable de la formation de mousse observée pendant la même période sur le lac de Greifen. Une partie de la population a ensuite progressivement regagné la profondeur de prédilection des cyanophycées, à environ six à huit mètres sous la surface.

francesco.pomati@eawag.ch

- [1] Vörösmarty C.J., McIntyre P.B., Gessner M.O. et al. (2010): Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* 467 (7315), 555.
- [2] Pomati F., Jokela J., Simona M., Veronesi M., Ibelings B.W. (2011): An automated platform for phytoplankton ecology and aquatic ecosystem monitoring. *Environmental Science and Technology* 45 (22), 9658–9665.
- [3] Pomati F., Matthews B. (2012): Reversal in the relationship between species richness and turnover in a phytoplankton community. *Ecology*, 93 (11), 2435–2447.
- [4] Pomati F., Matthews B., Jokela J., Schildknecht A., Ibelings B.W. (2011): Effects of re-oligotrophication and climate warming on plankton richness and community stability in a deep mesotrophic lake. *Oikos* 121 (8), 1317–1327.
- [5] Pomati F., Neilan B.A., Suzuki T., Manarolla G., Rossetti C. (2003): Enhancement of intracellular saxitoxin accumulation by lidocaine hydrochloride in the cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii* T3 (Nostocales). *Journal of Phycology* 39 (3), 535–542.

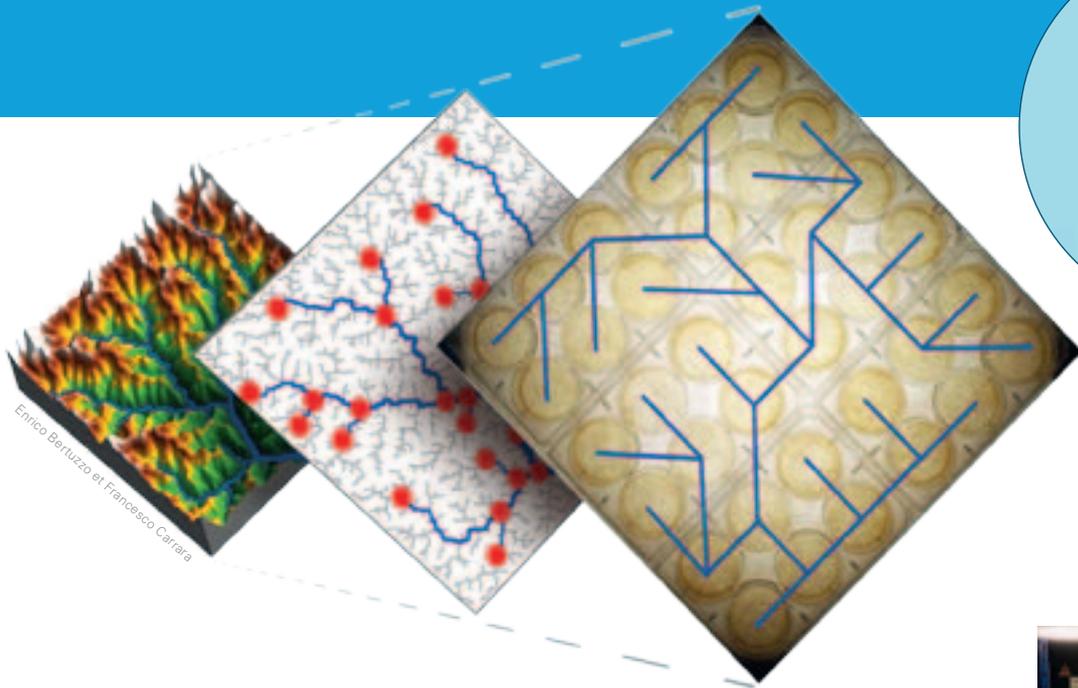


Florian Altermatt est biologiste et étudie la distribution spatiale des espèces et les relations interspécifiques au sein du département d'Ecologie aquatique de l'Eawag.

Biodiversité : les connexions font la différence

Les cours d'eau présentent une forte diversité biologique généralement caractérisée par une richesse spécifique plus élevée en aval et une variété de communautés maximale en amont. De nouveaux essais montrent qu'une telle répartition géographique peut être obtenue au laboratoire en recréant les échanges qui s'effectuent au sein des réseaux hydrographiques ramifiés. La connectivité des milieux et la structure des réseaux semblent donc décisives pour la préservation de la biodiversité.





Enrico Bertuzzo et Francesco Carrara

Fig. 1 : Construction d'un réseau de laboratoire à partir d'une modélisation du paysage. La structure d'un réseau hydrographique naturel est extraite d'un paysage modélisé puis projetée sous forme simplifiée sur notre système de microcosmes. La dispersion des organismes entre les milieux locaux s'effectue le long du réseau schématisé projeté.



Regula Illi et Florian Altermatt

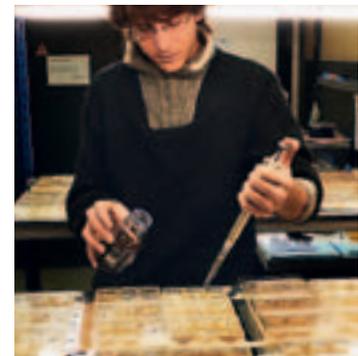
Les organismes utilisés dans l'étude sont des protistes et des rotifères appartenant notamment à l'espèce *Euglena gracilis* et aux genres *Colpidium*, *Blepharisma* et *Cephalodella*. Leur taille est de 20 à 100 microns.

De quels facteurs dépendent le nombre et la nature des espèces qui peuplent un espace donné? Cette question ne relève pas du simple intérêt scientifique mais revêt une importance capitale pour la protection et la gestion des écosystèmes naturels. A grande échelle, les variations géographiques de la biodiversité sont réparties selon différents systèmes ou « patrons ». Leur observation a donné lieu à différentes théories concernant les règles d'assemblage des communautés biotiques. On a par exemple constaté que les grandes îles abritaient davantage d'espèces que les petites. En 1967, les biologistes américains Robert MacArthur et Edward Wilson donnèrent à ce phénomène général de biogéographie l'explication suivante: la colonisation d'une île par de nouvelles espèces et la disparition des espèces sur cette île sont en équilibre dynamique. Le taux d'extinction est d'autant plus faible que l'île est étendue et le taux de colonisation d'autant plus élevé que la taille de l'île et la proximité du continent sont importantes. Il en découle que les grandes îles proches du continent abritent davantage d'espèces que les îlots éloignés [1]. Cette théorie trouve des applications dans la pratique, notamment dans la détermination de la taille minimale des réserves naturelles.

Dispersion des espèces le long des voies d'eau

Les cours d'eau font partie des milieux naturels les plus riches en biodiversité de la planète [2]. Cette richesse est cependant menacée par de multiples facteurs comme la dégradation et la fragmentation des habitats, les invasions biologiques et la pollution. Pour pouvoir la protéger efficacement, il est donc urgent de mieux connaître les déterminants et mécanismes à l'origine de la diversité biologique dans les cours d'eau.

Les milieux fluviaux présentent souvent des patrons de biodiversité particuliers [3–5]. Ainsi, les cours supérieurs se caractérisent généralement par une diversité spécifique locale, ou diversité α , plus faible que les cours inférieurs; en contrepartie, les ruisseaux



Florian Altermatt

Au début de l'essai, tous les microcosmes renferment le même nombre d'espèces. Le doctorant Francesco Carrara assure ensuite la diffusion des organismes le long des ramifications du réseau par pipetage d'un milieu à l'autre. Une différenciation des communautés locales s'effectue naturellement au cours de l'expérience.

d'amont se distinguent davantage par leurs communautés biotiques que les rivières d'aval (diversité β plus élevée). Jusqu'à récemment, il était communément admis que la présence et la fréquence des espèces dans un milieu donné et donc les patrons de diversité dépendaient essentiellement des conditions écologiques locales. Il est ainsi avéré que certaines espèces ne peuvent se développer que dans un domaine de pH ou de température très particulier. Ce concept a cependant le défaut de faire abstraction de la capacité des organismes à se disséminer et de considérer que tous les habitats adéquats sont effectivement colonisés.

La répartition des espèces dans le temps et dans l'espace n'a cependant rien de statique mais résulte de processus extrêmement dynamiques: des organismes peuvent disparaître d'un endroit et apparaître ailleurs au même moment. De la même manière que les bateaux transportent leurs marchandises sur les canaux, de nombreux poissons, invertébrés et plantes alluviales se servent des cours d'eau pour véhiculer leurs formes de dissémination vers d'autres milieux. Ces dernières laissent ainsi tomber leurs graines dans le courant et colonisent de cette façon les habitats propices en aval. La structure du réseau fluvial décide alors de leur destination. A son époque, Léonard de Vinci décrivait déjà la structure dendritique caractéristique des systèmes fluviaux: un réseau ramifié orga-

nisé de façon hiérarchique se formant sous l'effet des processus hydrologiques. Les écologues ont longtemps accordé assez peu d'attention aux réseaux et à leur structure et ont plutôt eu tendance à considérer les cours d'eau comme de simples systèmes linéaires [6]. Ce n'est que récemment qu'un changement de perspective s'est opéré et que l'on a commencé à tenir compte de la structure des réseaux pour tenter d'expliquer la répartition des espèces [4].

Les modélisations actuelles indiquent que les patrons de diversité qui apparaissent dans les cours d'eau résultent des possibilités limitées de dispersion des organismes au sein des réseaux fluviaux [3, 5]. Les modèles considèrent que la dispersion s'effectue principalement le long des voies d'eau, que les distances parcourues sont relativement faibles et que les espèces peuvent disparaître d'un tronçon donné du fait de phénomènes locaux. Les possibilités de recolonisation des habitats dépendent de leur localisation au sein du réseau et de leur éloignement par rapport aux populations susceptibles d'émettre des individus colonisateurs.

Ces modèles considèrent donc que la présence ou l'absence d'une espèce à un endroit donné ne dépend pas nécessairement ou pas uniquement des conditions écologiques locales mais aussi des connexions spatiales entre les habitats. Autrement dit : la répartition spatiale des connexions entre les habitats fluviaux fait apparaître une répartition caractéristique de la biodiversité dans le réseau. Les modèles mathématiques reproduisent assez fidèlement les patrons de diversité observés dans la nature mais, jusqu'à présent, la réalité du phénomène n'avait pas encore été prouvée expérimentalement.

Un réseau hydrographique de laboratoire

Dans une étude publiée récemment, nous avons pu démontrer dans un essai de laboratoire que la dispersion des organismes le long de systèmes reproduisant les réseaux hydrographiques naturels aboutissait à un patron de diversité caractéristique [7]. Grâce à un

partenariat entre l'Eawag et l'équipe d'Andrea Rinaldo du Laboratoire d'écohydrologie de l'EPF de Lausanne, il nous a été possible d'associer approche empirique et approche théorique pour un résultat probant.

Pour nos essais, nous avons construit un réseau hydrographique ramifié très simplifié au laboratoire. Pour ce faire, nous nous sommes inspirés d'un modèle de paysage réaliste dont nous avons extrait la structure du réseau fluvial. Nous avons ensuite transposé cette structure de manière simplifiée à la construction d'un réseau expérimental composé de boîtes de culture cellulaire reliées entre elles de façon artificielle (Fig. 1). Au départ de l'expérience, chaque communauté locale est composée de neuf espèces de protistes et de rotifères vivant dans un milieu de culture. La dispersion des micro-organismes dans le réseau miniature est simulée en transférant une petite quantité de milieu d'un microcosme à un autre à l'aide d'une pipette. Les échanges entre communautés sont effectués entre milieux adjacents le long du réseau ramifié reconstitué et, en comparaison, le long d'un réseau homogène dans lequel chaque microcosme est en contact avec chacun de ses voisins (Fig. 2). A la fin de l'essai, la communauté de chaque localité est recensée.

Ce système expérimental nous a permis d'exclure ou d'homogénéiser les facteurs environnementaux. Ainsi, le taux de dispersion et les caractéristiques des habitats étaient les mêmes dans les deux variantes comparées. Celles-ci se distinguaient uniquement par la distribution spatiale des connexions entre les milieux, autrement dit, par les possibilités de migration des organismes. Cette approche nous a donc permis d'étudier la relation entre la structure spatiale d'un réseau de type fluvial et la biodiversité. Etant donné que l'essai s'est poursuivi sur plusieurs dizaines de générations d'organismes, il a d'autre part permis de tenir compte des effets à long terme des interactions interspécifiques et de la dynamique des populations sur la répartition de la diversité spécifique.

Fig. 2 : La diversité spécifique d'un milieu dépend de ses connexions dans le réseau. Dans les réseaux dendritiques comme les réseaux hydrographiques naturels (a), les « zones de confluence » abritent en général davantage d'espèces que les « ruisseaux d'amont » plus isolés. Dans les réseaux uniformes (b), la répartition des espèces est homogène.

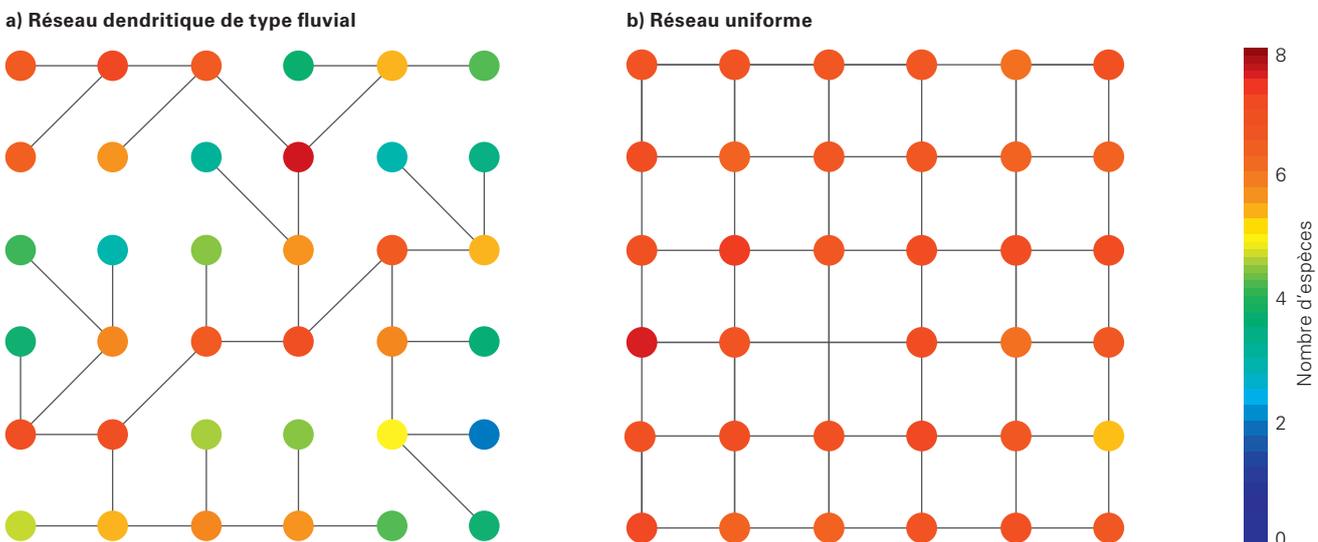
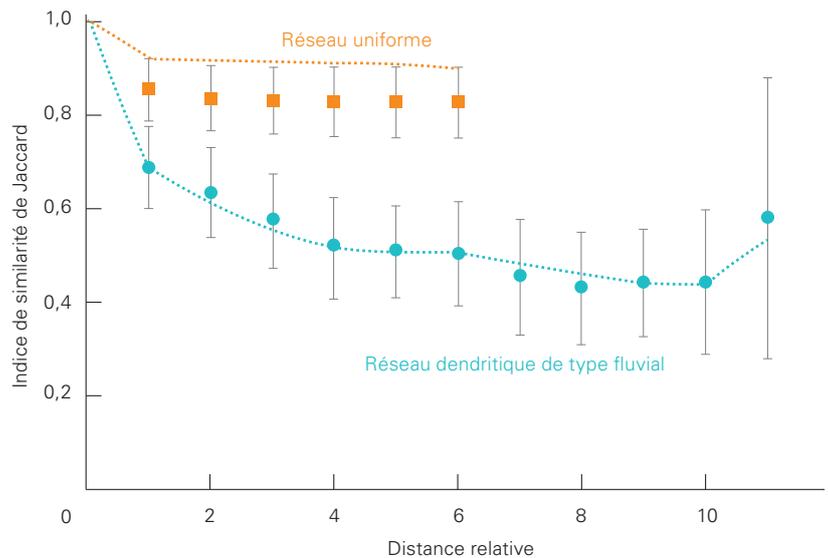


Fig. 3 : Similarité entre les communautés des milieux comparés deux à deux en fonction de la distance qui les sépare dans le réseau. La similarité est mesurée par l'indice de Jaccard : s'il est égal à 1, les deux habitats sont peuplés des mêmes espèces, s'il est égal à 0, ils n'ont aucune espèce commune. Les points correspondent aux valeurs mesurées dans notre essai (moyenne \pm écart-type) et la ligne en pointillés à celles calculées par le modèle mathématique.



La structure fluviale influe sur la biodiversité

Au bout du mois qu'a duré l'expérience, les « zones de confluence » du réseau artificiel ramifié abritaient davantage d'espèces que les « têtes de bassin » plus isolées. D'autre part, les communautés des différents « ruisseaux » d'amont se distinguaient fortement les unes des autres, notamment par leur richesse spécifique. Dans le réseau uniforme, l'évolution des biocénoses était au contraire homogène (Fig. 2). Dans les deux modèles expérimentaux, la composition des assemblages se modifiait à mesure que la distance entre les habitats augmentait. Ce phénomène était particulièrement marqué dans le système dendritique où les différences entre les communautés locales étaient d'autant plus fortes qu'elles étaient éloignées les unes des autres (Fig. 3). Ces observations ont été confirmées par un modèle mathématique développé en parallèle, ce qui nous a permis d'en dégager des règles générales.

Nos résultats montrent nettement que la connectivité et la continuité écologique des cours d'eau ont une influence directe sur la diversité et la répartition des espèces. La structure des réseaux hydrographiques agit sur deux indicateurs majeurs de la biodiversité : la diversité spécifique locale au sein des habitats (diversité α) et la variabilité entre les habitats (diversité β). Cette dernière est essentielle à la préservation d'une forte biodiversité régionale.

Quelles implications pour les systèmes réels ?

Notre étude repose sur une forte simplification des systèmes naturels et ses résultats ne peuvent donc pas être directement extrapolés à une rivière ou une espèce donnée. Cependant, la reproduction simplifiée de l'action de facteurs clés isolés a permis d'évaluer les effets de la structure du réseau hydrographique sur la biodiversité et d'en déduire des règles générales. Nos résultats semblent indiquer que les modifications de la structure des réseaux réels peuvent avoir des conséquences directes sur la répartition et la diversité des espèces dans les rivières. Ainsi, les barrages fragmentent l'espace fluvial tandis que les canaux entre cours d'eau renforcent les connexions. Les conséquences de ces interventions humaines doivent être prises en compte pour la protection des écosystèmes naturels. Le succès d'un projet de préservation ou de restauration d'un tronçon de rivière ne dépend pas uniquement des facteurs écologiques locaux mais également de la position du tronçon dans le réseau hydrographique. Les habitats isolés des cours d'eau supérieurs sont plus difficiles à coloniser que les biotopes

bien connectés situés au cœur de l'hydrosystème. D'un autre côté, l'ouverture au réseau de milieux naturellement isolés peut s'avérer dangereuse pour leur intégrité écologique en les rendant accessibles aux espèces invasives.

Sur le plan mathématique, notre étude a également montré qu'il était indispensable d'intégrer la structure du réseau aux facteurs pris en compte dans les modèles prédictifs de la biodiversité des rivières. Les paramètres de connectivité peuvent être modifiés pour simuler différents types de scénarios et livrer des prédictions réalistes. Dans le cadre de notre projet de recherche, les conclusions de l'étude vont maintenant être appliquées à l'étude de la distribution et de la diversité des insectes aquatiques dans les rivières suisses. La question qui nous occupe est de savoir comment la diversité des éphémères, plécoptères et trichoptères peut être expliquée à la fois par les conditions locales et par la position des habitats au sein des réseaux hydrographiques.

florian.altermatt@eawag.ch

- [1] MacArthur R.H. and Wilson E.O. (1967): The theory of island biogeography. Princeton, Princeton University Press.
- [2] Vorosmarty C.J., McIntyre P.B., Gessner M.O., Dudgeon D., Prusevich A., Green P., Glidden S., Bunn S.E., Sullivan C.A., Liermann C.R., Davies P.M. (2010): Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* 467, 555–561.
- [3] Muneerpeerakul R., Bertuzzo E., Lynch H.J., Fagan W.F., Rinaldo A., Rodriguez-Iturbe I. (2008): Neutral metacommunity models predict fish diversity patterns in Mississippi-Missouri basin. *Nature* 453, 220–222.
- [4] Grant E.H.C., Lowe W.H., Fagan W.F. (2007): Living in the branches: Population dynamics and ecological processes in dendritic networks. *Ecology Letters* 10, 165–175.
- [5] Finn D.S., Bonada N., Múrria C., Hughes J.M. (2011): Small but mighty: Headwaters are vital to stream network biodiversity at two levels of organization. *Journal of the North American Benthological Society* 30, 963–980.
- [6] Vannote R.R., Minshall G.W., Cummins K.W., Sedell J.R., C.E.C. (1980): The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37, 130–137.
- [7] Carrara F., Altermatt F., Rodriguez-Iturbe I., Rinaldo A. (2012): Dendritic connectivity controls biodiversity patterns in experimental metacommunities. *Proceedings of the National Academy of Science* 109, 5761–5766.



Michael Berg est chimiste environnementaliste et ses recherches portent sur le comportement des polluants dans le milieu aquatique.

Coauteur: Beat Müller

L'eutrophisation en Chine – Une impression de déjà-vu

Suite au développement économique et démographique de la région de Pékin, tout le système hydrographique du fleuve Haihe connaît actuellement un problème d'eutrophisation gravissime. Les eaux usées en sont les principales responsables. Car si certaines localités sont équipées de stations d'épuration, celles-ci fonctionnent souvent à la limite de leurs capacités et n'éliminent qu'imparfaitement les matières nutritives.



Efflorescences algales sur le lac fortement eutrophisé de Shahe en amont de Pékin.

Le Nord-Est de la Chine est la région qui connaît le développement le plus fort et le plus rapide du pays. La zone fortement peuplée qui s'étend entre les deux mégapoles de Pékin et de Tianjin présente le taux de croissance économique et démographique le plus élevé de la République populaire. En même temps, cette région semi-aride s'assèche alors que les besoins en eau augmentent. Les précipitations n'ont cessé de baisser depuis les années 1970 et, en 2007, les habitants de Pékin ne disposaient que de 230 m³ d'eau potable par

personne et par an. C'est en moyenne moins de 8 % de la quantité disponible en Suisse.

Les eaux usées, principale cause d'eutrophisation

Malgré l'aridité du climat, environ 30 % du blé et 20 % du maïs produits en Chine proviennent des champs qui se trouvent entre Pékin et Tianjin. Cette production se fait au prix d'une irrigation intensive alimentée par le système hydrique du fleuve Haihe qui s'étend du

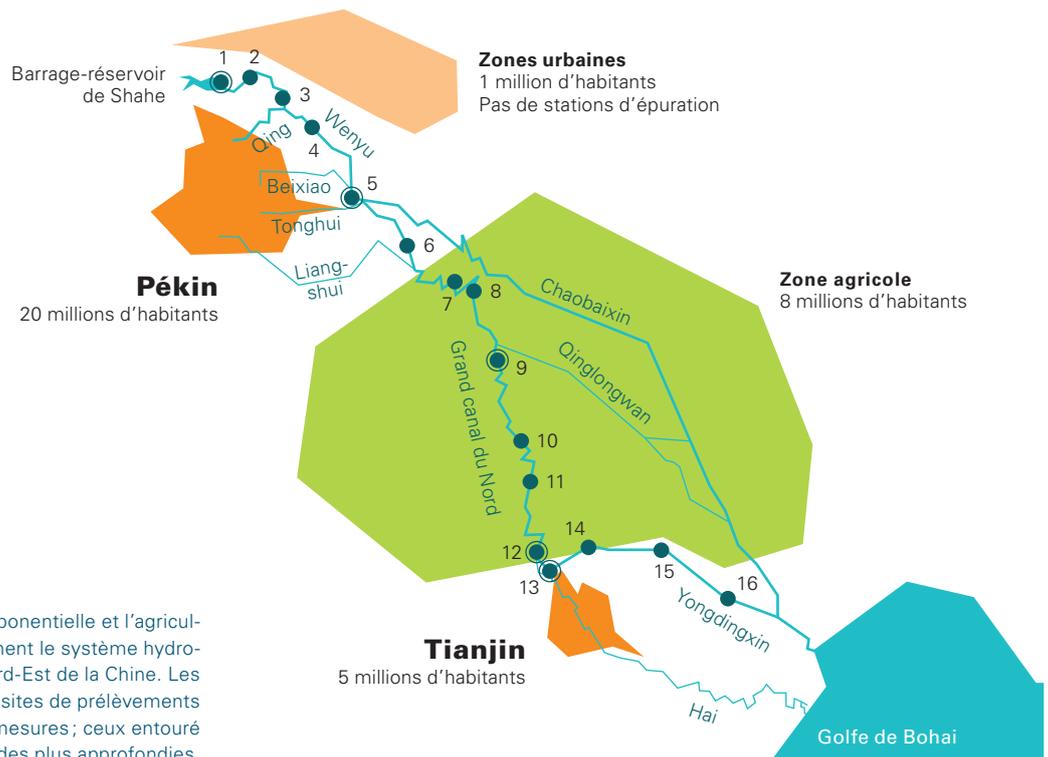


Fig. 1 : La croissance urbaine exponentielle et l'agriculture intensive affectent fortement le système hydrographique du fleuve Haihe au Nord-Est de la Chine. Les points numérotés indiquent les sites de prélèvements de la première campagne de mesures ; ceux entouré d'un cercle ont fait l'objet d'études plus approfondies.

réservoir de Shahe au golfe de Bohai distants de quelque 250 km (Fig. 1). Suite à la raréfaction des précipitations, à l'augmentation des besoins individuels au sein d'une population croissante et aux prélèvements croissants pour l'agriculture et l'industrie, de nombreuses rivières du Nord de la Chine sont aujourd'hui asséchées.

Parallèlement à l'amenuisement des ressources, les concentrations en nitrates et en phosphates ont énormément augmenté au cours des 40 dernières années, provoquant une eutrophisation massive des lacs et cours d'eau de la région. Ce phénomène s'explique en partie par une généralisation de l'emploi des engrais chimiques dans l'agriculture mais il est surtout dû au fait qu'une grande partie des eaux usées se déversent sans traitement préalable dans un écosystème déjà fortement perturbé par les activités humaines. Les lacs et cours d'eau du bassin du Haihe sont aujourd'hui fortement dégradés et connaissent un développement algal excessif qui les prive en grande partie de leur oxygène. La pollution s'étend également aux sols et aux eaux souterraines et finit par gagner la mer où ses effets sont catastrophiques. Les apports de nutriments modifient en effet les communautés d'algues marines et les eaux côtières connaissent des blooms algaux de plus en plus fréquents au cours desquels certaines espèces pullulent en libérant des substances toxiques (« marées rouges »). La perte d'oxygène provoquée par le développement algal fait apparaître des zones d'hypoxie dites « mortes ». Celles qui longent les côtes chinoises sont les plus étendues au monde.

L'Europe a, elle aussi, connu une situation similaire à partir des années 1950, dans sa dernière grande période d'expansion économique. En Suisse, les problèmes ont pu être en grande partie résolus grâce, notamment, aux résultats de la recherche sur l'eau et les milieux aquatiques qui ont abouti à la prise de mesures efficaces comme la construction de stations d'épuration et l'interdiction des phosphates dans les lessives [1]. Aujourd'hui, de telles mesures doivent également être prises de toute urgence en Chine et dans

d'autres régions du monde en forte croissance économique et démographique.

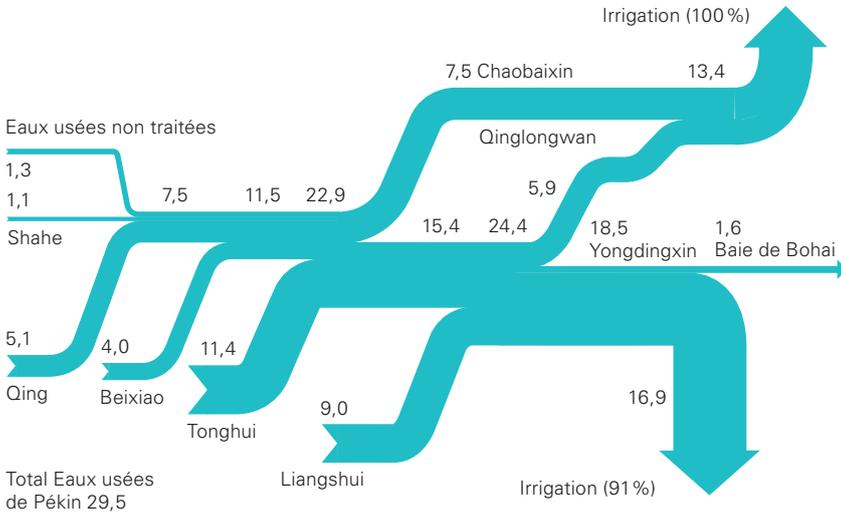
En Chine, les autorités ont pris conscience de la gravité de la situation dans le Nord du pays et les mesures d'assainissement sont inscrites au programme de l'agenda politique. Des fonds suffisants sont également disponibles et contrairement à d'autres pays, ces ressources financières peuvent être mobilisées assez rapidement, ce qui facilite la mise en place de mesures efficaces, et permet d'établir des partenariats avec l'étranger favorables au transfert de compétences et de connaissances.

Une consommation effrénée malgré des ressources limitées

Dans le cadre des préparatifs des Jeux olympiques de 2008, Pékin s'est dotée de pas moins de neuf stations d'épuration devant traiter 90 % des eaux usées rejetées par la ville dans les affluents du Haihe. L'efficacité de ces nouvelles infrastructures n'avait cependant pas encore été vérifiée. Dans le cadre d'un projet de recherche mené en partenariat avec un institut de l'Académie chinoise des sciences, le Research Center for Eco-Environmental Sciences de Pékin, nous avons établi un bilan des flux de nutriments dans l'ensemble du système hydrographique [2]. Nous avons suivi l'évolution spatio-temporelle des charges en phosphore et en azote entre le barrage-réservoir de Shahe en amont de Pékin et le golfe de Bohai en aval de Tianjin. Les résultats doivent fournir une base de décision aux instances gouvernementales de la région pour mettre en place des mesures efficaces et intelligentes de lutte contre la pollution. Une autre équipe de l'Eawag s'est quant à elle engagée dans un projet sur la contamination du milieu par les micropolluants organiques (cf. article p. 6) [3].

Pour nous faire une première idée de la répartition et de la gravité de la pollution azotée et phosphorée, nous avons prélevé des échantillons sur 16 tronçons de rivière répartis sur une distance de

a) Flux hydriques (m³/s)



b) Flux d'azote (t/j)

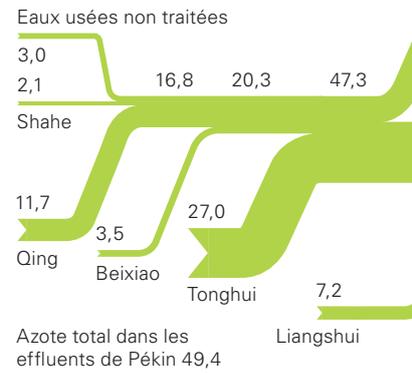


Fig. 2: Flux hydriques et flux de matières nutritives dans le système fluvial du Haihe.

240 km pendant la saison sèche (avril) et la saison des pluies (juillet) de l'année 2009. Au vu des résultats d'analyse, cinq sites ont été sélectionnés pour l'installation de stations permanentes sur lesquelles des prélèvements mensuels ont été effectués pendant un an (Fig. 1). Les fluctuations en fonction des heures de la journée et des jours de la semaine ont également été caractérisées. Nous avons d'autre part étudié les quatre affluents dans lesquels se déversent les eaux usées de Pékin – le Qing, le Beixiao, le Tonghui et le Liangshui – et analysé les effluents produits par les cinq principales stations d'épuration de la capitale pour déterminer la charge nutritive par habitant.

La détermination des flux hydrauliques s'est avérée plus difficile que prévu étant donné que les données détenues par les autorités locales n'étaient pas accessibles au public. Ce n'est qu'au terme de longs pourparlers menés par nos partenaires chinois que les informations nous sont finalement parvenues. Il se trouve ainsi que le lac de Shahe qui s'étend sur 1,8 km² dans un grand parc fréquenté par les citoyens en quête de nature libère à peine 1 m³/s vers le système fluvial. En aval de Pékin, 90 % de l'écoulement provient des quatre affluents que sont le Qing, le Beixiao, le Tonghui et le Liangshui. La capitale libère en moyenne sur l'année 29,5 m³/s d'eaux usées épurées et non épurées dans le réseau (Fig. 2a). Ce flux correspond aux effluents émis par 14 millions d'habitants soit 70 % de la population de Pékin. La consommation d'eau par habitant est en moyenne de 200 litres par personne et par jour. Malgré la faiblesse de ses ressources en eau, la capitale présente donc une consommation supérieure à celle de la Suisse qui se situe autour de 170 litres par personne et par jour.

Des teneurs en nutriments plus qu'excessives

Pékin et sa périphérie déversent chaque jour en moyenne 54,5 tonnes d'azote et 4,5 tonnes de phosphore dans le système fluvial (Fig. 2b

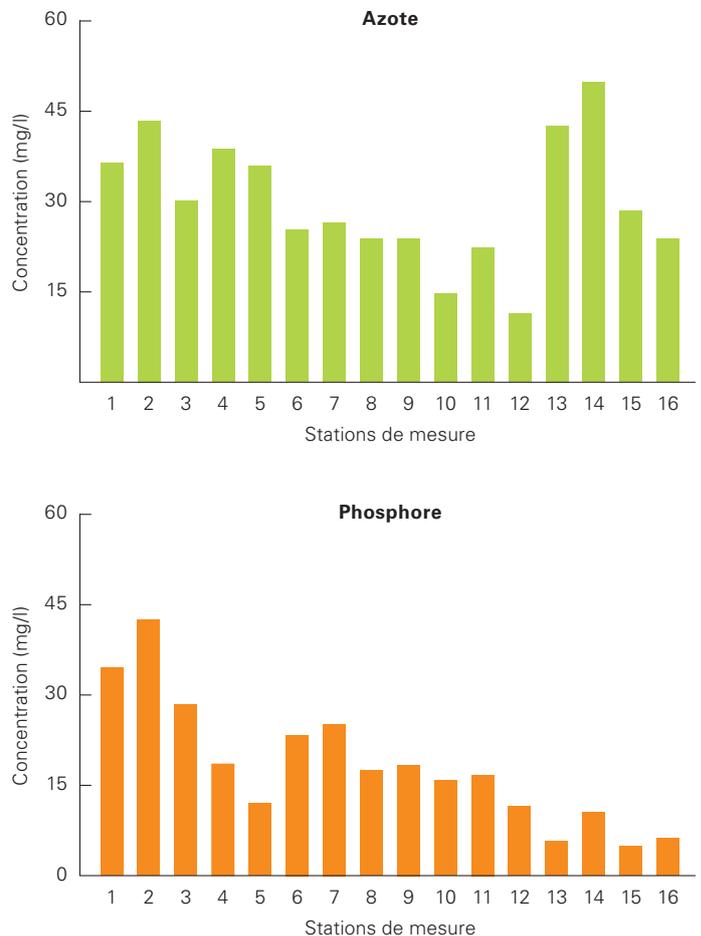
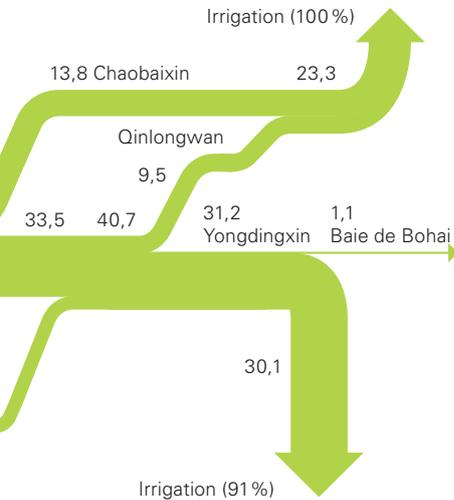
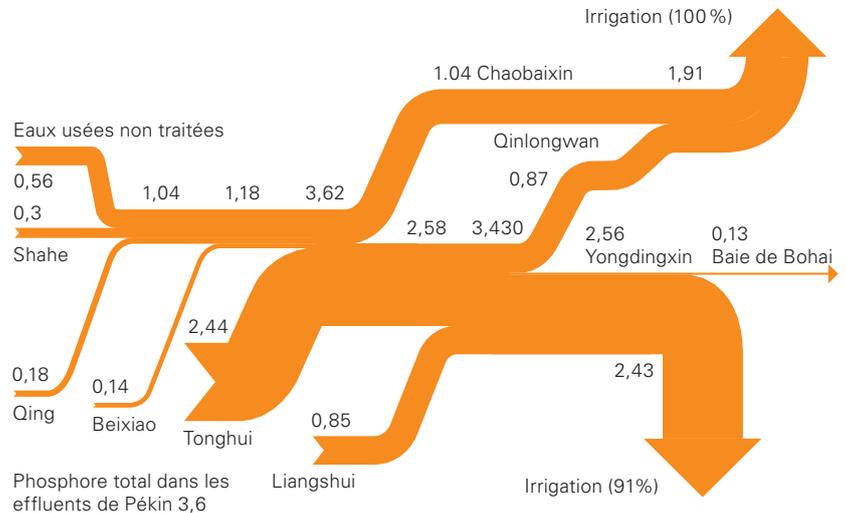


Fig. 3: Les teneurs en azote et en phosphore ont tendance à diminuer d'amont vers l'aval.



c) Flux de phosphore (t/j)



et 2c). Cette charge provient à 90 % des eaux usées de la capitale et se déverse pour moitié dans la rivière Tonghui.

Les concentrations d'azote mesurées sous forme ammoniacale dans le lac Shahe atteignent 33 mg/l, celles de phosphore inorganique dissous 3,2 mg/l. C'est respectivement dix fois et six fois plus que les plus fortes teneurs jamais mesurées en Suisse dans les années 1970 et 1980, au maximum de l'eutrophisation des lacs et rivières. Les matières nutritives proviennent majoritairement d'eaux usées et de boues non traitées générées par l'habitat humain et l'élevage (principalement de volailles) qui se déposent dans le lac peu profond. Les sédiments riches en carbone organique relarguent en permanence nutriments et micropolluants dans les eaux du lac. Par ailleurs, de nombreuses canalisations déversent des eaux usées non traitées dans le Wenyu en aval du barrage-réservoir. La partie amont du bassin du Haihe est donc déjà fortement polluée alors que seuls 3 % de la charge totale en nutriments proviennent de cette région. Les concentrations en azote et en phosphore diminuent ensuite globalement vers l'aval (Fig. 3). Il semblerait pourtant logique que la charge en nutriments augmente à proximité des villes (comme Pékin) et dans les zones d'agriculture intensive (comme entre Pékin et Tianjin). Dans le cas présent, la pollution venant du réservoir de Shahe est si forte que même les apports d'eaux usées de Pékin ont un effet de dilution.

Une mauvaise élimination de l'azote

Dans l'ensemble, nos analyses confirment la responsabilité dominante des eaux usées domestiques dans la pollution azotée et phosphorée du bassin du Haihe. Les apports d'origine agricole, industrielle ou atmosphérique s'avèrent, en regard, négligeables. D'après nos estimations, les stations d'épuration de Pékin reçoivent environ 1420 g d'azote par habitant et par an. Elles se situent ainsi dans la moyenne mondiale qui est de l'ordre de 1650 à 1850 g par

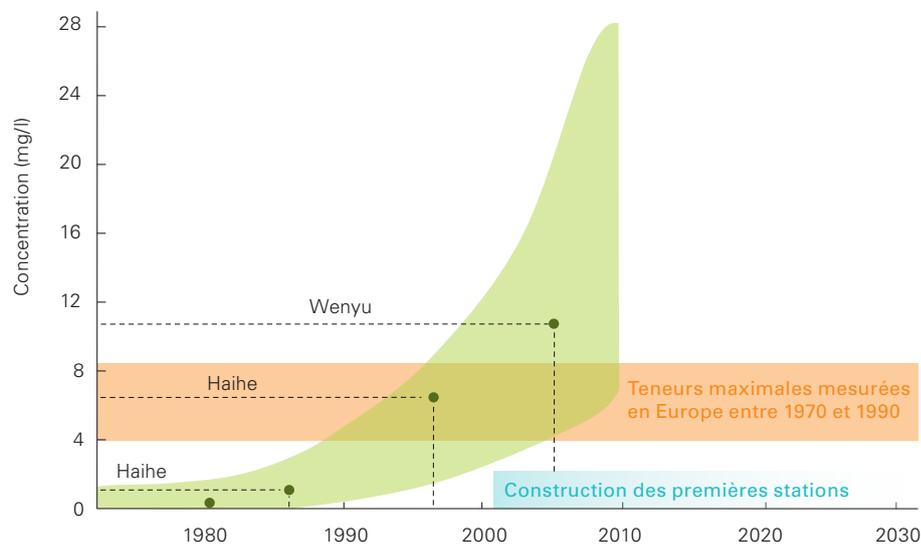
habitant et an. En revanche, les effluents produits par les stations sont nettement plus concentrés que les références internationales (1200 g par habitant au lieu de 110 à 800). Ce faible rendement d'épuration semble indiquer un mauvais fonctionnement des installations de nitrification-dénitrification.

Le phosphore, de son côté, semble assez bien éliminé. La teneur dans les effluents d'épuration correspond aux moyennes mondiales qui se situent entre 91 et 211 g par habitant et par an. Les fortes concentrations enregistrées dans les rivières sont davantage dues à une insuffisance des écoulements qu'à une déficience de l'épuration. Malgré la construction de neuf stations d'épuration et de plus de 4000 km de collecteurs dans l'agglomération de Pékin, l'augmentation des teneurs en nutriments amorcée il y a plusieurs décennies n'a pu être freinée (Fig. 4). En effet, même si un nombre croissant de ménages se raccorde au réseau d'assainissement, celui-ci, conçu au début des années 2000, n'a pas été dimensionné pour faire face à une croissance démographique beaucoup plus forte que prévu et ne suffit déjà plus pour traiter les volumes d'effluents produits. Les stations travaillent aujourd'hui en surcharge.

Le moyen le plus efficace pour enrayer l'eutrophisation catastrophique des eaux du bassin semble donc la construction de nouvelles stations d'épuration, suffisamment grandes et dotées de dispositifs efficaces d'élimination de l'azote. Dans les années 1980, cette stratégie a permis à la Suisse et aux pays européens de stopper l'accumulation de matières azotées dans le milieu aquatique. En maints endroits, les concentrations sont toutefois restées beaucoup plus élevées qu'à l'origine du fait des apports de sources difficiles à localiser et à contrôler.

L'agriculture chinoise pourrait également contribuer à préserver les ressources en eau et en énergie en optant pour une utilisation plus

Fig. 4: Les teneurs en azote continuent d'augmenter même après la construction des stations d'épuration. Elles dépassent aujourd'hui très largement les concentrations les plus élevées jamais mesurées en Europe.



raisonnée des engrais de synthèse. L'amélioration serait particulièrement sensible dans les régions côtières comme le delta du Yangtsé [4]. Une interdiction des phosphates dans les détergents serait également un moyen de réduire les concentrations en phosphore dans le milieu naturel.

Une eau polluée pour les cultures

Les résultats de cette étude sino-helvète ont été présentés dans le cadre de séminaires et discutés avec les acteurs responsables. Ces échanges ont montré que la Chine avait une réelle volonté de résoudre le problème. La ville de Pékin a déjà réalisé des essais pour tenter d'améliorer le rendement d'épuration de cinq stations. Une modernisation complète devrait être réalisée prochainement.

Une de nos observations montre d'autre part à quel point il est urgent d'intervenir : 95 % des 31,9 m³/s qui s'écoulent en moyenne annuellement dans le système hydrique du Haihe sont utilisés pour l'irrigation. L'équivalent des deux rivières canalisées Chaobaixin et Qinlongwan est donc détourné pour cet usage. Sur les 18,5 m³/s qui se déversent dans le Grand canal du Nord en aval de Pékin, seuls 1,6 m³/s atteignent Tianjin et s'écoulent ensuite vers la mer (Fig. 2a). Divers barrages ont été aménagés entre ces deux points pour diriger les eaux vers un réseau complexe de canaux d'irrigation dans lesquels les paysans prélèvent les quantités nécessaires à leurs cultures. L'eau utilisée présente toutefois un degré de pollution supérieur aux seuils définis par les autorités chinoises pour la classe de qualité la plus faible (classe V). Cela signifie que cette eau est en fait impropre à tout usage.

michael.berg@eawag.ch

- [1] Hering J.G., Höhn E., Klinko A., Maurer M., Peter A., Reichert P., Robinson C., Schirmer K., Schirmer M., Stamm C., Wehri B. (2012): Moving targets, long-lived infrastructure, and increasing needs for integration and adaptation in water management: An illustration from Switzerland. *Environmental Science and Technology* 46, 112–118.
- [2] Pernet-Coudrier B., Qi W., Liu H., Müller B., Berg M. (2012): Sources and pathways of nutrients in the semi-arid region of Beijing-Tianjin, China. *Environmental Science and Technology* 46, 5294–5301.
- [3] Heeb F., Singer H., Pernet-Coudrier B., Qi W., Liu H., Longrée P., Müller B., Berg M. (2012): Organic micropollutants in rivers downstream of the megacity Beijing: Sources and mass fluxes in a large-scale wastewater irrigation system. *Environmental Science and Technology* 46, 8680–8688.
- [4] Müller B., Berg M., Pernet-Coudrier B., Qi W., Liu H. (2012): The geochemistry of the Yangtze River: Seasonality of concentrations and temporal trends of chemical loads. *Global Biogeochemical Cycles* 26, GB2028.

Pas sans l'être humain !

Les problèmes écologiques ont généralement une origine sociétale. Pourtant, les chercheurs et environnementalistes de terrain ont encore tendance à les aborder de façon unilatérale dans une perspective technologique et naturaliste. Or la considération des problématiques sous un angle socio-économique permettrait d'imaginer des solutions plus durables et plus consensuelles. Si l'idée n'est pas nouvelle, elle ne peut être mise en pratique qu'avec le soutien et la volonté de tous. *Texte: Andres Jordi*



L'être humain fait de nombreux usages de l'or bleu (départ de la traversée du lac de Zurich en août 2012).

La recherche environnementale traverse une période de mutation idéologique. Il apparaît de plus en plus nettement que la solution aux problèmes écologiques de notre époque ne sera pas uniquement technico-scientifique. En effet, une analyse entièrement basée sur les aspects physico-chimiques et biologiques des phénomènes occulte le rôle des systèmes sociétaux et de leurs acteurs. « Les problèmes écologiques ont une origine avant tout sociétale », estime Bernhard Truffer, le chef du tout nouveau département de Sciences sociales de l'environnement de l'Eawag. « Il faut donc tout

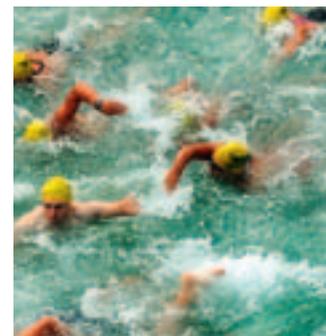
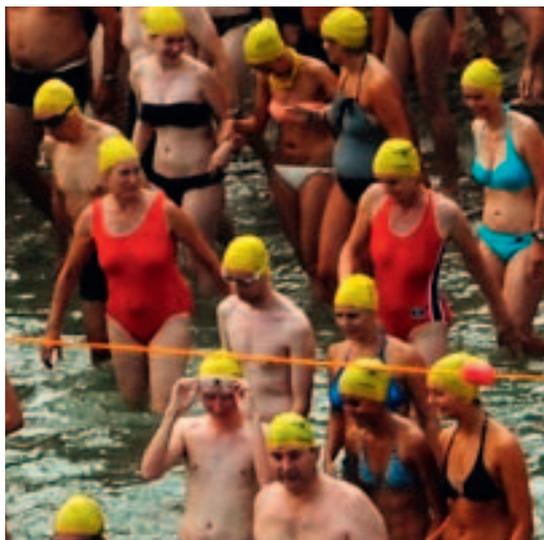
d'abord comprendre les processus au sein des sociétés humaines pour pouvoir modifier leurs impacts sur l'environnement », ajoute-t-il. Selon lui, la perspective socio-économique permet de mieux comprendre l'origine des problèmes écologiques et, par là même, de mieux les gérer.

Le rôle dominant de la technologie

Nos rapports avec l'eau montrent bien à quel point nature et société sont liés. Nous produisons de l'électricité à partir de l'énergie

Qui assure la diffusion des systèmes d'assainissement décentralisé ?

Heiko Gebauer et Bernhard Truffer étudient le rôle des réseaux d'entreprises dans la diffusion des technologies d'assainissement décentralisé. Ils cherchent notamment à savoir si les structures multinationales comme General Electric, Siemens ou Veolia sont plus à même de favoriser la diffusion de ces systèmes dans le monde que les petites et moyennes entreprises (PME). L'étude montre nettement la supériorité des grands groupes. « Le grand handicap des systèmes décentralisés est leur faible marché potentiel dans les pays déjà équipés de réseaux centralisés où les grandes sociétés n'ont aucun intérêt à se faire elles-mêmes concurrence », explique Heiko Gebauer. Les grands groupes contournent ce problème en développant les nouvelles technologies dans les pays émergents qui ne disposent pas encore d'infrastructures d'assainissement où elles peuvent s'imposer sur le marché face à des systèmes centralisés souvent moins flexibles. Les petites et moyennes entreprises n'ont souvent pas accès à ces marchés. Elles se voient contraintes de développer les systèmes décentralisés dans les pays industrialisés où ils ne peuvent occuper que des marchés marginaux. Jusqu'à présent, ces niches de marché sont cependant trop restreintes pour ramener les coûts de production à un niveau concurrentiel, ce qui freine la diversification de leur champ d'application. Mais que ce soit pour les multinationales ou pour les PME, il est important que le développement des technologies d'assainissement décentralisé soit coordonné avec la planification des infrastructures urbaines d'assainissement et de traitement des eaux [6]. heiko.gebauer@eawag.ch



hydraulique, fréquentons lacs et ruisseaux pour nous détendre, devons nous protéger des inondations, sommes entièrement dépendants des ressources en eau potable et sommes en même temps soucieux de préserver les écosystèmes aquatiques et leur biodiversité. Les enjeux ne sont alors pas uniquement techniques et scientifiques mais résultent bien plus de nos besoins, de nos aspirations et de nos valeurs – bref de facteurs économiques et sociaux. « Il nous faut comprendre comment l'être humain perçoit, réfléchit, décide et agit dans son contexte familial, communautaire et sociétal », explique Heinz Gutscher, professeur de psychologie sociale et directeur du laboratoire d'études sociales de l'Université de Zurich. Et d'ajouter : « Pourtant, les débats, sur la transition énergétique par exemple, sont encore largement dominés par des considérations d'ordre technique. »

La nécessité d'aborder les problèmes environnementaux sous un angle plus sociétal se fait également sentir dans la pratique. C'est ce que montre une étude réalisée par l'Université de Berne [1]. D'après ses résultats, les environnementalistes de terrain déplorent le manque d'attention accordé aux questions économiques et sociales et, notamment, à la gestion des conflits d'intérêt et demandent un engagement plus important des sciences sociales dans la recherche environnementale. Le même courant de pensée se manifeste chez les spécialistes européens de l'approvisionnement en eau : de leur point de vue, seule une approche interdisciplinaire conjuguant innovation technologique et analyse sociologique peut, à long terme, assurer sa pérennité [2].

L'ingénieur Damian Dominguez de l'Office bernois des eaux et des déchets est lui aussi convaincu de l'importance de la perspective socio-économique dans la résolution des problèmes pratiques : « Dans le travail d'élaboration de stratégies d'avenir, les sciences sociales peuvent fournir des instruments précieux pour la prise de décision, la priorisation des objectifs et l'analyse des questions complexes », explique le chef du service Traitement des eaux usées. Pour illustrer ses propos, il cite l'exemple du projet RIF (« regional infrastructure foresight ») dans lequel il a travaillé avec l'Eawag à l'élaboration d'une méthode de planification stratégique durable pour les infrastructures de traitement et d'évacuation des eaux [3]. RIF propose une démarche participative pour l'analyse et l'évaluation des options techniques et organisationnelles

Quelles sommes acceptons-nous d'investir dans l'extension des stations d'épuration ?

Par le biais d'une analyse coûts-bénéfices, Ivana Logar et Roy Brower cherchent à savoir si l'extension des stations d'épuration prévue pour lutter contre la pollution des eaux suisses par les composés traces organiques se justifie économiquement. Le coût des traitements complémentaires est estimé à 133 millions de francs annuels. Les chercheurs ont effectué un sondage auprès d'un échantillon représentatif de

ménages suisses alémaniques pour tenter de savoir combien ils seraient prêts à payer pour l'élimination des micropolluants. « Notre étude a montré que la population était très bien informée sur le problème des micropolluants », déclare Ivana Logar. « 54 pour cent des personnes interrogées considèrent que ces substances représentent un grand risque pour la santé et l'environnement. » Les premiers résultats

montrent que les ménages suisses seraient prêts à investir plus de 200 millions de francs par an pour débarrasser les cours d'eau de ces contaminants chimiques. L'installation des nouveaux systèmes de traitement dans les stations d'épuration serait donc justifiée sur le plan économique. ivana.logar@eawag.ch

envisageables à partir de scénarios prévisionnels. Les résultats débouchent sur la définition d'étapes concrètes de planification. Les essais d'application dans plusieurs régions de Suisse se sont déroulés à la grande satisfaction des utilisateurs et ont démontré la supériorité de la méthode par rapports aux stratégies de planification habituelles. Les solutions les plus plébiscitées étaient celles prévoyant une professionnalisation généralisée du traitement des eaux tandis que les options de modernisation par étapes ne recueillaient pas l'aval des professionnels.

Un projet de longue haleine

L'idée d'un nécessaire engagement des sciences sociales dans la résolution des problèmes environnementaux n'est donc pas neuve. « Il est apparu dès les années 1970 que les problèmes écologiques touchaient de nombreux aspects de la société et que leurs résolution ne pouvait passer par les seules approches scientifiques et techniques », rappelle Ueli Bundi, l'ancien directeur de l'Eawag. « La demande d'une approche plus large est également venue des professionnels et des associations écologistes », se souvient-il. Cette évolution des esprits se reflète aussi dans l'histoire de l'Eawag. L'institut de recherche sur l'eau a très tôt considéré qu'il était important de tenir compte des aspects économiques et juridiques des problèmes environnementaux [4]. Dès 1987, certains de ses membres indiquaient dans un rapport sur la politique de recherche dans le domaine de la protection des eaux que l'étude des eaux et des milieux aquatiques se situait à la frontière des sciences dites dures, des sciences sociales et des sciences de l'ingénieur et que les approches pluridisciplinaires devaient être privilégiées [5]. Cette philosophie se concrétisa en 1992 par la création d'une équipe de recherche en écologie humaine suivie peu de temps après d'un département de recherche et d'innovation en sciences sociales. En cet automne 2012, c'est maintenant au tour du tout nouveau département de Sciences sociales de l'environnement de prendre ses activités (cf. interview). Les sujets décrits dans les encadrés donnent quelques exemples des questions qui occupent les chercheurs de l'Eawag dans le domaine économique et social.

Mais l'intégration des sciences sociales dans les questions environnementales et le développement de l'interdisciplinarité est un projet de longue haleine. « Chaque discipline scientifique a ses propres règles et structures, sa propre conception du monde et



Mieux comprendre les relations entre les décideurs

Dans le cadre du projet « Planification à long terme d'infrastructures durables de distribution et de traitement de l'eau » du PNR 61, Judith Lienert, Florian Schnetzer et Karin Ingold étudient les possibilités d'utilisation de l'analyse des parties prenantes et de l'analyse des réseaux sociaux pour la compréhension des processus décisionnels. Ce travail de recherche vise très concrètement à faciliter l'élaboration de stratégies d'avenir pour la planification et la gestion des infrastructures d'assainissement et d'adduction d'eau. Les chercheurs ont étudié les relations et interactions entre les acteurs et secteurs impliqués par le biais de sondages systématiques. Les résultats ont révélé un manque voire une absence de coordination entre la distribution et le traitement de l'eau et un manque de communication et de collaboration entre les acteurs aux différentes échelles communale, cantonale et nationale. « Par ailleurs, la planification des infrastructures est quasiment le monopole des ingénieurs et des municipalités », déclare Judith Lienert. Les chercheurs estiment que l'analyse concomitante des parties prenantes et des réseaux sociaux permet de décrypter le tissu de relations qui relie les décideurs, préalable indispensable à tout travail d'élaboration d'instruments de planification consensuels [7].

judith.lienert@eawag.ch

de la démarche scientifique », explique Ueli Bundi. Ces différences compliquent les échanges et sont source de malentendus. D'autre part, le fonctionnement traditionnel de la recherche laisse peu de disponibilités aux scientifiques pour tenter de comprendre ceux d'autres disciplines et ces efforts ne sont pas honorés. « L'un des grands problèmes des sociologues est que l'on attend d'eux qu'ils résolvent des problèmes pratiques », déclare Bernhard Truffer. « Nos collègues biologistes, physiciens ou ingénieurs ne comprennent pas que nous ayons nos propres objectifs de recherche

et que notre rôle ne se limite pas à celui de conseillers. » Il semble également qu'ils aient des difficultés à admettre que les problèmes d'ordre sociétal ne puissent se régler d'un simple tour de vis. « Il n'existe généralement pas de solution *end-of-pipe* dans le domaine social », commente le chercheur.

Mais les approches sociologiques ont également des difficultés à s'imposer dans la pratique environnementale, comme le constate Damian Dominguez au quotidien. La pensée dominante est encore

Le nouveau département de Sciences sociales de l'environnement

En septembre 2012, les Sciences sociales de l'environnement ont pris leurs quartiers à l'Eawag sous la forme d'un nouveau département de recherche. L'Institut souhaite y rassembler toutes les compétences acquises dans ce domaine depuis de nombreuses années, explique son responsable, Bernhard Truffer.



Dans quel but l'Eawag a-t-il créé ce nouveau département de Sciences sociales de l'environnement ?

L'idée principale est de consolider l'expérience et la compétence acquises dans ce domaine depuis plus de vingt ans. Le nouveau département a en fait émergé d'un regroupement du département de recherche sur les innovations dans les industries de réseau créé en 2006 et de deux autres groupes de recherche. Ces deux dernières années, deux nouvelles équipes ont d'autre part vu le jour, l'une en économie environnementale, l'autre en politique de l'environnement. Le temps était donc venu de fédérer toutes ces énergies dans un même département de recherche.

De quoi traitent les sciences sociales de l'environnement ?

Les sciences sociales de l'environnement ne constituent pas une discipline académique à proprement parler. Nous avons choisi ce nom pour regrouper toutes les disciplines dans lesquelles travaillent les chercheurs rattachés au nouveau département : sciences économiques, sciences politiques, psychologie sociale, gestion, géographie économique, etc. Chacune de ces disciplines comporte des domaines qui s'occupent plus spécifiquement de questions environnementales.

Quels sont les axes de recherche du nouveau département ?

Notre travail s'articule autour de cinq domaines de compétence : l'économie de l'environnement et des ressources, les politiques de l'environnement, la psychologie de l'environnement et de la santé, la recherche sur les innovations en matière de gestion environnementale et l'analyse des processus décisionnels. Dans un premier temps, les thématiques de recherche découlent naturellement des travaux déjà réalisés ou engagés dans ces différents domaines. Dans le secteur de l'eau, les questions qui nous occupent principalement sont la recherche de nouvelles stratégies et formes d'organisation pour la distribution et le traitement des eaux, le problème des micropolluants et de leur élimination et la gestion des ressources.

Y a-t-il une difficulté particulière à travailler avec des chercheurs d'autres disciplines scientifiques et techniques ?

Nous avons déjà une grande expérience en matière d'interdisciplinarité et, en général, les projets se déroulent plutôt bien. L'Eawag est souvent cité en exemple pour ses approches transdisciplinaires. Mais il faut bien savoir qu'il faut du temps pour apprendre à se connaître et à s'apprécier mutuellement. L'Eawag offre un climat particulièrement favorable au dialogue et aux échanges et permet à ce processus d'« apprivoisement » de se dérouler. Dans d'autres circonstances, il arrive que les projets avortent parce que cette phase préliminaire a été négligée et que les participants rencontrent dès le début de grandes difficultés de communication. Mais on aurait également tort de croire que l'intégration résout tous les problèmes. Le secret d'un bon travail interdisciplinaire est une bonne analyse du problème à résoudre, menée au préalable et de façon concertée par les spécialistes des différents domaines impliqués et aboutissant à une répartition claire des tâches et des compétences de chacun.



Comment inciter au lavage des mains ?

Suite au tremblement de terre qui a dévasté Haïti en 2010 et à l'épidémie de choléra qui s'est ensuite manifestée, l'association d'aide humanitaire Oxfam a mené plusieurs actions sur place pour améliorer les conditions d'hygiène par une sensibilisation de la population aux bons comportements. Grâce à une série d'interviews réalisées dans de plus de 800 ménages, Nadja Contzen et Hans Joachim Mosler de l'Eawag ont tenté d'évaluer l'efficacité des mesures d'incitation en faveur du lavage des mains. Il apparaît que la disposition à se laver les mains dépend des normes sociales, de l'opinion personnelle par rapport à cet acte d'hygiène et de l'estime de soi. Des études statistiques ont d'autre part montré que la dif-

fusion de spots radiophoniques, la distribution d'articles d'hygiène accompagnée de démonstrations d'utilisation, les informations par le biais d'amis et les représentations théâtrales favorisaient le lavage des mains dans les familles. D'autre part, ces mesures étaient plus efficaces quand elles étaient combinées entre elles que quand elles étaient appliquées isolément. En revanche, les chansons à thème, les groupes de discussion et les posters avaient plutôt un effet inverse et provoquaient une désaffection vis-à-vis du lavage des mains. Il en allait de même des journées spécialement consacrées à l'hygiène ou des visites à domi-cile [8].

nadja.contzen@eawag.ch

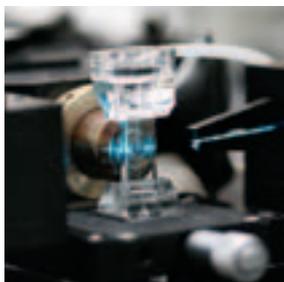
que tous les problèmes peuvent être réglés par des solutions techniques une fois qu'ils ont été compris scientifiquement. Les professionnels de l'environnement sont en général biologistes, chimistes, physiciens ou ingénieurs et les modes de pensée sociologiques leurs sont totalement étrangers. « Au lieu de s'occuper des questions fondamentales, on se perd souvent dans les détails techniques », déplore Dominguez.

Un rôle à part entière dans la conception des projets

Malgré ces difficultés, divers projets de l'Eawag montrent que les efforts d'intégration des sciences sociales ne sont pas vains et que ce nouveau mode de pensée gagne du terrain. Comme le souligne Ueli Bundi, depuis une vingtaine d'années, les approches transdisciplinaires et participatives sont de plus en plus présentes aussi

bien dans les études scientifiques que dans l'aménagement du territoire et la planification des infrastructures. Elles sont aujourd'hui de rigueur dans le déroulement des projets de revitalisation fluviale, d'amélioration foncière, d'exploitation hydroélectrique ou de protection contre les inondations. Ainsi, le programme national de recherche « Gestion durable de l'eau » (PNR 61) compte en complément des projets consacrés aux systèmes naturels, un axe de recherche sur les systèmes sociaux qui se préoccupe des mutations socio-économiques et des stratégies multisectorielles à mettre en place pour garantir la pérennité des écosystèmes et ressources aquatiques et des usages qu'en font les sociétés humaines. Et le sociopsychologue Heinz Gutscher de conclure sur une note optimiste: « La tendance est à l'intégration des sciences sociales dans la gestion des questions environnementales. Profitons-en ! »

- [1] Braunsch V., Home R., Pellet J., Arlettaz R. (2012): Conservation science relevant to action – A research agenda identified and prioritized by practitioners. *Biological Conservation* 153, 201–210.
- [2] Barraqué B., Isnard L. (2012): Urban water – When engineering met social science. *ParisTech Review*, www.paristechreview.com/2012/10/23/urban-water-engineering
- [3] Störmer E., Truffer B., Ruff A., Domiguez D., Maurer M., Klinker A., Herlyn A., Markard J. (2008): Nachhaltige Strategieentwicklung für die regionale Abwasserwirtschaft. Eawag Dübendorf, www.eawag.ch/rif-handbuch
- [4] Bundi U. (1981): Gewässerschutz in der Schweiz – Sind die Ziele erreichbar? Haupt-Verlag.
- [5] Bundi U., Güttinger H., Stumm W. (1987): Forschungspolitische Früherkennung im Gewässerschutz. Schweizerischer Wissenschaftsrat, Bern 1987.
- [6] Gebauer H., Truffer B., Binz C., Störmer E. (2012): Capability perspective on business network formation – Empirical evidence from the wastewater treatment industry. *European Business Review* 24 (2), 169–190.
- [7] Lienert J., Schnetzer F., Ingold K. (soumis): Stakeholder analysis combined with social network analysis provides fine-grained insights into water infrastructure planning processes.
- [8] Contzen N., Mosler H.-J. (2012): Factors determining the effectiveness of Oxfam's public health promotion approach in Haïti. <http://kurzurl.net/oxfam>



Entrée dans le manuel des denrées alimentaires

L'Office fédéral de la santé publique a intégré la méthode de cytométrie en flux développée par l'Eawag pour l'analyse de l'eau potable dans le manuel suisse des denrées alimentaires. Ce manuel est la compilation officielle des méthodes d'analyse recommandées ou obligatoires pour le contrôle de la qualité des denrées alimentaires, des additifs et des objets usuels. La cytométrie en flux livre des résultats beaucoup plus précis que la méthode classique de culture en boîte de Pétri pour l'appréciation de la qualité microbiologique de l'eau potable. Cette dernière ne permet en effet de détecter que les bactéries aptes à se développer sur milieu gélosé. Or celles-ci représentent à peine 1 % des microorganismes présents dans un échantillon d'eau. La cytométrie en flux est d'autre part beaucoup plus rapide que la méthode de comptage habituelle. Les résultats sont obtenus au bout d'un quart d'heure au lieu des jours ou semaines demandés par la technique classique. www.slmb.bag.admin.ch



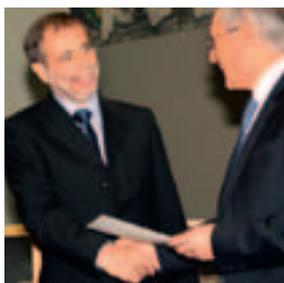
A quoi sert l'élimination des micropolluants?

Dans son projet interdisciplinaire «Eco Impact», l'Eawag souhaite évaluer les effets de l'élimination des micropolluants organiques dans les stations d'épuration sur la qualité et les fonctions écologiques des écosystèmes aquatiques. La Suisse prévoit en effet d'investir 1,2 milliards de francs sur les 20 prochaines années pour équiper 100 de ses 700 stations d'épuration d'installations de traitement supplémentaires pour réduire la pollution des eaux par les composés traces organiques provenant des médicaments, détergents, cosmétiques et autres pesticides rejetés dans les eaux usées. Dans un premier temps, «Eco Impact» évaluera les effets de ces polluants sur l'environnement aquatique. Par une combinaison d'études de laboratoire et de terrain, les scientifiques examineront les réactions à tous les niveaux d'organisation biologique – de l'échelle cellulaire à celle de l'écosystème. Dans une deuxième phase, ils étudieront les effets de la modernisation des stations d'épuration sur l'état des habitats aquatiques. Contact: christian.stamm@eawag.ch



Dübendorf inaugure l'ozonation dans l'épuration

En octobre 2012, la station d'épuration de Neugut à Dübendorf a posé la première pierre de sa future installation d'ozonation. Elle est la première de Suisse à se doter de cet équipement qui devrait être opérationnel à l'automne 2013. L'ozonation est utilisée depuis des décennies dans la préparation de l'eau potable pour l'élimination des microorganismes et des odeurs. L'ozone est un gaz extrêmement réactif qui s'attaque aux composés difficilement biodégradables et peut éliminer de nombreux micropolluants organiques. La nouvelle installation servira à la réalisation d'études à long terme qui permettront à l'Eawag et à ses partenaires d'optimiser le procédé et de développer de nouveaux systèmes de mesure et de contrôle. www.neugut.ch



Le père de Sodis honoré pour ses travaux

Le 24 novembre 2012, Martin Wegelin, le créateur du système de désinfection de l'eau par le soleil Sodis, s'est vu remettre à Coire un prix doté de 200 000 francs par la fondation Dr. J.E. Brandenberger. Avec son équipe, le chercheur qui a passé 25 ans à l'Eawag avant de le quitter en 2007, a développé et mis en pratique un dispositif permettant de produire de l'eau potable en exposant des bouteilles de polyéthylène remplies d'eau souillée aux rayons du soleil. Les recherches menées à l'Eawag avaient montré comment le rayonnement UV du soleil pouvait anéantir les germes pathogènes contenus dans l'eau non potable et mis en évidence les possibilités de diffusion de la nouvelle technologie dans le monde. La méthode est aujourd'hui utilisée par près de cinq millions de personnes dans 28 pays en développement et c'est à l'engagement, à la ténacité et à la curiosité de Martin Wegelin que Sodis doit son succès, a estimé le jury. Pour défendre l'invention, le chercheur n'avait pas hésité à parcourir le monde pour établir des partenariats et gagner le soutien des autorités locales et gouvernementales. Tandis que l'Eawag poursuit ses recherches sur les moyens de diffusion de Sodis, le projet en lui-même est progressivement confié aux soins de l'organisation d'aide au développement Helvetas qui en assurera pleinement la gestion à partir de 2015. www.sodis.ch



Départ à la retraite de Thomas Egli

Après 30 ans d'activité, l'ancien chef du département de Microbiologie de l'environnement, Thomas Egli, a cessé ses fonctions à l'Eawag au mois d'août 2012. Avec son équipe, il a notamment développé l'utilisation de la cytométrie en flux pour le contrôle de la qualité microbiologique de l'eau potable. Cette technique venue du domaine médical livre des résultats particulièrement fiables et rapides et pourrait bientôt remplacer les méthodes de comptage classiques. Ces travaux lui ont valu le Muelheim Water Award en 2010 et les honneurs de la Société suisse de l'industrie du gaz et des eaux (SSIGE).



Un nouveau chef pour les Eaux superficielles

Carsten Schubert a remplacé Alfred Wüest à la tête du département Eaux superficielles le 1^{er} septembre 2012. Ce biogéochimiste travaille depuis dix ans à l'Eawag et se consacre avec son équipe à l'étude de la dégradation de la matière organique par les bactéries dans l'eau et les sédiments des lacs dulçaquicoles.

De nouveaux professeurs issus de l'Eawag



Au mois de mai 2012, le conseil des EPF a élu **Alfred Wüest** au poste de professeur ordinaire de physique des systèmes aquatiques de l'EPF de Lausanne. Alfred Wüest est déjà professeur titulaire à l'EPF de Zurich et se consacre à l'étude des processus physiques au sein des lacs, des retenues et des cours d'eau. Pour sa part, **Max Maurer** a été nommé par ce même conseil professeur ordinaire en systèmes de gestion des eaux urbaines à l'EPF de Zurich au mois de septembre. Max Maurer dirige le département de Gestion des eaux urbaines de l'Eawag et travaille sur les potentialités et implications techniques des nouvelles approches de gestion des eaux urbaines et des nouvelles stratégies de planification des infrastructures de réseau. C'est également au mois de septembre que l'Université de Bâle a confié un poste de professeur titulaire à la scientifique **Hong Yang** du département Analyse des systèmes, évaluation et modélisation de l'Eawag. Elle consacre ses recherches à l'étude de l'impact de la disponibilité des ressources en eau et du commerce des denrées sur la sécurité alimentaire dans le monde. Hong Yang est internationalement connue pour ses travaux sur « l'eau virtuelle ».



Un prix de la fondation Gates pour des nouvelles toilettes

La fondation Bill et Melinda Gates a attribué un prix de 40 000 dollars au projet « Diversion Toilet » de l'Eawag et des designers viennois du bureau EOOS pour l'esthétique et la fonctionnalité de leurs toilettes. A travers le concours « Re-invent the Toilet Challenge », la fondation souhaite encourager la recherche sur les installations sanitaires du futur. Les nouvelles toilettes coûtent moins de cinq centimes par personne et par jour et fonctionnent sans raccordement aux égouts ni apport d'énergie extérieure en s'intégrant dans un système de recyclage des matières nutritives. Pour la responsable du projet, Tove Larsen, il était évident que le modèle présenté au concours devait se baser sur le principe de la séparation de l'urine et des matières fécales : « La technologie de séparation permet la récupération des matières premières et la réutilisation de l'eau. » L'équipe de designers et d'ingénieurs a imaginé des toilettes adaptées aux divers contextes culturels et ne consommant qu'un litre et demi d'eau par utilisation, l'eau grise étant filtrée sur une membrane pour être réutilisée. Les toilettes à séparation doivent s'intégrer dans un système novateur autofinancé qui inclut la collecte, le transport, le traitement et la valorisation des matières fécales. Les chercheurs doivent maintenant passer à l'étape de construction et de mise à l'essai des prototypes. www.eawag.ch/rttc

Notes

Nouvelles parutions



Dans le rapport **Abwasserentsorgung 2025** qui comporte un résumé détaillé français, l'Eawag dresse un état des lieux des connaissances sur la situation actuelle et le futur de l'assainissement en Suisse et met en évidence les lacunes à combler dans ce domaine. Le principal objectif est de compiler les savoirs disponibles dans le pays pour identifier les priorités d'action en vue d'assurer la pérennité du système d'évacuation et de traitement des eaux en Suisse, notamment dans le contexte déstabilisant des changements climatiques. http://library.eawag-empa.ch/schriftenreihe/schriftenreihe_21.pdf

Le livre **Chemistry of Ozone in Water and Wastewater Treatment: From Basic Principles to Applications** est une mine d'informations pour les chercheurs et les professionnels de l'ozonation. Le chercheur de l'Eawag Urs von Gunten et son coauteur Clemens von Sonntag y présentent de façon détaillée les réactions chimiques qui interviennent lors de l'ozonation et de la dégradation des micropolluants organiques par ce procédé. Il s'agit à la fois d'un ouvrage de référence pour la recherche et d'un manuel à l'usage des professionnels chargés de concevoir et d'utiliser les systèmes d'ozonation dans le cadre de la production d'eau potable ou du traitement des eaux usées. www.iwapublishing.com

Dans le cadre du projet de recherche « Gestion intégrée de l'espace fluvial », une série de documents de base sur l'écologie et l'aménagement des eaux dans le cadre des revitalisations de cours d'eau a été élaborée pour favoriser leur planification et leur réalisation. Le **recueil de fiches sur l'aménagement et l'écologie des cours d'eau** publié par l'Office fédéral de l'environnement à l'intention des services fédéraux et cantonaux ainsi que des bureaux d'ingénieurs et de conseil environnemental, rassemble les résultats de ce projet interdisciplinaire de l'Eawag, de l'Institut de recherche sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) et des écoles polytechniques de Lausanne et de Zurich. www.bafu.admin/publikationen/publikation/01678

Le livre **Source Separation and Decentralization for Wastewater Management** qui vient d'être publié par des chercheurs de l'Eawag traite des possibilités de traitement séparé des différents flux d'eaux usées domestiques. Scientifiques et professionnels y discutent des avantages et inconvénients du procédé et présentent diverses options techniques et conceptuelles. www.iwapublishing.com

Fiches thématiques et publications

L'Eawag publie sur son site des fiches d'information sur les principaux thèmes d'actualité. La dernière en date est consacrée à l'élimination des micropolluants : www.eawag.ch/medien/publ/fb

Toutes les publications des chercheurs et chercheuses de l'Eawag sont disponibles à la bibliothèque de l'Eawag Lib4RI. Celles en accès libre (« open access ») peuvent être téléchargées gratuitement : www.lib4ri.ch

Cours

26 février 2013
Eawag Dübendorf

Der Einsatz von umweltspsychologischen Massnahmen für Verhaltensänderungen im Umweltbereich

6 mars 2013
Eawag Dübendorf

Wasserwissen – die effiziente Informations-recherche

10–12 avril 2013
Eawag Dübendorf

Planning and Design of Sanitation Systems and Technologies

23 avril 2013
Eawag Dübendorf

Stoffflussanalyse und Modellierung

7 mai 2013
Eawag Dübendorf

Revitalisierung von Fließgewässern: Ansätze für die Priorisierung

7 juin 2013
Eawag Dübendorf

Drinking Water Quality in Developing Countries: Mitigating Geogenic Contamination

11–12 juin 2013
Eawag Dübendorf

Einführung in die Ökotoxikologie

19 juin 2013
Eawag Dübendorf

Auswirkungen der Re-Oligotrophierung auf Ökologie, Artenvielfalt und Funktion der Seen

Colloques

22 mars 2013
Stade de Suisse, Berne

Wasser überwindet Grenzen – Beispiele und Chancen in der Schweiz

16–19 juin 2013
EPF de Zurich

8th IWA Specialized Conference on Assessment and control of micropollutants and hazardous substances in water

Pour en savoir plus : www.eawag.ch/veranstaltungen