

Eawag

News

Autres contrées, autres flux de matières

Bangladesh: De l'arsenic dans les rizières – un danger réel? Page 9

Erythrée: Le compostage décentralisé – économiquement viable? Page 12

Vietnam: Boucler le cycle du phosphore. Page 21





Roland Schertenleib, membre de la Direction de l'Eawag et ancien chef du département «Eau et assainissement dans les pays en développement»

Trouver des solutions grâce à l'analyse des flux de matières

Dans les pays en développement et émergents, plus de 1,2 milliards de personnes n'ont pas accès à de l'eau potable et plus de 2,6 milliards de personnes ne disposent pas de toilettes dignes de ce nom. Une grande partie des déchets municipaux n'est pas collectée et encore moins éliminée de façon écologiquement compatible. De ce fait, les maladies infectieuses et parasitaires étroitement liées à ces déficits restent l'un des problèmes majeurs de ces pays. A ces calamités viennent maintenant s'ajouter des problèmes environnementaux aigus et chroniques que nos pays industrialisés connaissent depuis des décennies et qui gagnent aussi en importance dans les pays en développement.

Fort de son large spectre de connaissances, l'Eawag s'engage déjà depuis de nombreuses années dans la recherche de solutions répondant aux problèmes des pays en développement et émergents. Sa tâche consiste bien souvent à adapter aux conditions locales des méthodes utilisées avec succès dans les pays industrialisés. Ce travail s'effectue toujours en collaboration étroite avec des partenaires locaux. De ce fait, les projets de recherche servent aussi aux transferts de connaissances et permettent de renforcer les capacités de recherche des pays du Sud.

Au début des années 1980, la méthode de l'analyse des flux de matières appliquée aux substances et produits ayant une importance environnementale a été développée à l'Eawag. Elle est dès lors devenue un outil précieux de gestion environnementale et trouve une application pertinente dans l'analyse des problèmes urgents dans les pays en développement et émergents.

Ce numéro des Eawag News présente un certain nombre de projets internationaux dans lesquels des problèmes environnementaux sont abordés par le biais d'une analyse des flux de matières. Ainsi, la pollution des eaux par des charges excessives en substances nutritives pose un grand problème dans bien des pays, comme au Vietnam et en Thaïlande ou dans le lac Kivu, à

la frontière du Congo et du Rwanda. Au Bangladesh, les rizières sont irriguées avec une eau contenant de l'arsenic toxique. En collaboration avec ses partenaires locaux, l'Eawag cherche à savoir s'il s'accumule dans les champs et s'il représente un danger pour la population. Suite à la croissance démographique et à l'augmentation du niveau de vie qu'ils connaissent, les pays en développement et émergents produisent des quantités croissantes de déchets. Des analyses de flux de matières effectuées en Erythrée et à Cuba montrent comment les quantités de déchets à éliminer peuvent être réduites notamment par la voie du compostage et du recyclage. Pour pouvoir évaluer dans quelle mesure les différentes options proposées peuvent être effectivement mises en œuvre, l'analyse des flux de matières effectuée à Cuba a été complétée d'une étude sociologique révélant l'opinion de la population et des décideurs.

À l'heure actuelle, les analyses de flux de matières sont généralement utilisées pour la simulation de divers scénarios, ce qui permet de quantifier les effets écologiques de différentes solutions envisageables. Une telle démarche ne permet cependant pas d'apprécier le risque sanitaire ou d'évaluer les mesures visant une amélioration de la situation sanitaire. Or, ces aspects sont particulièrement décisifs dans les pays du Sud généralement confrontés à des taux élevés de maladies infectieuses et parasitaires. Pour répondre aux besoins dans ce domaine, il convient d'étudier les flux de pathogènes et de les combiner avec une évaluation quantitative du risque microbiologique (QMRA: Quantitative Microbiological Risk Assessment). L'Eawag a commencé à travailler sur ces défis avec l'Institut tropical suisse de Bâle.

Roland Schertenleib

Photo de couverture: Un jeune garçon du village de Srinagar, au Bangladesh, participe aux prélèvements dans une rizière submergée pendant la mousson. Le dispositif utilisé permet de prélever des échantillons d'eau à différentes profondeurs de sédiment. Vous en saurez plus en lisant l'article de la page 9 intitulé «De l'arsenic dans les rizières – un danger réel?». © Linda Roberts, Eawag

Sommaire

Article thématique

- 4 **Les flux de matières: de l'analyse à la gestion**
Correspondant à une sorte de compatibilité de l'environnement, l'analyse des flux de matières établit le bilan des substances et produits ayant un impact environnemental. L'Eawag applique de plus en plus largement cette méthode à l'étude de problèmes environnementaux aigus dans les pays en développement et émergents.

Recherches actuelles

- 9 **De l'arsenic dans les rizières – un danger réel?**
Au Bangladesh, les rizières sont souvent irriguées avec de l'eau souterraine riche en arsenic. L'Eawag mène sur place d'importantes campagnes de mesure.

- 12 **Le compostage décentralisé: économiquement viable?**
Une grande partie des déchets urbains des pays en développement est compostable. L'implantation de centres de compostage serait donc judicieuse d'un point de vue environnemental. L'Eawag a étudié en détail la situation de la ville d'Asmara en Erythrée.

Photos: Eawag



eawag
aquatic research

Editeur, Distribution: Eawag, Case postale 611, 8600 Dübendorf, Suisse, Tél. +41 (0)44 823 55 11, Fax +41 (0)44 823 53 75, www.eawag.ch

Rédaction: Martina Bauchrowitz, Eawag

Traductions: Laurence Frauenlob-Puech, D-Waldkirch

Conseiller linguistique: Fabrice Combes, F-Marseille

Copyright: Reproduction possible après accord avec la rédaction.

Parution: Irrégulièrement en français, allemand et anglais. Production chinoise en coopération avec INFOTERRA China National Focal Point.

Figures: Peter Nadler, Küssnacht

Maquette: TBS Identity, Zürich

Graphisme: Peter Nadler, Küssnacht

Impression: sur papier recyclé

Abonnements et changement d'adresses: Les nouveaux abonné(e)s sont les bienvenu(e)s! eawag.news@eawag.ch

ISSN 1420-3928

- 15 **Les flux de déchets à Santiago de Cuba**
La gestion des déchets pose un problème aux pays en développement. Ils ne sont en général pas éliminés de façon adéquate mais simplement mis en décharge. Que peut faire la population pour réduire les montagnes de déchets?

- 18 **Alerte! Trop de nutriments dans le Thaï-Chin**
L'intensification de l'agriculture dans le bassin du Thaï-Chin en Thaïlande a provoqué une dégradation de la qualité de ses eaux. Notre modélisation des flux de matières a montré qu'une grande partie des nutriments indésirables provenait de l'aquaculture locale.



- 21 **Boucler le cycle du phosphore**
A Hanoi, au Vietnam, de grandes quantités de substances nutritives disparaissent dans les eaux usées avant d'aller polluer le milieu naturel. Notre analyse a montré à quel niveau il était possible d'intervenir pour obtenir une gestion plus durable des nutriments.



- 24 **Des quantités inquiétantes de gaz au fond du lac Kivu**
Les grandes quantités de gaz contenues dans les eaux profondes du lac Kivu (RD du Congo/Rwanda) pourraient représenter un danger mortel pour les populations riveraines si elles remontaient à la surface. Des mesures récentes ont montré que les concentrations de gaz continuent d'augmenter au fond du lac. L'Eawag cherche à connaître les raisons de cette évolution.



Divers

- 27 **Publications**
- 30 **Forum: La maison économe**
Avec son nouveau bâtiment, le «Forum Chriesbach», l'Eawag apporte sa contribution à la société à 2000 watts et démontre que la construction durable n'est pas une utopie.
- 32 **Notes**

Les flux de matières: de l'analyse à la gestion



Hans-Peter Bader, spécialiste de physique théorique, dirige le groupe «Flux de matières dans l'anthroposphère».

Hans-Joachim Mosler, spécialiste de psychologie sociale et environnementale, dirige le groupe «Modélisation des systèmes sociaux»

Coauteur: Martina Bauchrowitz

L'analyse des flux de matières est une forme de comptabilité appliquée à l'environnement. Au lieu d'établir le bilan des fonds et capitaux, elle s'applique alors aux substances et produits ayant un impact environnemental. L'Eawag emploie de plus en plus fréquemment cette méthode pour l'analyse de problèmes environnementaux qui se posent de façon aiguë dans les pays en développement et émergents.

Au cours de son existence, chaque être humain provoque des flux importants de marchandises, de matières et d'énergie (Fig. 1) [1]. Ces flux ont fortement augmenté au cours des siècles derniers et ce, pour deux raisons principales: l'augmentation considérable de la population mondiale et la multiplication par un facteur pouvant aller jusqu'à 100 de la consommation par habitant. Cette évolution a une répercussion très nette sur l'environnement – aussi bien au niveau des sols que de l'air et de l'eau – et donc une influence sur la santé des populations humaines.

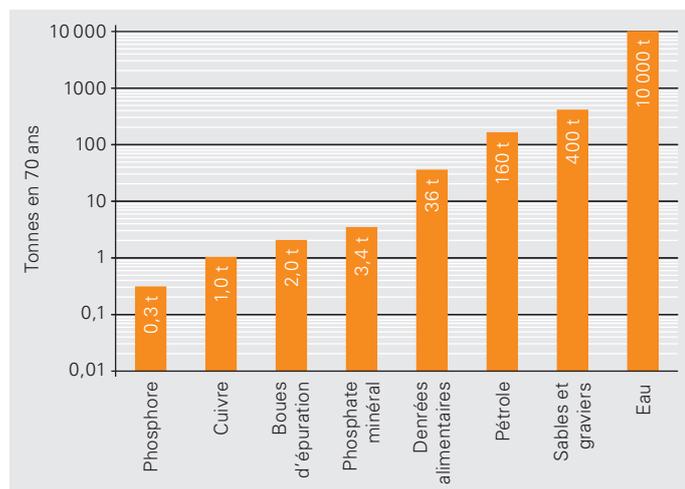
Une protection de l'environnement et de la santé plus efficace grâce à l'analyse des flux de matières. Dans la plupart des cas, l'impact des pollutions chimiques ou organiques ne devient cependant visible qu'au bout d'un certain temps, parfois très long. C'est par exemple ce qui s'est passé dans le cours inférieur

du fleuve Jintsu au Japon où une maladie endémique a décimé les travailleurs agricoles des rizières à la fin des années 1940. La maladie, à l'issue souvent fatale, se manifestait par des déformations très importantes du squelette et des douleurs insupportables. C'est pour cette raison qu'elle fut appelée «Itai-Itai» par les Japonais, ce qui signifie à peu près «Aïe-Aïe». Ce n'est qu'une vingtaine d'années plus tard que l'on s'aperçut que les personnes touchées souffraient en fait des suites d'une intoxication au cadmium. Dans une mine située en amont de la zone touchée était alors en effet pratiquée une extraction de zinc et de cadmium et les effluents de la mine venaient irriguer les rizières. Le cadmium était alors et est encore souvent utilisé pour la fabrication de colorants et de piles au nickel-cadmium de même que pour la protection anticorrosion et la stabilisation des plastiques. Il est largement répandu dans l'anthroposphère, c'est-à-dire dans l'environnement humain (Fig. 2) [2].

Cet exemple montre bien toute l'importance d'identifier et de localiser le plus tôt possible les flux de substances dangereuses ou indésirables. C'est là qu'intervient l'analyse des flux de matières [1]. Elle permet en effet de suivre le devenir des biens ou des substances au sein de l'anthroposphère de leur source ou formation jusqu'à leur stockage, élimination ou dégradation. Cette méthode est particulièrement intéressante pour l'étude et la gestion des problèmes environnementaux aigus car elle permet d'obtenir une vision d'ensemble du système concerné, de cerner les causes possibles de dérèglement et de proposer des solutions à partir d'un minimum de mesures de terrain, en s'aidant des données disponibles dans la littérature.

Avant de commencer à être utilisée dans la recherche environnementale au milieu des années 1980 [3], cette méthode connaissait une application efficace dans le domaine du génie chimique pour l'optimisation de la consommation de matières et d'énergie dans les processus de production [4]. Mais c'est dans le domaine économique qu'elle trouve son origine puisqu'elle y est couramment utilisée depuis les années 1930 [5].

Fig. 1: Quantité moyenne de matières transformées et/ou métabolisées par un être humain au cours de 70 ans d'existence (attention! échelle logarithmique).





Collecte des données: les exploitants d'une pisciculture thaïlandaise sont interrogés sur leurs pratiques d'alimentation des poissons.

L'Eawag analyse les flux de matières partout dans le monde.

Etant donné que la méthode de l'analyse des flux de matières a été développée en Europe, c'est tout naturellement dans ces pays qu'elle a trouvé ses premières applications. De nombreuses études ont été réalisées pour les systèmes les plus divers en Suisse, en Suède, en Hollande et dans le reste de l'Europe. Les matières étudiées étaient d'une part les marchandises de masse comme l'eau, le bois, les matériaux de bâtiment et l'énergie. On s'est d'autre part intéressé au devenir de produits isolés tels que l'azote et le phosphore, les métaux lourds (cuivre, fer, zinc, cadmium, mercure et plomb), le carbone, le soufre et le chlore en tant qu'éléments importants des cycles biogéochimiques.

A l'heure actuelle, l'Eawag est associé dans l'espace helvétique à un certain nombre d'études sur les substances ignifuges, les micropolluants, les biocides et les métaux lourds dans les ciments. Mais il s'implique aussi de plus en plus dans l'étude de flux de matières dans les pays en développement et émergents. L'objectif est alors généralement d'identifier rapidement les causes de problèmes environnementaux aigus et d'aider à l'optimisation de systèmes existants dans le domaine des eaux usées et des déchets.

Comment procède-t-on à une analyse des flux de matières?

Selon les données du problème, l'analyse des flux de matières

peut aller de la simple mesure et représentation des flux de systèmes simples à la description d'interdépendances systémiques complexes à l'aide de modèles mathématiques informatisés. Une analyse de flux standard effectuée par ordinateur comporte aujourd'hui les étapes suivantes:

- ▶ Définition du système à étudier: les limites spatio-temporelles du système à étudier doivent être définies avant de déterminer les substances dont on souhaite établir le bilan et définir le degré de résolution avec lequel le système sera étudié.

- ▶ Développement du modèle: à partir des connaissances disponibles sur le système, on procède tout d'abord à une identification des principaux compartiments (sol, eau etc.) et processus (ménages, agriculture, traitement des eaux usées etc.) entrant en jeu (Fig. 2). Les relations existant au sein du système sont ensuite traduites en termes mathématiques.

- ▶ Calibration du modèle: les données nécessaires à la paramétrisation du modèle sont collectées. Elles peuvent provenir de mesures directes, de la littérature, d'estimations ou d'expertises. Les paramètres sont les grandeurs caractéristiques du modèle; leurs variations correspondent à ses différents états. S'ils peuvent se baser sur des données de mesure telles que des concentrations ou des temps de séjour, il s'agit le plus souvent de grandeurs indirectes, comme par exemple des coefficients de transfert de matières, qu'il convient tout d'abord de calculer à partir des

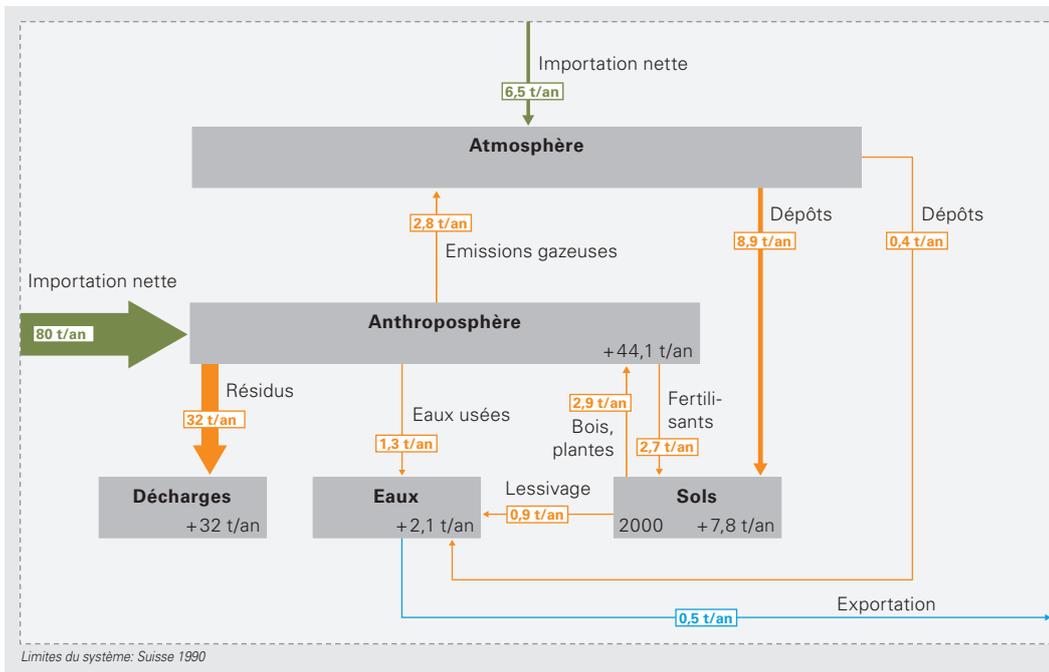


Fig. 2: Flux de cadmium (en tonnes) en Suisse en 1990 (données issues de [2]). Les chiffres indiqués en bas à droite dans les rectangles gris indiquent l'évolution du stock. Le chiffre indiqué en bas à gauche dans la case «sols» indique la quantité de cadmium qui s'y est accumulée dans le passé. On ne dispose pas de données équivalentes pour les autres compartiments.

données collectées. A travers l'estimation des paramètres, on cherche ensuite à évaluer le degré d'adéquation du modèle avec la réalité du système étudié.

► Identification des paramètres clés et possibilités d'amélioration du système: une fois calibré, le modèle est utilisé non seulement pour représenter l'état initial et réel du système mais aussi pour identifier les paramètres clés – il s'agit des paramètres provoquant la réaction la plus sensible au niveau des flux – à l'aide

SIMBOX

SIMBOX est un logiciel développé à l'Eawag pour la simulation des flux anthropogéniques de matières, de substances, d'énergie et de capitaux [6]. Il est aujourd'hui utilisé internationalement par les bureaux d'étude, les entreprises, les administrations et les instituts de recherche. Le système se met en place de manière graphique et interactive. Les caractéristiques du modèle sont ensuite définies dans une donnée par le biais d'équations mathématiques. Sur la base des données et équations enregistrées, SIMBOX calcule les flux (et les stocks), soit pour un état momentané (système stationnaire), soit en fonction du temps (système dynamique). SIMBOX dispose de différentes possibilités de représentation graphique des résultats de la modélisation: organigrammes ou diagrammes des flux, dynamiques temporelles, animations et autres représentations particulières. Le programme peut en outre recourir à l'analyse d'incertitude pour estimer la vraisemblance des résultats et à l'analyse de sensibilité pour déterminer les paramètres de modélisation jouant un rôle prépondérant dans la dynamique des flux de matières et d'énergie.

d'une analyse de sensibilité et pour simuler les effets de diverses solutions envisagées pour corriger les déficits éventuels.

► Interprétation des résultats: les résultats sont évalués et commentés avec tous les acteurs et personnes intéressées.

Pour faciliter l'analyse des flux de matières, l'Eawag a développé le programme de simulation SIMBOX (voir encadré). Les premières analyses de flux ont été réalisées sans modélisation [3]. L'importance des flux était estimée à partir des données, les résultats étant représentés sous forme graphique et les possibilités de modification du système discutées sur la base de ce schéma simplifié.

Collecte des données par mesure directe sur place. Les données nécessaires au modèle constituent la base de l'analyse des flux de matières. L'idéal est naturellement de disposer de données livrées par le dosage direct des substances à étudier. De telles mesures sont réalisables dans les systèmes géographiquement restreints comme celui analysé par Linda Roberts et Stephan Hug (cf. article p. 9). Leur étude portait sur les flux et concentrations d'arsenic dans une rizière. Depuis l'introduction des pompes à eau souterraine au Bangladesh, de l'arsenic est déversé en continu dans les rizières par le biais de l'eau d'irrigation. Les chercheurs de l'Eawag tentent de savoir comment l'arsenic se comporte dans l'environnement et s'il représente un danger pour les populations humaines.

Les mesures directes sont également indiquées pour l'étude de systèmes très particuliers. C'est par exemple le cas du lac Kivu, en Afrique centrale, dont il est question dans l'article de Martin Schmid p. 24. Ce lac renferme dans ses profondeurs de grandes quantités de gaz carbonique et de méthane. Si ces gaz étaient libérés à la surface, les habitants des rives et des vallées

proches périraient par asphyxie du fait de la privation d'oxygène que ce dégagement provoquerait. Des mesures récentes montrent que la teneur en méthane et donc le risque d'une explosion gazeuse a encore augmenté au cours des trois dernières années. L'Eawag cherche à déterminer les causes de cette évolution.

Comblement du manque de données par la voie d'estimations et d'expertises. Mais que faire lorsque le système à étudier est trop grand ou trop complexe pour pouvoir y effectuer suffisamment de mesures directes? On peut par exemple s'appuyer sur les données disponibles de la littérature scientifique (également provenant de systèmes comparables) et tenter de combler les lacunes par des estimations. Une telle démarche est par exemple possible lorsque des personnes ou parties prenantes impliquées dans le système peuvent être interrogées. Ainsi, pour évaluer la quantité d'aliment donnée aux poissons dans les aquacultures du bassin du Tha-Chin en Thaïlande, les chercheuses de l'Eawag Monika Schaffner et Irene Wittmer ont rencontré les pisciculteurs sur place et se sont informées sur les détails de leurs exploitations. L'objectif de leur projet était d'identifier les causes de la surfertilisation du Tha-Chin et de proposer des solutions pour la réduire (cf. article p. 18).

Un manque de données peut également être compensé par le biais d'expertises. Pour le projet qu'elle a mené dans la province de Hanoi au Vietnam, la chercheuse de l'Eawag Agnes Montanero s'est appuyée sur l'avis de divers experts (cf. article p. 21). Elle a ainsi pu estimer que le système de fosses septiques en usage dans cette région ne retenait que faiblement le phosphore. L'objectif du projet était ici aussi de trouver des moyens de réduire la charge nutritive des cours d'eau locaux. D'après les calculs effectués, le recours à un système de latrines à séparation d'urines contribuerait fortement à une amélioration de la qualité des eaux.

Evaluation des résultats. L'analyse des flux de matières se poursuit par une étape décisive d'évaluation des résultats. Celle-

ci vise à déterminer les effets réels des flux de matières sur l'environnement et la santé humaine. Elle ne peut cependant être réalisée à la seule aide de l'analyse des flux mais nécessite des connaissances supplémentaires dans divers domaines scientifiques tels que l'écotoxicologie, la biologie ou la limnologie. Il est ainsi indispensable de mettre en relation les données de l'analyse des flux de matières avec les «objectifs de qualité» écotoxicologiques (valeurs limite). Ces derniers indiquent en effet les concentrations maximales au-delà desquelles le danger environnemental et sanitaire devient trop important. L'évaluation doit également prendre en considération les flux de substances naturellement présentes dans la région étudiée.

Analyse des flux de matières et participation. Les résultats de l'analyse des flux doivent enfin être profitables au management environnemental et servir de base décisionnelle pour la définition de mesures adaptées. Pour répondre à ces besoins, l'analyse des flux de matières est de plus en plus souvent associée à des processus participatifs visant à impliquer le plus tôt possible les personnes et décideurs intervenant dans le système [7]. Il est alors judicieux de disposer d'une représentation claire et intelligible des données permettant une comparaison aisée de l'état actuel et des scénarios possibles tenant compte des différentes améliorations envisageables (Fig. 2).

Gestion: sondages d'opinion ciblés et élaboration concertée de solutions adaptées. Les représentants des différents groupes d'acteurs ou de la population civile peuvent par exemple être interrogés sur leurs opinions dans le cadre de sondages ou de séminaires. Pour savoir lequel des scénarios envisagés paraît le plus pertinent et aura donc les meilleures chances de succès, les participants peuvent être priés de noter les différents scénarios en fonction par exemple de leurs effets sur l'environnement, de leurs coûts et/ou de leur faisabilité. Si l'on souhaite d'autre part estimer s'il sera difficile de mettre en pratique les améliorations envisa-

Collecte des données: au Bangladesh, la teneur en arsenic est mesurée dans l'eau souterraine captée pour l'irrigation des rizières.



S. Hug, Eawag

Modélisation: à partir des données collectées, les flux de matières peuvent être modélisés et différents scénarios d'optimisation simulés.



S. Rothenberger, Eawag

gées, il est par exemple possible de demander aux participants avec quel engagement ils seraient prêts à participer aux mesures. C'est ce qu'a fait Hans-Joachim Mosler (cf. article p. 15) dans son étude sur les possibilités de réduction de la production de déchets ménagers à Santiago de Cuba. Dans le cadre d'un sondage, la population de la ville a été invitée à donner son opinion sur la gestion des déchets. L'une des questions portait spécifiquement sur la volonté des ménages de participer au tri sélectif, au compostage ou au recyclage des déchets.

En travaillant avec des groupes de petite taille ou de taille moyenne, il est d'autre part possible d'utiliser l'analyse des flux de matières pour tester de nouvelles solutions. En effet, les discussions de groupe laissent facilement émerger de nouvelles idées qui peuvent être immédiatement intégrées dans la simulation de nouveaux scénarios. Un processus consensuel peut alors se mettre en place, aboutissant bien souvent au rapprochement d'opinions divergentes à l'origine.

Convaincre les décideurs par une argumentation fondée et solide.

L'analyse des flux de matières se prête particulièrement bien à l'observation objective des flux au sein d'un système donné. Bien que chaque intervenant détienne déjà sa propre opinion sur les principales pollutions et sur leurs causes, il se voit forcé de reconsidérer la situation sous un angle impartial et fondé. Pour que les personnes acceptent de s'engager dans un tel processus et ne doutent pas des arguments qui leurs sont avancés, il est conseillé d'assurer leur participation dès le stade de l'élaboration de l'analyse des flux. Dans cet esprit, l'étude de Silke Rothenberger (cf. article p. 12) vise à convaincre les autorités de la ville d'Asmara en Erythrée de l'intérêt du compostage décentralisé des déchets organiques. Pour ce faire, aussi bien les flux de déchets que les coûts de traitement ont été mis en évidence. Les auto-

Aide décisionnelle: dans le cadre d'un séminaire, les résultats d'une analyse des flux de matières sont discutés et différentes améliorations proposées et mises à débat.



C. Wongsupap, Asian Institute of Technology, Bangkok

rités locales ont alors reçu à leur grande satisfaction une vision totalement nouvelle du système dont elles ont la gestion. Malgré cet accueil favorable, il n'est cependant pas certain que l'analyse des flux de matières permette, pour se tourner vers des solutions durables, de se défaire totalement des pratiques décisionnelles guidées par les intérêts personnels et les questions de pouvoir.

L'analyse des flux de matières étend son rayon d'action. Au cours des dernières années, la méthode de l'analyse des flux de matières s'est largement développée, aussi bien à l'Eawag qu'en d'autres lieux. En voici quelques exemples: combinaison avec d'autres méthodes de modélisation et extension aux systèmes dynamiques [1]; prise en compte de considérations économiques par la représentation de flux financiers et monétaires [8]; évaluation des résultats par la prise en compte d'expertises au travers d'un système de connaissances subjectif intégrant une fonction de probabilités [9]; recours aux démarches participatives pour faciliter l'élaboration et la mise en œuvre des solutions [6]; modélisation du devenir des substances dans les différents compartiments de l'environnement et évaluation des risques sanitaires en complément de l'analyse des flux [10]. En résumé, l'analyse des flux de matières est devenue un outil flexible et efficace du management environnemental. ○ ○ ○

- [1] Baccini P., Bader H.-P. (1996): Regionaler Stoffhaushalt, Erfassung, Bewertung und Steuerung, Spektrum Verlag, Heidelberg, 420 p.
- [2] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (1997): Cadmium – Stoffflussanalyse. BUWAL, Schriftenreihe Umwelt, Nr. 295, 74 S.
- [3] Baccini P., Brunner P. (1991): Metabolism of the anthroposphere. Springer Verlag, Berlin, 157 p.
- [4] Levenspiel O. (1962): Chemical Reaction Engineering: an introduction to the design of chemical reactors. Wiley, New York, 501 p.
- [5] Leontief W. (1936): Quantitative Input and Output Relations in the Economic Systems of the US. Review of Economic Statistics XVIII, 105–125.
- [6] www.eawag.ch/research/siam/software/d_simbox.html
- [7] Grimble R. & Wellard K. (1997): Stakeholder methodologies in natural resource management: a review of principles, contexts, experiences and opportunities. Agricultural systems 55, 173–193.
- [8] Bader H.-P., Scheidegger R., Real M. (2006): Global renewable energies: a dynamic study of implementation time, greenhouse gas emissions and financial needs. Clean Technologies and Environmental Policy 8, 159–173.
- [9] Holtmann X., Bader H.-P., Scheidegger R., Wieland R. (2005): SIMBOX-FUZZY: ein Tool zur Bewertung von Stoffflüssen basierend auf unscharfem Wissen. In: J. Wittmann, X.N. Thinh (Hrsg.) Konferenzband: Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften, Workshop Dresden, Shaker Verlag Aachen, S. 261–271.
- [10] Kwonpongsagoon S. (2006): Integration of substance flow analysis, transport and fate of materials in the environment, and environmental risk assessment for provision of information for regional environmental management: Cadmium as a case study in Australia. Thesis at University of New South Wales, Australia.



Linda Roberts, environmentaliste, prépare une thèse de doctorat sur ce sujet et Stephan Hug, chimiste, dirige le groupe «Chimie des ressources en eau»

De l'arsenic dans les rizières – un danger réel?

Dans une grande partie du Bangladesh, les rizières sont irriguées avec de l'eau souterraine riche en arsenic. A travers cette pratique, plus de 1000 tonnes d'arsenic sont déposées chaque année sur les sols agricoles. En collaboration avec des chercheurs du Bangladesh et de l'ETH de Zurich, l'Eawag a tenté de savoir ce que devenait cet arsenic: s'accumule-t-il dans le sol ou est-il remobilisé pendant la saison des pluies?

Sous bien des aspects, le Bangladesh est un pays des extrêmes. Il est situé dans le plus grand delta du monde, formé par le Gange, le Brahmapoutre et la Meghna. Sur une surface de 144000 km², soit trois fois et demie la Suisse, vivent plus de 147 millions de personnes. Alors que le pays est presque entièrement inondé pendant la mousson qui s'étend de juillet à octobre, il connaît une grande sécheresse tout le reste de l'année. Avec un revenu par habitant d'à peine 440 US\$ par an [1], le Bangladesh doit faire face à de grandes difficultés tant économiques qu'écologiques et sociales. Le pays connaît une stabilité politique relative et le gouvernement élu démocratiquement mène des actions fructueuses pour tenter d'améliorer la situation générale. L'une de ses tâches les plus ardues est l'approvisionnement de la population en eau, aussi bien pour la consommation que pour l'irrigation.

De l'arsenic dans l'eau potable. A partir de 1970, le pays a entrepris avec l'aide internationale de passer d'un approvisionnement

en eau essentiellement basé sur les eaux superficielles à une exploitation des ressources souterraines. Aujourd'hui, plus de 10 millions de puits tubulaires actionnés par des pompes manuelles approvisionnent la quasi-totalité de la population rurale, ce qui a permis de combattre efficacement les maladies infectieuses transmises par l'eau et peut donc être considéré comme un grand succès. Malheureusement, les autorités ont alors manqué de contrôler la qualité chimique de l'eau ainsi captée. De 1992 à 1998, plusieurs études ont révélé que près d'un quart des puits livraient une eau contenant plus de 50 µg d'arsenic par litre [2]. L'arsenic (As) est un contaminant dit géogène des eaux souterraines: il est naturellement présent dans les sédiments et se dissout peu à peu dans les eaux souterraines en vertu des conditions anaérobies. La consommation d'eau arsénifiée peut entraîner une intoxication chronique. Touchant entre 30 et 50 millions de personnes, cette calamité est considérée par l'OMS comme la plus grande intoxication collective de l'histoire de l'humanité [3]. Le seuil fixé par l'OMS, les USA et l'UE pour l'eau potable est de 10 µg As/l.

Des pompes d'irrigation à moteur diesel alimentent les rizières avec de l'eau souterraine arsénifiée.



S. Hug, Eawag

Dépôts d'arsenic dans les rizières. Tout comme la consommation d'eau de boisson, l'utilisation agricole des eaux souterraines arsénifiées pose un problème considérable. Grâce à la culture irriguée du riz «boro» pendant la saison sèche, la production de riz a pu augmenter à la même vitesse que la population. Venant compléter la culture traditionnelle du riz «aman», le boro constitue aujourd'hui 50% de la récolte totale et assure ainsi l'autosuffisance alimentaire du Bangladesh [4]. Comme les puits d'eau potable, la plupart des pompes d'irrigation prélèvent de l'eau de 30 à 60 m de profondeur, là où les concentrations en arsenic sont les plus élevées. De janvier à mai, les champs sont irrigués avec environ 1 m d'eau souterraine. On estime donc à 1000 tonnes la quantité totale d'arsenic ainsi déposée dans les rizières du pays [5]. La question du devenir de cet arsenic est une question de survie pour l'agriculture bengali comme pour la population. En effet, si l'arsenic s'accumule au cours des ans, la contamination des sols ira croissant et l'arsenic se retrouvera dans les denrées

alimentaires. A long terme, les rendements peuvent faiblir et les sols peuvent devenir impropres à tout usage agricole.

Un danger pour les cultures et la population humaine? Certaines études montrent que les concentrations en arsenic augmentent fortement dans les couches superficielles du sol pendant la période d'irrigation pour redescendre à la faveur de la mousson [6]. Ces analyses ont cependant été menées avec une incertitude trop grande et une résolution spatiale trop faible pour permettre l'établissement de bilans de matières et donc servir de base à des prévisions à long terme. S'il est exact que les concentrations en arsenic diminuent dans le sol après leur inondation, il faut se demander dans quel compartiment il est alors transféré. Est-il évacué avec les eaux vers la mer ou se diffuse-t-il dans les couches plus profondes du sol?

Des dosages d'arsenic effectués dans des plants de riz adultes ont montré que les concentrations étaient fortement accrues dans les racines, modérément accrues dans les tiges et les feuilles et quasiment normales dans les grains [6, 7]. Ces résultats sont rassurants à court terme et laissent espérer qu'il n'y aura pas lieu de redouter dans les prochaines années de contamination des denrées alimentaires par l'arsenic qui viendrait s'ajouter au problème de l'eau potable. Reste à savoir comment la situation évoluera à long terme.

Projet commun de l'Eawag, l'ETH Zurich et de l'Université de Bangladesh. Pour répondre à de telles interrogations, l'Eawag s'engage depuis début 2005 dans un projet commun avec le groupe Chimie du sol de l'Institut de biogéochimie et de la dynamique de polluants de l'ETH Zurich (IBP) et la Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET) financé par le Fonds Nationale Suisse. La stratégie de recherche est de se limiter à un petit nombre de champs dans une zone de production typique pour y mener une étude détaillée des processus qui s'y déroulent. Les résultats doivent servir de base à une modélisation des flux de matières de manière à obtenir des modèles applica-

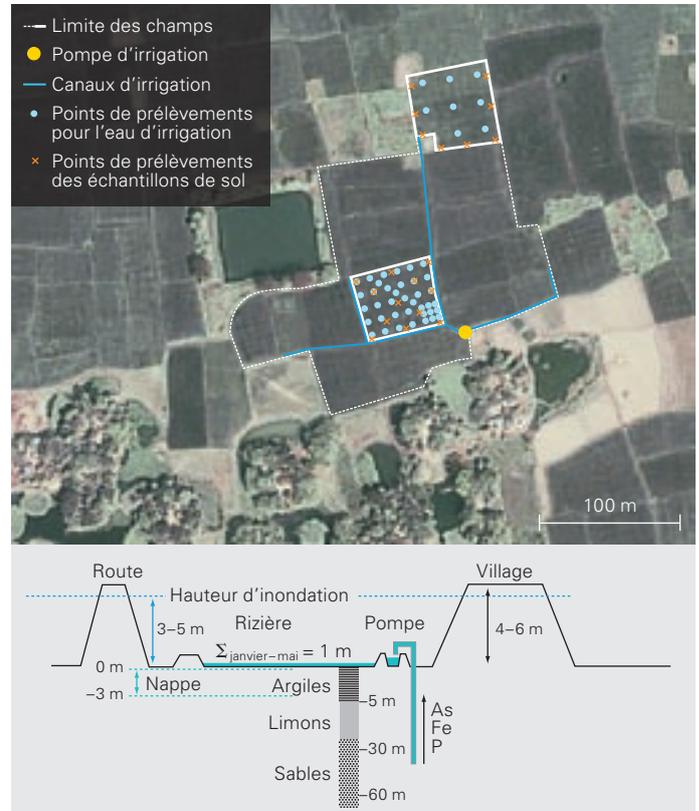
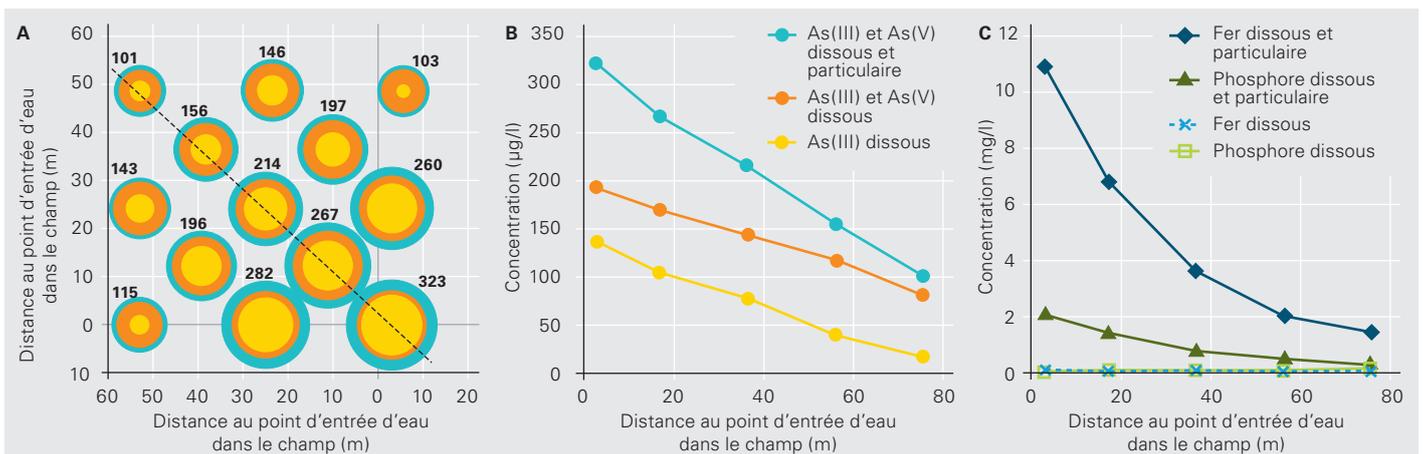


Fig. 1: Représentation de la zone d'étude de 3 hectares en image satellite (en haut) et en coupe verticale (en bas). Pour éviter qu'ils ne soient inondés pendant la mousson, les routes et les villages sont construits sur des promontoires artificiels en terre.

bles aux autres régions. En parallèle, les aspects hydrologiques et géochimiques sont étudiés par des équipes des Etats-Unis, du Bangladesh et de l'Eawag.

La zone d'étude (Fig. 1) se situe à 40 km au sud de Dhâkâ, dans le district de Munshiganj, à proximité du village de Srinagar.

Fig. 2A: Concentrations d'arsenic ($\mu\text{g/l}$) dans l'eau des champs 1-2 heures après la fin de leur irrigation. 2B et 2C: Concentrations d'arsenic, de fer et de phosphore le long de la diagonale indiquée en 2A. La baisse de la concentration d'arsenic est due à sa précipitation avec des hydroxydes de fer.



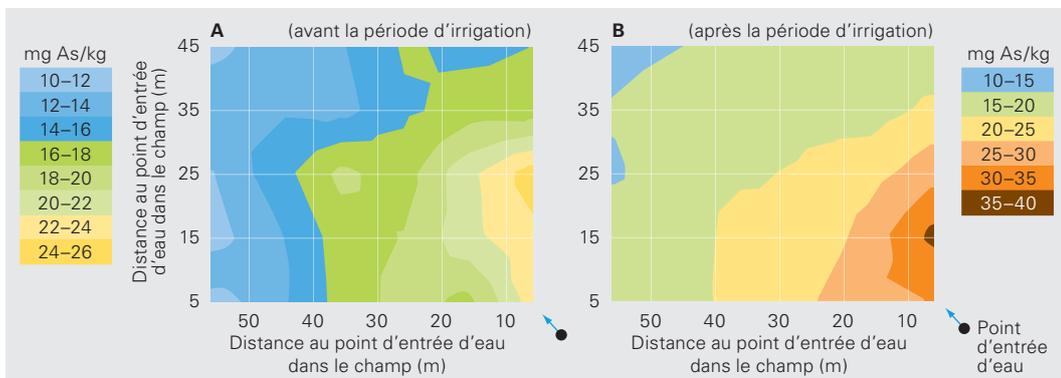


Fig. 3: Concentrations d'arsenic dans les couches supérieures du sol (0–10 cm) avant (A) et après (B) la période d'irrigation de janvier à mai 2005 (Jessica Dittmar, Andreas Voegelin und Ruben Kretzschmar, IBP, ETH Zurich).

Seul le riz boro est cultivé dans cette zone de production. Dans le périmètre de l'étude, une pompe alimente plusieurs champs en eau souterraine grâce à un système de canaux pouvant être ouverts ou refermés avec de la boue selon les besoins. Les phases d'irrigation qui durent de 3 à 5 heures et qui permettent d'immerger les champs sous une pellicule d'eau de 3 à 10 cm d'épaisseur, sont espacées de plusieurs jours au cours desquels les champs peuvent s'assécher.

L'arsenic forme avec l'hydroxyde de fer des microparticules qui se déposent sur le sol. Dans une première campagne de mesures, nous avons cherché à savoir ce qu'il advenait de l'arsenic pendant et après l'irrigation. Etant donné que l'arsenic réagit tout particulièrement avec le fer et les phosphates, nous avons également dosé ces substances. L'arsenic est présent sous deux formes différentes selon son degré d'oxydation: l'As(III) qui est la forme arsénée stable en milieu réducteur et l'As(V) qui domine en conditions oxydantes. As(III) se lie assez faiblement aux surfaces minérales et présente donc une grande mobilité dans l'eau tandis que As(V) s'adsorbe fortement à la surface des minéraux et notamment des oxydes de fer.

Le fer(II) dissous dans l'eau souterraine dépourvue d'oxygène s'oxyde au contact de l'air en l'espace de 30 à 60 minutes pour former du fer(III). Il y a alors apparition d'hydroxydes de fer(III) de coloration brune, susceptibles de lier totalement ou partiellement l'As(V), les phosphates ou d'autres substances auparavant dissoutes. Nos analyses ont montré que ces particules très fines se formaient en partie déjà dans les canaux mais que, ne pouvant s'y déposer, elles étaient entraînées dans les champs. L'apport de l'arsenic dans les rizières ne dépend donc pas de la distance entre les champs et la pompe. Une fois que l'eau sort du canal pour se déverser dans un champ, l'écoulement se ralentit et il lui faut de 2 à 3 heures pour atteindre les points les plus reculés. Pendant ce laps de temps, les hydroxydes de fer se déposent en grande partie sur le sol, entraînant avec eux une partie de l'arsenic contenu dans l'eau (Fig. 2). Ce phénomène a pour conséquence une répartition hétérogène de l'arsenic dans le sol et dans l'eau. Deux jours après l'irrigation, le fer, l'arsenic et les phosphates ont presque totalement disparu de l'eau. L'hétérogénéité de la distribution de l'arsenic dans les champs se retrouve dans les échantillons de sol pris à la fin de la période d'irrigation (Fig. 3).

L'arsenic accumulé dans le sol est remobilisé au moment de la mousson. Qu'advient-il de l'arsenic pendant la mousson, lorsque les champs sont inondés pendant 4 à 5 mois par les eaux fluviales et pluviales? Nous avons pu démontrer que les concentrations d'arsenic dans le sol baissaient considérablement pendant cette période. Ce phénomène s'explique probablement par la dissolution des (hydr)oxydes de fer en milieu à nouveau réducteur, l'arsenic adsorbé étant alors remis en solution. De premières mesures effectuées dans la colonne d'eau d'un champ de riz inondé ont montré qu'une partie de l'arsenic mobilisé était entraîné avec les crues. Les teneurs en arsenic mesurées à titre de comparaison dans le sol à la fin de la saison des pluies en décembre 2004 et 2005 étaient du même ordre de grandeur. L'hétérogénéité de la distribution de l'arsenic dans le sol indique cependant que l'irrigation des champs avec l'eau souterraine arsénée telle qu'elle est pratiquée depuis une quinzaine d'années dans notre zone d'étude a entraîné une certaine accumulation.

Des études détaillées sont encore nécessaires pour déterminer la part de l'arsenic qui s'accumule dans les couches profondes du sol et celle qui se trouve entraînée par les crues. Le transfert de l'arsenic dans les horizons profonds constitue en tout cas un phénomène bien plus préoccupant que son transport latéral vers la mer où une dilution suffisante le rend inoffensif. ○ ○ ○

- [1] <http://www.bangladeshinfo.com/business>
- [2] Kinniburgh D.G., Smedley P.L. (2001): Arsenic contamination of groundwater in Bangladesh, Final Report Summary. British Geological Survey & Bangladesh Department for Public Health Engineering.
- [3] Smith A.H., Lingas E.O., Rahman M. (2000): Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency. Bulletin of the World Health Organization 78, 1093–1103.
- [4] Ministry of Agriculture Bangladesh (2005): Handbook of Agricultural Statistics. <http://www.moa.gov.bd/statistics/statistics.htm>
- [5] Saha G.C., Ali M.A. (2006): Dynamics of arsenic in agricultural soils irrigated with arsenic contaminated groundwater in Bangladesh. Science of the Total Environment, in press, available online 24 October 2006.
- [6] Roberts L.C., Dittmar J., Saha G.C., Hug S.J., Voegelin A., Kretzschmar R., Ali M.A., Badruzzaman A.B.M. (2006): Spatial heterogeneity of arsenic input to paddy soil through irrigation water in Bangladesh. Conference Proceedings, International Symposium on Environmental Sustainability (ISES), February 7–9, Dhaka, Bangladesh.
- [7] Abedin M.J., Cotter-Howells J., Meharg A.A. (2002): Arsenic uptake and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) irrigated with contaminated water. Plant Soil 240, 311–319.

Le compostage décentralisé : économiquement viable?



Silke Rothenberger, ingénieur économiste, est directrice de projet dans le domaine de la gestion des déchets au sein du département Sandec – «Eau et Assainissement dans les Pays en Développement»
Coauteurs: Chris Zurbrügg et Christian Müller

Dans les pays en développement, certains projets pilotes ont démontré à petite échelle l'intérêt et l'utilité des installations de compostage décentralisé. Mais quel serait l'effet d'une implantation à grande échelle de ce type d'installation sur la gestion des déchets au niveau communal? Prenant le cas de la ville d'Asmara en Erythrée, l'Eawag a utilisé un nouveau modèle pour étudier les flux et les coûts d'évacuation des déchets et pour évaluer différents scénarios de gestion.

Une grande partie des déchets urbains produits dans les pays en développement est compostable. Suivant le degré de développement et les modes d'alimentation, leur proportion peut atteindre entre 50 et 70%. Dans la plupart des cas, ces déchets sont cependant directement mis en décharge et les précieuses substances nutritives qu'ils renferment sont irrémédiablement perdues. Les installations de compostage décentralisé peuvent alors être d'une grande utilité. Ces centres de petite taille assurent en effet le ramassage, le tri et le compostage de jusqu'à trois tonnes de déchets provenant de leur voisinage. Leur intérêt ne réside pas seulement dans le recyclage des matières nutritives mais aussi dans l'amélioration des conditions d'hygiène locales et dans la réduction des quantités de déchets transportés et mis en décharge.

Il est cependant rare que ces petites installations de compostage soient intégrées au système municipal de traitement des déchets. Elles ne sont en général que tolérées par les autorités locales. Le compostage décentralisé présente pourtant bien des avantages et pourrait jouer un rôle stratégique important dans la gestion des déchets à l'échelle communale. Pour en convaincre les autorités locales, il fallait avant tout disposer d'une analyse fon-

dée des flux de déchets et des coûts engendrés. Or, jusqu'à présent, ce type de données n'a presque jamais été relevé au niveau municipal dans les pays en développement. C'est à ce niveau de la démarche que l'Eawag est entré en jeu.

Analyse des flux de matières et analyse des coûts par activité.

Nous avons utilisé une méthode combinant analyse des flux de matières et analyse des coûts par activité pour évaluer l'influence du compostage sur la filière du traitement des déchets au niveau municipal. Les processus et activités intervenant dans la gestion communale des déchets et les flux de déchets ont été représentés par un modèle. Les flux de déchets ont ensuite été mis en relation avec les coûts des processus impliqués. Un des grands avantages de notre modèle est qu'il permet en très peu de temps de simuler différents scénarios en faisant intervenir d'autres processus: par exemple, le traitement des déchets au niveau communal avec ou sans compostage. Enfin, le modèle décrit comment des changements dans le déroulement des processus et donc dans les flux de déchets modifient les coûts du traitement des déchets dans son ensemble. Notre modèle a été développé sur la base de notre expérience dans le domaine de la gestion des déchets au niveau communal dans les pays en développement et a été testé pour la première fois dans le cas de la ville d'Asmara en Erythrée.

Une balayeuse en train de ramasser des déchets verts à proximité du marché.



Photos: S. Rothenberger, Eawag

Le compostage décentralisé permet de réduire les quantités de déchets et les transports vers les décharges.

En Erythrée, nos recherches ont été effectuées en collaboration avec l'Université d'Asmara et l'administration communale [1–3]. Asmara ne dispose pas encore de centre de compostage. Une étude fait cependant état d'une forte demande en compost au niveau de l'agriculture périurbaine [4]. La Figure 1A illustre le modèle représentant la gestion des déchets d'Asmara en 2004. Pendant cette année, la Ville a ramassé et mis en décharge une quantité totale de 44 364 tonnes de déchets. 17 745 tonnes principalement composées de poussières, de feuilles et de petits emballages, ont été ramassées dans les rues par les balayeurs. Les ordures ménagères ont été, soit collectées par le service de ramassage, soit directement jetées par les particuliers dans les bennes à ordures

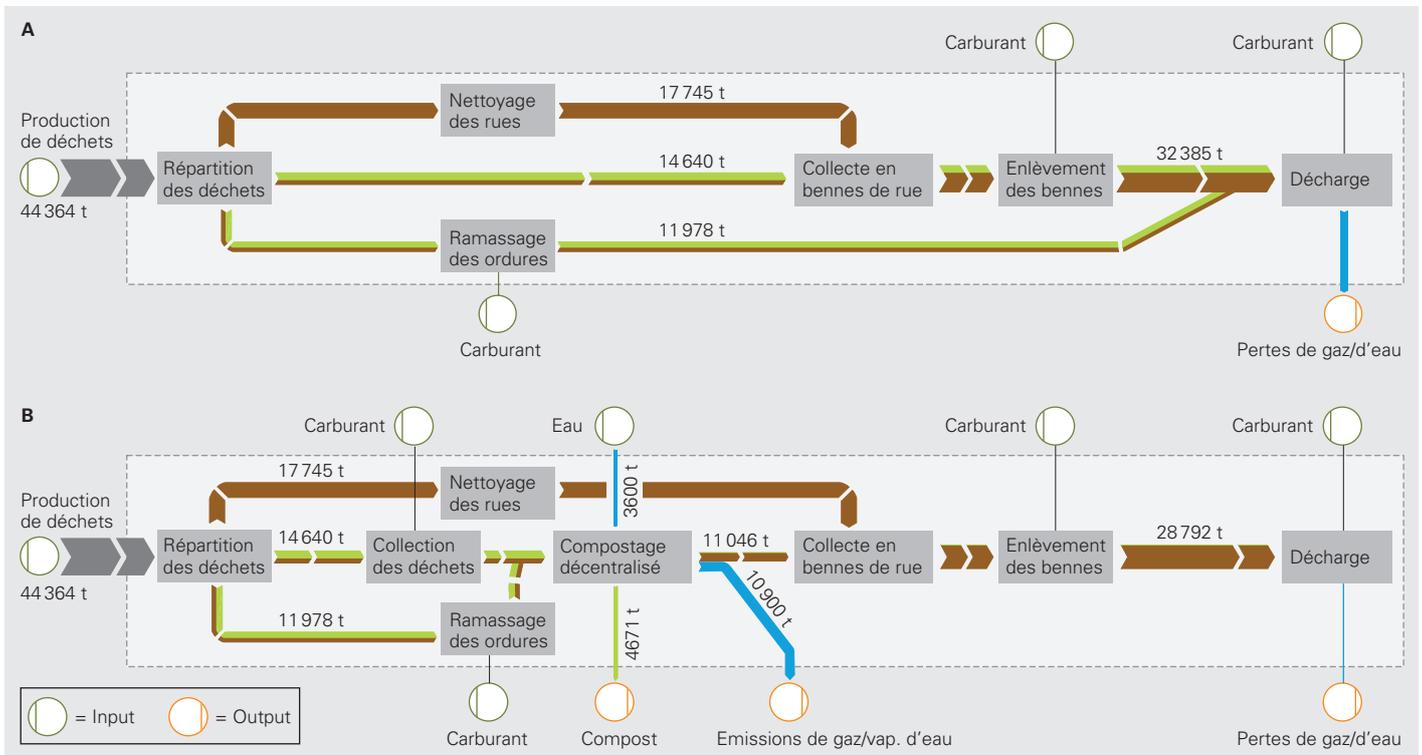


Fig. 1: Processus et flux de matières dans le système actuel de gestion des déchets d'Asmara sans compostage (A) et dans un scénario prévisionnel mettant en jeu un compostage décentralisé (B). L'épaisseur des flèches est proportionnelle aux flux. En gris: déchets mixtes, en vert: déchets verts, en marron: déchets résiduels.

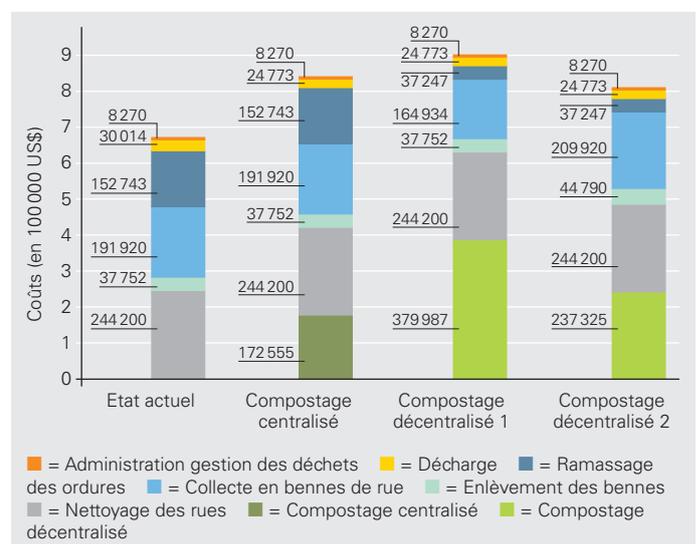
mises à disposition par la ville. Ces bennes de rue sont remplacées régulièrement et, tout comme les camions de collecte, sont vidées à la décharge située à 6 km de la ville. Le modèle tient également compte, pour le calcul des coûts, de la consommation en carburant entraînée par le transport des déchets. Près de 52% des déchets d'Asmara sont biodégradables et peuvent donc être compostés. Le modèle prend d'autre part en considération les frais administratifs de la gestion des déchets.

La Figure 1B présente un scénario dans lequel les déchets sont triés avant le transport en décharge dans des stations décentralisées réparties sur le territoire municipal, la part organique étant alors compostée sur place. Seuls les déchets résiduels et ceux collectés par le balayage des rues se retrouvent en décharge. Le compostage décentralisé permet non seulement de réduire la quantité de déchets de 35%, taux mesurable à partir des émissions de CO₂ et de vapeur d'eau, mais aussi de diminuer sensiblement les transports liés aux déchets. La quantité de déchets évitée correspond à environ 500 chargements de camions. De plus, la durée d'utilisation de la décharge est ainsi prolongée d'environ 30%. Pour une durée d'utilisation de 20 ans, ce gain est de 6 ans. Par le biais de l'analyse des coûts par activité, toutes ces modifications peuvent être exprimées et représentées en termes monétaires.

Chaque amélioration du système entraîne des coûts supplémentaires. La Ville d'Asmara dépense annuellement près de

670 000 US\$ pour l'évacuation de ses déchets. A l'aide des services administratifs de la ville nous avons déterminé la répartition des dépenses d'une part en fonction de la structure des coûts (salaires, entretien, carburant, amortissements etc.), d'autre part

Fig. 2: Analyse des coûts par activité dans le système actuel de gestion des déchets d'Asmara, Erythrie, et dans trois scénarios faisant intervenir un compostage.





Ramassage des ordures à Asmara. Les enfants et les femmes sortent les poubelles dès qu'ils entendent le signal du camion de collecte.

en fonction des différents processus mis en évidence par l'analyse des flux de matières. A travers cet exercice, les responsables locaux ont gagné à leur grande satisfaction une vision entièrement nouvelle et étonnamment transparente de leur filière. Dans l'ensemble, 57% du budget alloué au traitement des déchets sont consacrés au ramassage et au transport (Fig. 2, colonne de gauche).

Nous avons modélisé la situation actuelle de la gestion des déchets d'Asmara ainsi que trois scénarios basés sur des options différentes (Fig. 2). Le scénario «compostage centralisé», qui envisage le traitement de 180 tonnes de déchets par jour dans un grand centre de compostage situé sur le site de la décharge, entraînerait des dépenses annuelles supplémentaires de l'ordre de 167 000 US\$. Le scénario «compostage décentralisé 1» est basé sur l'implantation de 60 installations de compostage réparties sur le territoire communal. Il entraînerait un surcroît de dépenses d'environ 213 000 US\$ principalement dû à la rétribution du personnel supplémentaire nécessaire. Dans le scénario «compostage décentralisé 2» (cf. Fig. 1B), seules les ordures ménagères sont traitées dans les centres de compostage. Les déchets issus du nettoyage des rues sont collectés séparément et acheminés directement vers la décharge. De ce fait, le système ne nécessite pour le traitement des déchets restants que 36 installations au lieu des 60 du scénario 1. Dans ce cas de figure, les frais annuels n'augmenteraient que de 140 000 US\$ et seraient donc inférieurs à ceux du scénario «compostage centralisé». Le compostage décentralisé s'avère donc avantageux pour l'ensemble du système lorsque son application se limite à certains flux de déchets particulièrement riches en matières biodégradables. L'économie de moyens s'explique par les besoins réduits de collecte et de transport: les coûts sont 30% plus faibles que dans la situation actuelle.

L'analyse des coûts par activité augmente la transparence.

Notre analyse des coûts montre que toute amélioration du système de gestion des déchets est génératrice de frais supplémentaires, quel que soit le type de compostage, centralisé ou décentralisé, qu'elle met en œuvre. La décomposition détaillée de la structure des coûts permet cependant de mettre en évidence et donc de comparer des avantages et inconvénients inhérents

aux différentes solutions envisagées. Bien que l'exploitation d'un grand nombre d'installations de compostage décentralisé soit plus onéreuse que celle d'un centre de compostage unique, les économies réalisées au niveau des transports sont un avantage décisif des systèmes décentralisés. Dans le cas de figure le plus favorable, le scénario «compostage décentralisé 2» permet de réaliser 113 300 US\$ d'économie (Fig. 2, colonne 4). Ajoutées aux revenus potentiels de la vente du compost (estimés à 6000 US\$ par an), ces économies permettent de couvrir la moitié des coûts engendrés par les systèmes décentralisés. Une telle compensation ne peut intervenir dans le scénario «compostage centralisé», puisque les frais de transport y restent inchangés.

Un autre avantage du compostage décentralisé est de soulager le maillon le plus faible de la chaîne d'évacuation des déchets, c'est-à-dire les transports. L'utilisation et l'entretien des engins de collecte posent souvent des difficultés tant techniques que financières dans bien des pays en développement. Dans le cas d'Asmara, le compostage pourrait libérer des capacités de transport qui pourraient éventuellement être mises à profit pour assurer le raccordement au service de ramassage de quartiers non encore desservis. Le problème devient encore plus crucial lorsqu'une décharge atteint sa capacité maximale de stockage et qu'une nouvelle doit être aménagée à une distance encore plus grande de la ville. Au lieu d'engager de nouveaux moyens dans le parc de véhicules et dans l'extension des décharges, il serait plus judicieux d'investir dans le compostage décentralisé. Une analyse détaillée du système est présentée dans le rapport de Müller [1].

Analyse des flux de matières et calcul des coûts par activité: de nouveaux instruments de planification. L'approche méthodologique présentée ici permet non seulement de prédire les répercussions financières possibles sur la gestion des déchets au niveau municipal, mais facilite également le travail de planification des autorités locales. La représentation des flux de déchets et la décomposition des coûts en fonction des différents processus sont cependant des approches très nouvelles pour la plupart des administrations communales des pays en développement, et leur mise en œuvre nécessite donc de grands efforts de formation. Pour l'heure, une discussion des résultats de l'étude et de leurs possibilités d'application est en cours avec les autorités à Asmara et d'autres administrations. Celles-ci se montrent particulièrement intéressées par une extension éventuelle du modèle à la gestion des déchets au niveau régional. ○ ○ ○

- [1] Müller C. (2006): Decentralised composting in developing countries – Financial and technical evaluation. Diplomarbeit, Sandec, Dübendorf, 85 p.
- [2] Kubrom T., Mehari S., Wegmann M. (2004): Economic valuation of decentralised composting – Case study report of Asmara, Eritrea. University of Asmara, College of Asmara, 80 p.
- [3] Drescher S., Müller C., Kubrom, T., Mehari, S., Zurbrügg C., Kyzia S. (2006): Decentralised composting – Assessment of viability through combined material flow analysis and cost accounting. Proceedings, Orbit 2006 Conference, Weimar, pp. 1215–1227.
- [4] Drescher S., Ogbazghi W., Mehreteab T.M., Kubrom T., Mehari S. (2005): Benefits and risk of the use of organic matter from the Asmara landfill in agriculture, Final Report, Sandec, Dübendorf, 79 p.

Les flux de déchets à Santiago de Cuba



Hans-Joachim Mosler, zoologiste et professeur titulaire de psychologie sociale et environnementale à l'Université de Zurich, dirige le groupe «Modélisation des systèmes sociaux» de l'Eawag

La gestion des déchets pose un problème d'importance aux pays en développement. Avec l'augmentation du niveau de vie augmente aussi la quantité de déchets produits. En général, ces déchets ne sont pas traités de manière adéquate mais simplement entreposés dans des décharges. Telle est également la situation à Santiago de Cuba. Mais que peut faire la population pour réduire l'amoncellement des déchets?

Forte de quelque 500 000 habitants, Santiago de Cuba est la deuxième ville cubaine. Si elle dispose d'un assez bon système de collecte des déchets, les possibilités de traitement, telles que l'incinération, la production de biogaz ou le compostage, font défaut. Les déchets sont entièrement entreposés dans une décharge à ciel ouvert, ce qui n'est pas sans conséquences pour la population et l'environnement: pollution des eaux, du sol et de l'air, propagation de maladies par les rongeurs et volatiles.

Etant donné qu'il est fort peu probable que Santiago de Cuba se voit dotée d'installations de traitement dans un avenir raisonnablement proche, la question qui se pose est celle de savoir ce qui peut être entrepris au niveau des ménages pour que la quantité de déchets arrivant en décharge soit la plus faible possible. Pour tenter de trouver une réponse à cette question, nous avons effectué en collaboration avec nos partenaires cubains de l'Institut de sociologie de l'Universidad del Oriente de Santiago de Cuba une analyse des flux de matières de la ville et mené une enquête auprès des ménages [1-4].

Les acteurs de la gestion des déchets. Etant donné que Cuba souffre d'une pénurie de ressources, l'Etat investit des moyens importants dans des campagnes de sensibilisation au recyclage des déchets. Le verre, le plastique, les métaux de toute sorte, le papier et le carton contenus dans les déchets sont considérés comme des matières premières de valeur et des efforts sont déjà entrepris pour en recycler la plus grande quantité possible. Pour obtenir une vision aussi complète que possible des flux de matières, nous avons tout d'abord procédé à l'identification des acteurs impliqués localement dans la gestion des déchets:

- ▶ Les ménages en tant que générateurs des déchets.
- ▶ Les ordures ménagères sont collectées 2 à 3 fois par semaines par les «Servicios Comunales» à l'aide de camions à bennes ouvertes. Les éboueurs effectuent un tri sommaire lors de la collecte et revendent les matériaux qui leur semblent valorisables aux «Casas de Compra».
- ▶ La population peut également vendre les déchets valorisables aux centres de recyclage, les Casas de Compra évoquées ci-dessus: le paiement se fait en nature, 20 bouteilles en plastique de 1,5 l vides étant par exemple échangées contre une bouteille pleine.

▶ Le «Comité de Defensa de la Revolución», une organisation politique de voisinage aux multiples fonctions, exhorte irrégulièrement les citoyens à livrer des matériaux recyclables.

▶ Les Casas de Compra et le Comité de Defensa de la Revolución livrent alors des matières premières à l'usine de revalorisation «Materias Primas» qui les collecte, les trie et les redistribue aux industries de transformation.

Quantités réelles et devenir des déchets. Les données nécessaires à l'analyse des flux de matières ont été collectées auprès de 1180 ménages, ce qui constitue un échantillon représentatif pour Santiago de Cuba. Dans une première approche, les quantités de déchets ont été déterminées directement. Pour ce faire, les ménages se sont vu distribuer 7 sacs en plastique dans lesquels ils devaient stocker pendant une semaine le plastique, l'aluminium, les autres métaux, les papiers et cartons, les déchets organiques, le verre et les autres résidus. A la fin de la semaine, des étudiants ont ensuite fait le tour des ménages pour y peser les déchets à l'aide d'une balance à ressort.

Dans une deuxième approche, les ménages ont été interrogés par le biais d'un questionnaire standardisé sur l'origine des

Dans le cadre de notre étude, des étudiants sont venus peser les déchets chez les particuliers.



H.-J. Mosler, Eawag

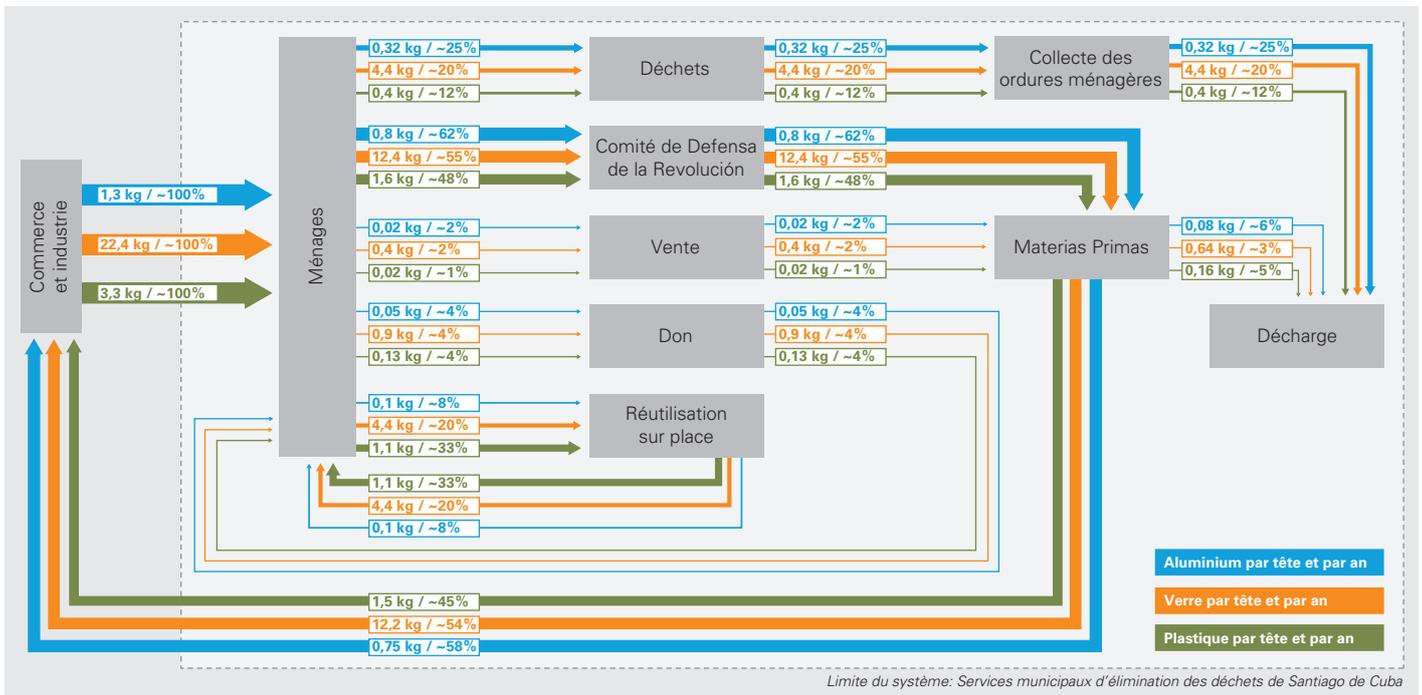


Fig. 1: Devenir du verre, du plastique et de l'aluminium de 1180 ménages de Santiago de Cuba. L'épaisseur des flèches correspond aux pourcentages.

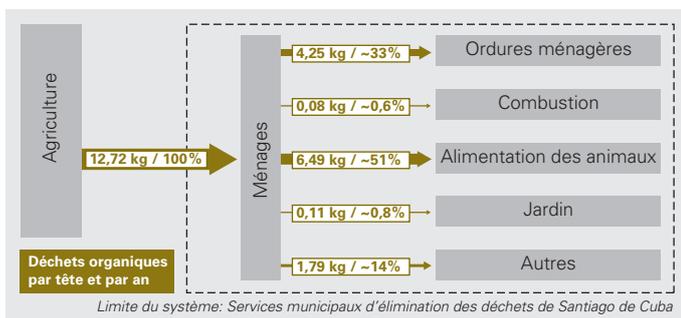
déchets et sur ce qu'ils en faisaient, sur leur degré de satisfaction par rapport au système actuel de gestion des déchets et sur leurs suggestions éventuelles en vue d'une amélioration. Les données ont ensuite été rassemblées sous forme de diagrammes qui révèlent bien toute la diversité des voies empruntées par les déchets (Fig. 1 + 2).

Une grande partie des déchets valorisables est recyclée. La majeure partie des déchets valorisables est livrée gratuitement au Comité de Defensa de la Revolución: 55% du verre, 48% du plastique et 62% de l'aluminium (Fig. 1). Bien que les revenus des Cubains soient relativement modestes, seule une part très faible des déchets est directement vendue par les particuliers aux Casas de Compra. 20% du verre, 33% du plastique et 8% de l'aluminium sont réutilisés au sein même du ménage ou donnés à d'autres particuliers. Ainsi, les bouteilles de plastique ou de verre sont lar-

gement réutilisées pour le stockage des liquides de toute sorte. Les 20% de verre, 12% de plastique et 25% d'aluminium restants sont effectivement jetés (Fig. 1).

Les ménages de Santiago de Cuba atteignent donc un taux de recyclage équivalent de ceux des champions européens en la matière, c'est-à-dire la Suisse et l'Allemagne. Il est en effet de 79% pour le verre (95% en Suisse et 83% en Allemagne), de 97% pour le plastique (71% en Suisse et 64% en Allemagne) et de 74% pour l'aluminium (75% en Suisse et 78% en Allemagne). Ce bon résultat est le fruit à la fois du manque de ressources fortement ressenti, d'une sensibilisation aux questions d'environnement encouragée par l'Etat et d'une grande pression sociale. La forte conscience environnementale de la population s'exprime par le fait que plus de 80% des personnes interrogées se disaient très désireuses d'une solution respectueuse de l'environnement pour le problème des déchets. Le poids de la pression sociale est quant à lui révélé par le fait que, malgré la faiblesse de leurs revenus, les particuliers préfèrent donner leurs déchets valorisables au Comité de Defensa de la Revolución plutôt que de les vendre, somme toute à bon compte.

Fig. 2: Devenir des déchets organiques (résidus non consommés des fruits et légumes, restes de repas) de 1180 ménages de Santiago de Cuba.



Les déchets organiques sont principalement donnés en nourriture aux animaux domestiques. Plus de 50% des déchets organiques sont donnés en nourriture aux animaux domestiques (Fig. 2). A Santiago de Cuba, la présence de poules et de cochons dans les ménages est monnaie courante, même en centre ville. Près de 40% des ménages participent à l'élevage d'animaux, qu'ils leurs appartiennent en propre ou non. Les animaux sont installés dans les cours, sur les balcons, dans les toilettes ou tout simplement dans l'appartement occupé par la famille.

Le reste de ces déchets organiques est en grande majorité emporté par le service de ramassage des ordures ménagères. Une petite partie est brûlée, jetée dans le jardin ou éliminée d'une autre façon. Le compostage des déchets est pratiquement inconnu à Santiago de Cuba, comme probablement dans tout le reste du pays.

Prise en compte des aspects psychologiques dans la planification de la gestion des déchets pour l'avenir. L'analyse des flux de matières livre des éléments importants pour l'élaboration d'une nouvelle stratégie de gestion des déchets. Mais pour concevoir des améliorations vraiment adaptées, il est important de bien cerner l'attitude éventuelle de la population face aux nouvelles pratiques de recyclage envisageables. Une méconnaissance à ce sujet risquerait autrement d'entraîner un rejet des mesures proposées. Dans ce but, nous avons doté notre questionnaire de questions supplémentaires:

- ▶ Impressions: trouveriez-vous agréable ou désagréable de trier/de réutiliser/de composter les déchets?
- ▶ Rapport coût/bénéfice: estimez-vous que le tri/la réutilisation/le compostage des déchets vous apporterait davantage de coûts ou davantage de bénéfices?
- ▶ Difficultés: comment évaluez-vous la difficulté de trier/de réutiliser/de composter les déchets?
- ▶ Réputation: que penseraient vos amis s'ils apprenaient que vous trie/réutilisez/composez les déchets?

Tab. 1: Valeurs moyennes de différents facteurs relevés par sondage dans la population en ce qui concerne le tri, le compostage et la réutilisation des déchets. N = nombre de ménages ayant participé au sondage (environ un tiers des 1180 ménages de l'étude avait reçu le questionnaire mais le nombre de réponses fut plus faible). Valeurs entre guillemets = écarts-types.

	Tri	Compos- tage	Réutilisa- tion
<i>Facteur</i>	N = 299	N = 347	N = 289
<i>Impression</i>			
-3 Très désagréable	1,57	2,28	0,63
0 Neutre	(1,38)	(1,02)	(1,18)
+3 Très agréable			
<i>Coûts/Bénéfices</i>			
-3 Beaucoup plus de coûts que de bénéfices	2,42	2,46	1,64
0 Autant de coûts que de bénéfices	(1,09)	(0,99)	(1,48)
+3 Beaucoup plus de bénéfices que de coûts			
<i>Réputation</i>			
-3 Très mauvais effet	0,91	1,56	0,72
0 Effet neutre	(1,10)	(1,08)	(0,87)
+3 Très bon effet			
<i>Difficulté</i>			
0 Très faible	1,11	0,95	0,55
+3 Très forte	(1,19)	(1,23)	(0,89)
<i>Volonté de participation</i>			
0 Aucune	2,75	2,65	2,23
+3 Très élevée	(0,56)	(0,65)	(0,84)

▶ Volonté de participation: seriez-vous prêt à participer au tri/à la réutilisation/au compostage des déchets?

Les réponses indiquent qu'une meilleure réutilisation des déchets au niveau même du ménage est jugée assez facilement réalisable (Tab. 1). Mais par rapport aux autres pratiques de recyclage, la réutilisation est plutôt jugée désagréable et la volonté de participer à sa réalisation est plus faible. Ce point de vue est peut-être lié au moindre bénéfice que les personnes en attendent en terme de moyens comme de réputation. La population présente une grande volonté de participation au tri et au compostage mais juge ces deux pratiques assez difficiles à réaliser. D'après les sondages, ces réticences sont principalement dues au manque de conteneurs et au manque de place dans les foyers pour assurer le stockage séparé des différents types de déchets.

Conclusion: renforcer le tri et lancer le compostage. Nos résultats permettent de conclure qu'une réduction de la production de déchets par les ménages de Santiago de Cuba peut être obtenue par un renforcement du tri et le lancement du compostage. Par contre, la réutilisation ne doit pas être davantage encouragée au niveau des ménages.

Dans la deuxième phase du projet, dans laquelle nous nous trouvons actuellement, différentes stratégies d'encouragement du tri sélectif et du compostage des déchets sont testées et évaluées:

- ▶ Auto-obligation: les ménages pourraient s'obliger volontairement au tri sélectif des déchets et le signaler par une pancarte du type «Dans cette famille, on trie les déchets!».
- ▶ Affichettes de rappel: des affichettes pourraient être placées aux endroits du tri pour faciliter la différenciation des déchets.
- ▶ Information: diffuser le principe du compostage à renforts d'information.
- ▶ Mise en place des infrastructures nécessaires: p. ex. mise en place de composteurs facilement accessibles.

Dans une troisième phase, les stratégies efficaces seront ensuite appliquées à l'ensemble de la ville de Santiago de Cuba. La satisfaction serait grande si la production de déchets pouvait être réduite au moyen de simples changements de comportement au niveau des ménages. Car, même si les habitants de Santiago de Cuba sont déjà très bons recycleurs, chaque tonne de déchet qui ne se retrouve pas en décharge est un grand succès. ○ ○ ○

- [1] Binder C., Mosler H.-J. (in press): Waste – resource flows of short-lived goods in Santiago de Cuba. Resources, Conservation and Recycling.
- [2] Mosler H.-J., Drescher S., Zurbrügg Ch., Caballero Rodríguez T., Guzmán Miranda O. (2006): Formulating waste management strategies based on waste management practices of households in Santiago de Cuba. Habitat International 30, 849–862.
- [3] Mosler H.-J., Tamas A., Tobias R., Caballero Rodríguez T., Guzmán Miranda O. (2005): Produced household waste and the recycling and disposal strategies of the population of Santiago de Cuba. Available as CD: Conference Proceedings: Waste the Social Context. Edmonton, Alberta, Canada.
- [4] Mosler H.-J., Tamas A., Tobias R., Caballero Rodríguez T., Guzmán Miranda O. (in press): Deriving interventions on the basis of factors influencing behavioral intentions for waste recycling, composting and reuse in Cuba. Environment & Behavior.

Alerte!

Trop de nutriments dans le Tha Chin

Suite à l'intensification croissante de l'agriculture, la qualité de l'eau du Tha Chin n'a cessé de se dégrader. La charge en nutriments particulièrement élevée pose un énorme problème. Notre analyse des flux de matière révèle qu'une grande partie des éléments nutritifs provient de l'aquaculture intensive.

Le Tha Chin et ses nombreux canaux naturels et artificiels s'écoulent lentement dans un lit fortement régulé qui traverse des terrains d'agriculture intensive occupés par des champs de riz et de canne à sucre, des plantations de légumes et de fruitiers, des porcheries et des piscicultures, avant d'atteindre la zone périurbaine de l'Ouest de Bangkok et de se déverser dans la mer. Le long de ce parcours, ces eaux recueillent des quantités considérables de nutriments. Alertés par un dépérissement général des poissons dans le fleuve, le gouvernement et la société civile se sont concertés en 2002 pour élaborer un plan d'action visant une amélioration de la qualité de l'eau. Ces plans sont ambitieux, mais personne ne sait au juste par quelles mesures commencer et comment employer au mieux les moyens personnels et financiers disponibles en quantité limitée. Dans le cadre du NCCR – Nord-Sud [1], l'Eawag a entrepris une modélisation des flux d'eau et de nutriments devant permettre d'identifier les principales sources de charge nutritive et de proposer des solutions pour une amélioration de la situation.

L'aquaculture intensive est une des sources majeures pour la pollution du Tha Chin par les éléments nutritifs.



I. Wittmer, Eawag



Monika Schaffner, géographe et doctorante au département «Eau et assainissement dans les pays en développement – Sandec» et Irene Wittmer, environnementaliste et ancienne diplômante de Sandec

La modélisation des flux de matières dans le Tha Chin. La base de notre étude est une analyse des flux de matières dans le bassin du Tha Chin (Fig. 1) [2]. Nous avons utilisé l'azote et le phosphore comme indicateurs de la surfertilisation du milieu. Nous avons alors caractérisé les activités humaines contribuant à l'accumulation de nutriments dans le Tha Chin. Les principaux processus identifiés sont:

- ▶ l'agriculture: riz, canne à sucre, fruits et légumes;
- ▶ l'élevage: porcheries, volailles, pisciculture;
- ▶ l'industrie;
- ▶ les ménages.

La connaissance du système ayant servi à l'élaboration du modèle est le résultat d'observations de terrain et de discussions avec les particuliers et les spécialistes, ainsi que de données fournies par les statistiques nationales et internationales, la littérature et divers projets régionaux de recherche. Dans un premier temps, les données manquantes ont été remplacées par des estimations. Elles feront place à des données plus exactes dès que celles-ci seront disponibles. La collecte des données est ici un processus itératif. Elles sont continuellement affinées et actualisées jusqu'à ce que l'exactitude de la modélisation soit jugée acceptable. Le modèle de base élaboré pour l'ensemble du bassin du Tha Chin (Fig. 1) peut être ultérieurement compartimenté en vue de l'étude de sous-espaces particuliers. La représentation plus détaillée des conditions spécifiques alors obtenue constituerait une approche particulièrement intéressante étant donné l'hétérogénéité spatiale des modes d'exploitation du bassin.

Les premiers résultats de la modélisation indiquent que l'aquaculture est une cause très importante de rejets d'azote et de phosphore dans le Tha Chin. En second plan, l'élevage porcin et les pratiques de fertilisation en agriculture jouent un rôle majeur dans le bilan des substances nutritives.

L'aquaculture et la pisciculture sur les bords du Tha Chin. Pour caractériser les flux de matières dans le domaine de l'aquaculture, nous avons élaboré un modèle partiel spécifique [3]. Dans le bassin du Tha Chin, les étangs de pisciculture sont partout visi-

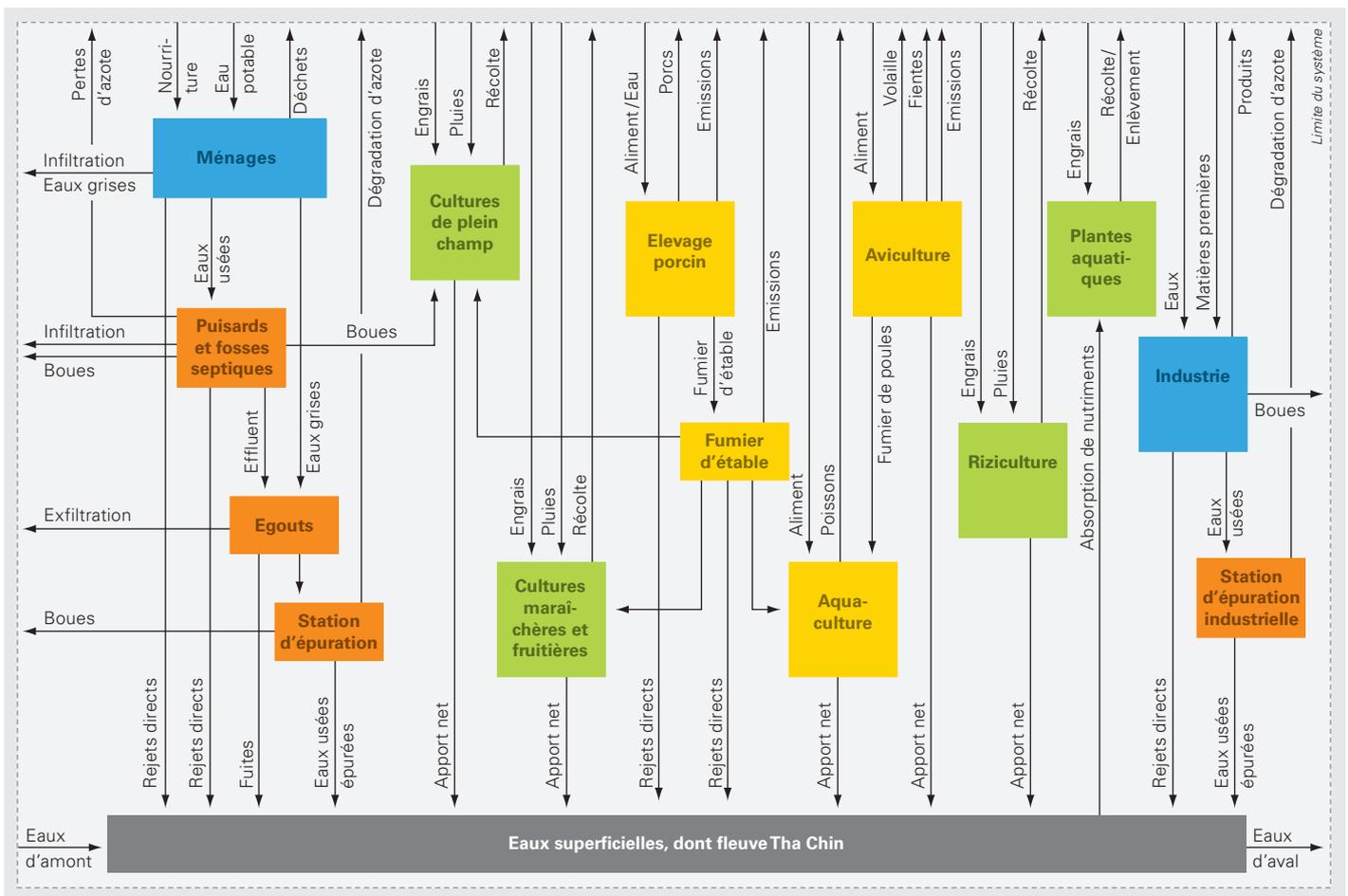


Fig. 1: Schéma systémique simplifié du bassin du Tha Chin: rectangles = processus influant sur la charge nutritive du Tha Chin, flèches = flux de nutriments.

bles. Couvrant de un à quatre hectares, ces étangs sont souvent regroupés et ne sont alors séparés que par de minces bandes de terre. L'élevage pratiqué se concentre sur le tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus*), le poisson tête de serpent (*Channa striatus*), le silure grenouille (*Clarias bartrachus*) et la crevette tigrée (*Penaeus monodon*). Bien que peu d'étangs soient consacrés à l'élevage du silure, sa production est deux fois plus importante en poids que celle du tilapia. Les fermes d'élevage intensif du silure sont aisément reconnaissables à l'odeur de l'aliment utilisé: du poisson marin vieux et plus consommable. L'élevage des crevettes occupe lui aussi une place importante: plus de 30% de la production de crevettes de la Thaïlande vient du bassin du Tha Chin. En comparaison, la production de poissons tête de serpent est relativement faible.

L'exploitation des aquacultures se fait de manière cyclique. Une fois que les animaux ont atteint la taille d'être vendus, ils sont capturés et l'étang est vidé. L'eau est pompée dans le canal le plus proche à partir duquel les nutriments se déversent directement dans le Tha Chin.

Le modèle des flux de matières a été conçu de manière à être applicable à tous les types d'aquaculture. Notre but était d'estimer en gros quelles quantités d'azote et de phosphore étaient

apportées par l'aliment, consommées par les poissons et le phytoplancton et finalement déversées dans le fleuve. Les données nécessaires ont été en partie obtenues par le biais d'entretiens. Nous nous sommes ainsi rendus chez des pisciculteurs pour leur demander quelle quantité d'aliment ils employaient et de quelle manière ils géraient techniquement leur exploitation. Ainsi, une partie de l'eau des étangs à crevettes et à silure est renouvelée chaque jour tandis que seules les pertes d'eau par évaporation et par infiltration sont compensées dans les étangs à tilapias. Le reste des données est issu des statistiques locales ou a été glané dans la littérature spécialisée.

L'aquaculture contribue fortement à la charge nutritive du Tha Chin.

Etant donné que les flux de nutriments sont très variables dans les différentes piscicultures du bassin du Tha Chin, ils ont été calculés séparément pour les différents types d'élevage (silure, poisson tête de serpent, tilapia et crevette). La figure 2 indique à titre d'exemple les flux d'azote et de phosphore dans un élevage de silures. Seule une petite partie des nutriments est effectivement assimilée par les silures, la majeure partie, c'est-à-dire 11 tonnes sur 14 d'azote et 3,2 tonnes sur 4,4 de phosphore, est entraînée vers les canaux directement reliés au Tha Chin. Pour

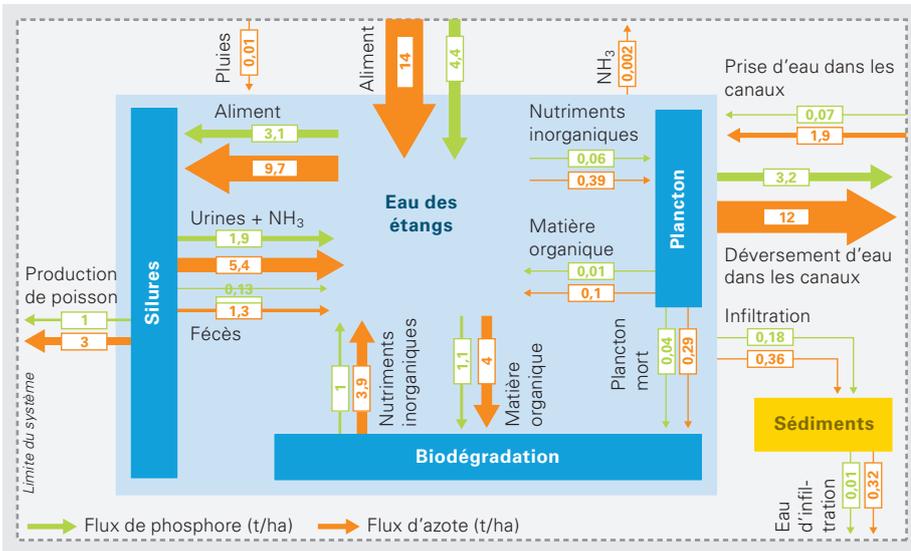


Fig. 2: Flux d'azote et de phosphore dans le sous-système d'un élevage de silure.

calculer la quantité totale d'azote et de phosphore déversée dans le fleuve à partir des élevages de silure, nous avons extrapolé les résultats ponctuels aux surfaces de culture de l'ensemble du bassin. Cet exercice montre que la quantité énorme d'environ 10 000 t d'azote et de 3 000 t de phosphore est entraînée chaque année dans le Tha Chin. Les élevages de silure apportent donc la grande majorité des nutriments constituant la charge nutritive annuelle de 15 000 t d'azote et de 3 600 t de phosphore en provenance de l'aquaculture.

Quels sont les facteurs déterminants de la charge nutritive? A l'aide de l'analyse de sensibilité (cf. article thématique p. 4) durant lesquelles les différentes grandeurs d'entrée ont été variées, nous avons déterminé les facteurs clés du sous-système Aquaculture.

► Quantité d'aliment fourni: Les apports d'aliment pratiqués dans les aquacultures sont souvent excessifs dans l'espoir de maximiser les rendements. Les poissons ne peuvent cependant assimiler qu'un certain pourcentage de leurs poids du moment, le reste étant évacué sans avoir été utilisé. Pour pouvoir ajuster les apports aux besoins, les exploitants devraient contrôler régulièrement le poids des poissons et en connaître approximativement le nombre.

► Valeur nutritionnelle de l'aliment: si l'exploitation est tributaire de produits frais, les caractéristiques nutritionnelles ne peuvent être influencées. Si, par contre, l'aliment est produit artificiellement, il est possible d'en réduire au moins la teneur en phosphore. Nos calculs montrent que la charge provenant d'élevages de tilapias peut être réduite de 30 à 3 kg de phosphore par kg de poisson selon que les animaux sont nourris avec du fumier ou avec un aliment déshydraté. La teneur en azote ne peut être modifiée puisqu'elle est déterminée par la teneur en protéines nécessaire.

► Vidange des étangs à la fin de la période d'élevage: avant la récolte, les étangs sont déjà partiellement vidés, ce qui permet aux ouvriers d'y pénétrer pour capturer les poissons. Cette pratique

provoque une remise en suspension des sédiments riches en nutriments. Ils seront ensuite volontairement évacués avec l'eau restante dans le canal le plus proche de manière à éviter l'envasement des étangs. Le Tha Chin est donc non seulement soumis à des apports continus de substances nutritives mais reçoit en plus des apports périodiques particulièrement concentrés de phosphore et d'azote. La charge nutritive pourrait être considérablement réduite si les sédiments n'étaient pas déversés dans les canaux mais par exemple épandus sur les terrains agricoles environnants. Reste encore à déterminer si un tel changement de pratiques est envisageable.

Elaboration concertée d'un plan de mesures et extension des analyses à d'autres types de polluants. Pour que les résultats de l'analyse des flux de matières

puissent être utilisés dans la pratique, il est important que le processus de planification des mesures visant une amélioration de la qualité physico-chimique de l'eau se déroule avec la participation des acteurs socio-économiques. Ce travail de concertation doit se faire dans le cadre de tables rondes regroupant des représentants de tous les groupes d'intérêt touchés. Sur la base des flux estimés et des facteurs clés identifiés, des mesures concrètes peuvent déjà être mises à débat. Il s'agira de définir en commun les mesures présentant les plus grandes chances de succès compte tenu des impératifs de protection des eaux, de faisabilité et des aspects socio-économiques.

La présente étude propose une quantification des flux de nutriments dans le bassin du Tha Chin. Elle n'aborde pas les autres types de polluants tels que les métaux lourds, les pesticides ou les perturbateurs endocriniens qui ont certainement un rôle à jouer dans cette région. Tous les polluants doivent cependant absolument être pris en considération pour la planification de mesures d'amélioration de la qualité de l'eau. Il serait donc judicieux d'étendre notre analyse à des types de substances non encore étudiés. ○ ○ ○

- 1) <http://www.nccr-north-south.unibe.ch>. Les «Swiss National Centres of Competence in Research» (NCCR) sont des instruments de recherche du Fonds national suisse. Le NCCR – Nord-Sud est cofinancé par la Direction du développement et de la coopération (DCC).
- 2) Schaffner M. (2005): Assessment of water quality problems and mitigation potentials by using material flow analysis – A case-study in the Tha Chin River basin, Thailand. In: Proceedings of the «International Symposium on role of water sciences in trans-boundary river basin management». Ubon Ratchathani, Thailand.
- 3) Wittmer I. (2005): Modeling the water and nutrient flows of freshwater aquaculture in Thailand: Diplomarbeit, Eawag, ETH Zürich, 66 p.

Boucler le cycle du phosphore

D'un côté, de grandes quantités de substances nutritives disparaissent avec les eaux usées de la ville de Hanoi, Vietnam, avant d'aller polluer les eaux. D'un autre côté, l'agriculture locale est consommatrice de fertilisants de synthèse. Notre nouvel instrument de planification montre à quel niveau il est possible d'intervenir pour développer une gestion plus durable des substances nutritives tout en réduisant les rejets dans les systèmes aquatiques.

«Le fleuve est tellement pollué que ses eaux ne peuvent même plus servir à alimenter les piscicultures!» Tels sont les propos du représentant des autorités du district de Dong My, à la périphérie de Hanoi au Vietnam. La surfertilisation des eaux est en effet devenue l'un des problèmes majeurs de cette région. Mais comment réduire les apports d'éléments nutritifs dans le milieu aquatique? En collaboration avec des organisations Vietnamiennes associées, nous avons développé un modèle mathématique permettant de prédire les effets de mesures éventuelles sur les flux d'eau et de substances nutritives. Ce modèle est applicable

Compenser le manque de données par l'expertise

Dans les pays en développement, il n'est pas toujours facile d'avoir accès à des données fiables. De plus, les moyens de recherche disponibles sont souvent insuffisants pour mener des campagnes de mesure. Il est donc particulièrement important de prendre en compte des incertitudes conséquentes afin d'éviter les erreurs d'interprétation. Un moyen intéressant de combler les lacunes laissées par des données manquantes est de recueillir l'avis subjectif de différents experts. La distribution aléatoire obtenue à partir de ces expertises décrit alors l'état des connaissances sur le paramètre étudié. Ce type de techniques qui relève de la statistique dite Bayésienne montre comment l'incertitude décrite diminue à mesure que le savoir progresse (grâce aux résultats d'études ultérieures par exemple) [2]. Les paramètres non quantifiables au vu des données disponibles peuvent ainsi être estimés par voie d'expertise. Dans le projet qui nous occupe, le coefficient de transfert du phosphore dans le processus «fosses septiques» a été évalué de la sorte.



Agnes Montangero, ingénieur en environnement, prépare une thèse de doctorat au sein du département Sandec – «Eau et Assainissement dans les Pays en Développement»
Coauteurs: Roland Schertenleib, Hasan Belevi

aux zones urbaines des pays en développement et intègre des données dans les domaines de l'approvisionnement en eau, de la gestion des eaux usées et des déchets et de l'agriculture. Nous l'avons testé dans le cas de la province d'Hanoi en nous concentrant sur le problème du phosphore.

La croissance démographique à l'origine de la pollution des eaux.

Ces dernières décennies, la ville de Hanoi a connu une croissance démographique et économique vertigineuse doublée d'une industrialisation très rapide. Ces processus s'accompagnent d'une augmentation de la consommation des ressources et de la pollution. D'un côté, des quantités toujours croissantes d'eaux usées sont déversées dans le milieu aquatique. D'un autre côté, l'agriculture périurbaine doit assurer la subsistance d'un nombre toujours croissant d'habitants. Pour augmenter la production, de plus en plus d'engrais chimiques sont employés, ce qui s'accompagne d'une augmentation de la consommation en phosphore. Au rythme d'extraction actuel, les réserves mondiales connues en phosphore devraient être épuisées d'ici 50 à 100 ans [1].

A l'aide de notre modèle, nous avons donc tenté de caractériser de façon détaillée les flux de phosphore dans le système (Fig. 1) pour ensuite évaluer les effets de différents scénarios sur

La ville s'étend. La périphérie de Hanoi présente des caractères à la fois ruraux et urbains.

Photos: A. Montangero, Eawag



évacuées vers la décharge alors qu'elles sont souvent utilisées comme engrais organique dans les zones péri-urbaines.

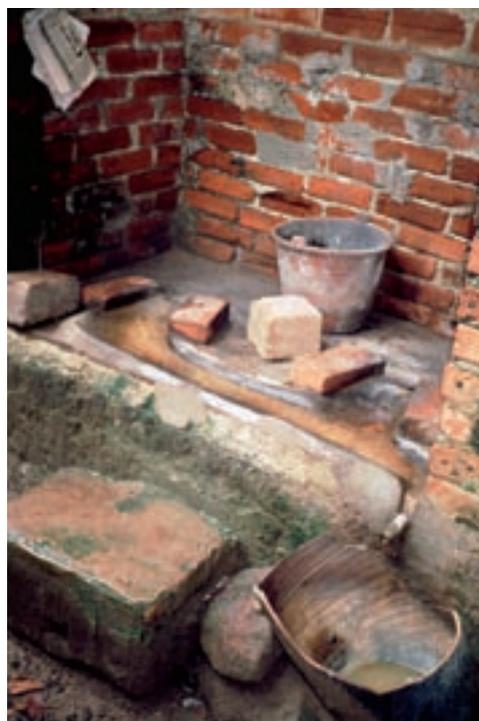
Il se trouve cependant que la majeure partie du phosphore reste dans les effluents liquides des fosses. Ceci s'explique d'une part par le fait qu'entre 50 et 80% du phosphore excrété par l'être humain se retrouve dans les urines [4]. D'autre part, le phosphore contenu par les urines se trouve sous forme hydrosoluble et seuls 11 à 27% du phosphore excrété sont retenus dans les boues. Le reste quitte les fosses avec les effluents liquides.

Les latrines assurant la séparation des urines peuvent aider à boucler le cycle du phosphore.

Existe-t-il un système de toilettes plus performant pour la rétention du phosphore? Nous avons constaté que le système de latrines bicamérales à séparation des urines autrefois largement répandu dans le nord du Vietnam présentait de grands avantages par rapport au système des fosses septiques. Le dispositif est composé de deux chambres utilisées en alternance pour les fèces, d'un plancher pourvu d'une cannelure pour dériver les urines et d'un conteneur pour la collecte des urines. Des cendres sont régulièrement ajoutées aux fèces pour faciliter leur séchage et éviter les mauvaises odeurs. Lorsqu'un compartiment est plein, le deuxième est mis en service et le mélange de cendres et de fèces est stocké pendant environ un an dans le premier. Cette longue période de stockage permet la neutralisation des germes pathogènes, ce qui limite les risques sanitaires lors d'une utilisation agricole du mélange. L'urine peut par contre être immédiatement utilisée pour l'irrigation après dilution éventuelle. A part une faible quantité d'azote qui se volatilise sous forme d'ammoniac pendant le stockage des urines, ce système de latrines permet de retenir la totalité des nutriments excrétés par les humains, y compris le phosphore. Ces substances peuvent alors être utilisées comme fertilisants et remplacer une partie des engrais chimiques. Cette stratégie permettrait à la fois de réduire les flux de nutriments vers le milieu aquatique et de limiter les besoins en fertilisants de synthèse.

Grâce à notre modèle, nous avons pu montrer que les rejets de phosphore dans le milieu naturel pouvaient être fortement réduits par le biais de mesures adéquates. Ainsi, si toutes les fosses septiques de Hanoi étaient remplacées par des latrines bicamérales à séparation d'urine, la charge en phosphore dans les systèmes aquatiques pourrait être réduite de 42% en passant de 1570 à 905 t par an. De plus, les besoins en engrais chimiques passeraient de 2800 à 1200 t par an, soit une réduction de 57%.

La nécessité d'une stratégie de planification intégrée. Si l'on souhaite développer de nouvelles approches telles que la séparation des urines à Hanoi ou dans d'autres villes des pays en développement, il convient tout d'abord d'éclaircir certaines questions. Par exemple: quelle serait l'acceptation sociale de nouveaux types d'installations sanitaires? Quel serait leur coût? Un surcoût serait-il jugé acceptable? Existe-t-il à long terme un marché pour les urines et les matières fécales hygiénisées? Dans ce contexte, notre objectif est donc d'intégrer le modèle métabolique dans une stratégie globale de planification et de le tester pour d'autres cas d'étude et pour d'autres paramètres. Les scénarios combinant



Latrines bicamérales à séparation d'urine (Vietnam). Plancher à deux orifices pour les deux chambres, conduite d'évacuation des urines et récipient à urines.

implantation d'installations sanitaires appropriées et gestion durable des ressources ne peuvent cependant être mis en œuvre que sous réserve d'une bonne participation des habitants concernés, des autorités et des intéressés au processus de planification. Les autorités locales se montrent prêtes à soutenir de nouvelles stratégies. La pollution des eaux est en effet un problème urgent à résoudre et la pisciculture est l'une des principales sources de revenus des zones péri-urbaines de la région. ○ ○ ○

Ce projet a été réalisé à Hanoi, Vietnam, en collaboration avec les personnes suivantes: *Le Ngoc Cau*, Asian Institute of Technology Center in Vietnam (AITCV); *Viet Anh Nguyen* et *Pham Thuy Nga*, Centre for Environmental Engineering of Towns and Industrial Areas (CEETIA) de l'Université de Hanoi; *Vu Dinh Tuan*, Institut National des Sols et Fertilisants (NISF).

- [1] Cordell D. (2005): Phosphorus – the forgotten ingredient in Food Security. Prepared for the Masters of Water Resources & Livelihood Security, Department of Water & Environmental Studies, Linköping University.
- [2] Morgan M.G., Henrion M. (1990): Uncertainty. A guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis. Cambridge University Press. Cambridge, UK, 332 p.
- [3] Baccini P., Bader H.P. (1996): Regionaler Stoffhaushalt – Erfassung, Bewertung, Steuerung. Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, 420 S.
- [4] Jönsson H., Richert Stintzing A., Vinnerås B., Salomon E. (2004): Guidelines on the use of urine and faeces in crop production. Report 2004–2. EcoSanRes Publications Series. Stockholm Environment Institute, 35 p.



Martin Schmid, chercheur en sciences de l'environnement au sein du département «Eaux superficielles»

Des quantités inquiétantes de gaz au fond du lac Kivu

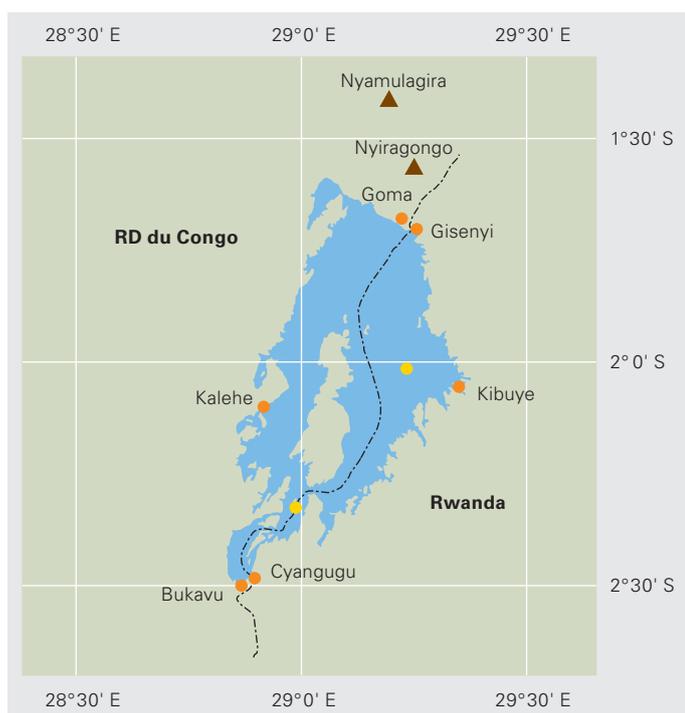
Le lac Kivu (RD du Congo/Rwanda) renferme en ses fonds d'énormes quantités de gaz carbonique et de méthane. Si ces gaz remontaient à la surface, ils mettraient en péril la vie des habitants des rives et des abords du lac. De récentes analyses effectuées par l'Eawag font état d'une augmentation inattendue des concentrations de méthane, ce qui semble augmenter les risques d'une explosion gazeuse.

A Kibuye, au Rwanda, rien ne laisse supposer que l'on se trouve au bord d'un des lacs les plus singuliers du monde. Le paysage fait un peu penser aux lacs préalpins suisses, à la différence que les rives sont plantées de bananiers et de manioc au lieu des hêtres et sapins européens. On aperçoit parfois au loin le volcan Nyiragongo qui domine la ville congolaise de Goma à l'extrémité nord du lac. En janvier 2002, une éruption du Nyiragongo a détruit une grande partie de la ville, des coulées de lave provenant des flancs du volcan ayant traversé à grande vitesse le centre de Goma avant de se déverser en partie dans le lac. En plus des dégâts importants causés par les coulées de lave, on redouta alors qu'elles ne

provoquent un dégagement massif de gaz. En effet, le lac Kivu (Fig. 1) renferme dans ses eaux profondes d'énormes quantités de gaz carbonique et de méthane dissous. Immédiatement après l'éruption du volcan de 2002, une campagne de mesures a été organisée avec l'Eawag pour évaluer les effets des coulées de lave sur la stratification du lac. Un projet fut par la suite initié à l'Eawag pour étudier les concentrations de gaz dans le lac, les conditions menant à une explosion gazeuse et les rapports entre les cycles de nutriments et la formation des gaz dans le lac.

Une explosion gazeuse serait particulièrement meurtrière pour les populations riveraines. Si de l'eau se situant à 400 m de profondeur remontait à la surface, une formation brutale de bulles de gaz se produirait, un peu comme lorsque l'on ouvre une bouteille de limonade que l'on aurait secouée auparavant. Ces concentrations élevées de gaz sont uniquement possibles parce que la stratification du lac, profond de quelques 500 m, est particulièrement stable et que les échanges entre les eaux profondes et les eaux de surface sont très limités. Ces gaz se sont ainsi accumulés dans les profondeurs pendant des siècles.

Fig. 1: Le lac Kivu représenté avec les principales villes riveraines, les deux volcans locaux et les deux sites d'attache des pièges à sédiments (points jaunes).



Vue sur le lac Kivu à partir de la rive Est à proximité de Kibuye (Rwanda). A l'arrière plan, l'île Idjwe (RD du Congo).



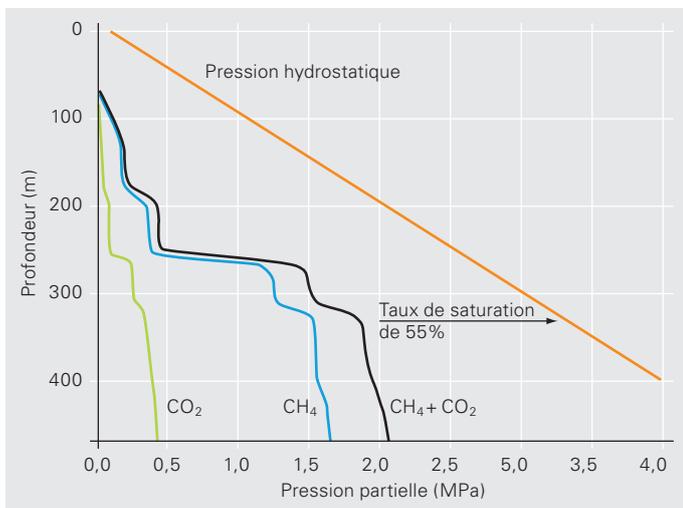


Fig. 2: Pression des gaz au sein du lac Kivu en comparaison avec la pression hydrostatique. Le taux de saturation maximal, actuellement d'un peu plus de 50%, est atteint à environ 300 m de profondeur.

Dans sa totalité, le lac Kivu renferme environ 60 km³ de méthane et 250 km³ de dioxyde de carbone. Si on les étalait à la surface du lac, ces gaz formeraient une couche de plus de 100 m d'épaisseur. Même si une partie seulement de ces gaz s'échappait brusquement, ils feraient encourir un danger énorme aux quelques 2 millions de personnes qui vivent à proximité immédiate ou relative du lac. En effet, le gaz carbonique est plus lourd que l'air et il s'accumulerait au-dessus du lac. Le CO₂ devient d'autre part mortel dès que sa proportion dans l'air atteint un peu moins de 10%. Lors d'une explosion gazeuse qui s'était produite en 1986 dans le lac beaucoup plus petit de Nyos au Cameroun, plus de 1700 personnes avaient trouvé la mort par asphyxie [1]. Un dégazage artificiel est depuis pratiqué dans le lac Nyos pour éviter que la catastrophe ne se reproduise [2]. Des observations effectuées dans les sédiments du lac Kivu laissent supposer que des explosions gazeuses s'y sont déjà produites il y a quelques milliers d'années [3].

Une explosion peut se produire lorsque la stratification du lac est déstabilisée. Lors de nos premières mesures après l'éruption volcanique de 2002, nous n'avions pas observé de modification significative de la stratification du lac. Nous en avons alors conclu que la chaleur apportée par la coulée de lave n'était pas suffisante pour provoquer un mélange des couches et donc une explosion gazeuse [4].

Mais dans quelles circonstances les gaz du lac Kivu pourraient-ils être libérés? La figure 2 présente l'évolution de la pression des gaz de la surface jusqu'au fond du lac en comparaison avec la pression hydrostatique, c'est-à-dire la pression provoquée par la colonne d'eau à une profondeur donnée. Le méthane étant moins soluble que le gaz carbonique, c'est lui qui participe le plus fortement à la pression totale gazeuse bien qu'il soit présent en concentrations plus faibles. Si la somme des pressions partielles des gaz dissous est supérieure à la pression hydrostatique, des bulles de gaz peuvent se former spontanément et remonter à la

surface. Cela ne suffit normalement pas à induire une explosion gazeuse. Si toutefois le lac est presque totalement saturé en gaz à une grande profondeur, la déstabilisation violente d'une couche donnée – par exemple sous l'effet d'un glissement de terrain, d'un effondrement rocheux ou d'une éruption volcanique – peut provoquer la remontée d'une grande masse d'eau jusqu'à une profondeur correspondant à sa saturation. Il se forme alors spontanément une quantité importante de bulles de gaz qui augmentent la poussée vers le haut et qui peuvent donc à leur tour entraîner de l'eau riche en gaz dissous. Une telle réaction en chaîne pourrait provoquer en très peu de temps le dégagement de gigantesques quantités de gaz.

Pour l'heure, le degré de saturation en gaz du lac Kivu est d'environ 50% (Fig. 2). L'eau située à 320 m de profondeur devrait monter d'environ 150 m pour qu'une formation de bulles de gaz se produise spontanément. Une explosion gazeuse paraît donc peu probable dans les conditions actuelles. Il faudrait au moins qu'une grande quantité de magma pénètre directement dans les eaux profondes du lac pour qu'une remontée jusqu'au point de dégazage puisse se produire [5].

Une augmentation surprenante des teneurs en méthane.

Une comparaison avec des mesures datant des années 1970 [6] montre que les concentrations en méthane ont augmenté de près de 20% en seulement 30 ans. Cette observation est d'autant plus surprenante que l'on pensait les concentrations du lac en équilibre durable, la quantité de méthane transportée vers la surface et consommée par les bactéries dans les couches supérieures riches en oxygène correspondant à peu près à la quantité formée en profondeur. Il semble donc qu'actuellement la production domine et que l'on puisse atteindre à la fin du XXI^e siècle une situation telle qu'une explosion pourrait se produire à tout moment [7].

Les causes possibles: un développement important de la population et l'introduction d'une espèce étrangère.

Les raisons de cette situation ne sont pas clairement déterminées. Ce qui est cependant certain, c'est que le méthane se forme en milieu anaérobie dans les eaux profondes suite à la dégradation bactérienne de la matière organique morte, principalement constituée d'algues. Une augmentation de la concentration en méthane semble donc indiquer une importation accrue de matière organique en provenance des couches supérieures du lac. Deux hypothèses peuvent être avancées:

- ▶ La population des alentours du lac Kivu a fortement augmenté au cours des dernières décennies. De ce fait, le lac reçoit des quantités accrues de nutriments en provenance de l'agriculture, de l'assainissement et de l'érosion des sols.

- ▶ Dans les années 1950, une sardine originaire du lac Tanganyika a été introduite dans le lac Kivu qui ne possédait alors aucune espèce de poisson susceptible de se nourrir du zooplancton évoluant dans les eaux libres. La sardine s'est extrêmement bien établie et elle représente aujourd'hui la source principale des revenus de la pêche. Mais elle a aussi fortement influencé les cycles des éléments nutritifs dans le lac en éliminant les daphnies (pucelles d'eau) qui contrôlaient auparavant la croissance algale. Résultat:



N. Pasche, Eawag

Mise en place des pièges à sédiments. Ils permettront de collecter les algues en sédimentation.

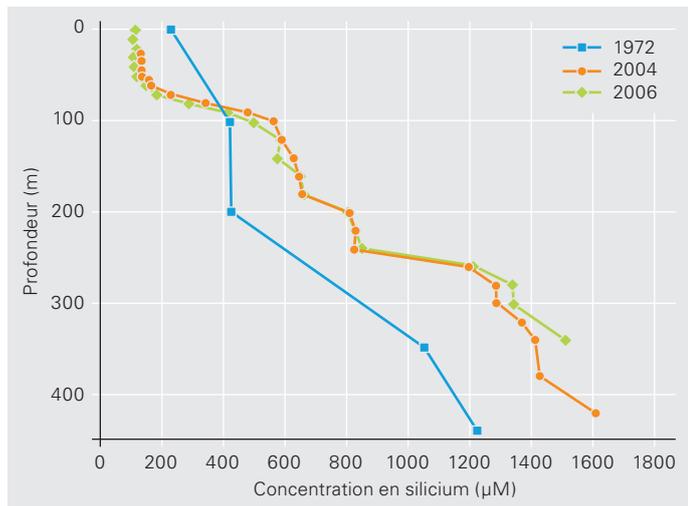
les concentrations de zooplancton du lac Kivu sont aujourd'hui deux fois plus faibles et les concentrations des algues plus élevées que dans les autres grands lacs de l'Est africain [8, 9].

L'augmentation de la population et l'introduction de la sardine peuvent donc toutes deux avoir stimulé la production algale et être à l'origine de l'augmentation des concentrations de méthane.

Une augmentation avérée des teneurs en éléments nutritifs.

L'accroissement des apports de matière organique dans les eaux profondes s'exprime aussi par une augmentation des teneurs en éléments nutritifs. La figure 3 montre par exemple l'évolution des teneurs en silicium dans le lac Kivu en fonction de la profondeur. Le silicium entre principalement dans la composition de la coque de silice des diatomées. La baisse de concentration en silicium dans les couches superficielles et son augmentation en profondeur semblent indiquer qu'une quantité accrue de diatomées mortes sédimentent vers le fond du lac où s'effectue leur décomposition.

Fig. 3: Concentrations de silicium mesurées dans le lac Kivu en 1972 [10], en 2004 [7] et en 2006 (N. Pasche, Eawag).



Une évolution similaire a été observée pour d'autres nutriments tels que le phosphore et le calcium.

Dans le but de déterminer les causes de l'augmentation de la teneur en méthane du lac Kivu, l'Eawag a lancé un nouveau projet financé par le Fonds National Suisse et réalisé en collaboration avec l'Institut Supérieur Pédagogique de Bukavu (RD du Congo), l'Université Nationale du Rwanda de Butare et l'Université Notre-Dame de la Paix de Namur (Belgique). Dans le cadre de ce projet, des pièges à sédiments ont été fixés à deux endroits dans le lac en mai 2006 (Fig. 1) pour récolter les algues en sédimentation. Cette démarche permet de quantifier les exportations d'éléments nutritifs à partir des couches superficielles. Des carottes de sédiments ont d'autre part été prélevées pour étudier l'évolution historique des flux de matières nutritives. Elles sont en cours d'analyse. Enfin, une analyse périodique d'échantillons d'eau de pluie et d'eau prélevée dans les affluents du lac est prévue afin d'estimer les apports extérieurs de nutriments. En plus de l'étude des aspects purement scientifiques, le projet a aussi pour propos de promouvoir les activités de recherche des universités locales. C'est en effet aux institutions locales qu'il incombera à long terme d'effectuer la surveillance du lac et donc d'assurer la sécurité de la population. ○ ○ ○

- [1] Sigvaldason G.E. (1989): International Conference on Lake Nyos Disaster, Yaounde, Cameroon 16–20 March, 1987 – conclusions and recommendations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 39, 97–107.
- [2] Halbwachs M., Sabroux J.C., Grangeon J., Kayser G., Tochon-Danguy J.C., Felix A., Béard J.C., Villeveille A., Vitter G., Richon P., Wüest A., Hell J. (2004): Degassing the «killer lakes» Nyos and Monoun, Cameroon. *EOS* 85, 281–288.
- [3] Haberyan K.A., Hecky R.E. (1987): The late pleistocene and holocene stratigraphy and paleolimnology of Lake Kivu and Tanganyika. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 61, 169–197.
- [4] Lorke A., Tietze K., Halbwachs M., Wüest A. (2004): Response of Lake Kivu stratification to lava inflow and climate warming. *Limnology and Oceanography* 49, 778–783.
- [5] Schmid M., Tietze K., Halbwachs M., Lorke A., McGinnis D., Wüest A. (2004): How hazardous is the gas accumulation in Lake Kivu? Arguments for a risk assessment in light of the Nyiragongo Volcano eruption of 2002. *Acta vulcanologica* 14/15, 115–121.
- [6] Tietze K. (1978): Geophysikalische Untersuchung des Kivusees und seiner ungewöhnlichen Methangaslagerstätte – Schichtung, Dynamik und Gasgehalt des Seewassers. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel.
- [7] Schmid M., Halbwachs M., Wehrli B., Wüest A. (2005): Weak mixing in Lake Kivu: new insights indicate increasing risk of uncontrolled gas eruption. *Geochemistry, Geophysics, and Geosystems* 6, Q07009, doi: 07010.01029/02004GC000892.
- [8] Isumbusho M., Sarmiento H., Kaningini B., Micha J.-C., Descy J.-P. (2006): Zooplankton of Lake Kivu, half a century after the Tanganyika sardine introduction. *Journal of Plankton Research* 28, 971–989.
- [9] Sarmiento H., Isumbusho M., Descy J.-P. (2006): Phytoplankton ecology of Lake Kivu (eastern Africa). *Journal of Plankton Research* 28, 815–829.
- [10] Degens E.T., Von Herzen R.P., Wong H.-K., Deuser W.G., Jannasch H.W. (1973): Lake Kivu: structure, chemistry and biology of an East African Rift Lake. *Geologische Rundschau* 62, 245–277.

Publications

Liste non exhaustive. Celles-ci et toutes les autres publications de l'Eawag sont disponibles au format pdf: <http://library.eawag.ch/ris/risweb.isa>
Recherche par auteur, titre ou mot-clé. Pour tout renseignement: bibliothek@eawag.ch

- [04493] **Uehlinger U., Brock J.T.** (2005): Periphyton metabolism along a nutrient gradient in a desert river (Truckee River, Nevada, USA). *Aquatic Sciences* 67, (4), 507–516.
- [04494] **Berg M., Giger W., Tran H.C., Pham H. V., Pham T.K.T., Schertenleib R.** (2006): Extent and severity of arsenic pollution in Vietnam and Cambodia (Chapter 29). In: Naidu R., Smith E., Owens G., Bhattacharya P., Nadebaum P. (Eds.), *Managing arsenic in the environment: From soil to human health*, CSIRO Publishing, Australia, 495–509.
- [04495] **Schärer M., Vollmer T., Frossard E., Stamm C., Flüher H., Sinaj S.** (2006): Effect of water composition on phosphorus concentration in runoff and water-soluble phosphate in two grassland soils. *European Journal of Soil Science* 57, (2), 228–234.
- [04496] **Malard F., Uehlinger U., Zah R., Tockner K.** (2006): Flood-pulse and riverscape dynamics in a braided glacial river. *Ecology* 87, (3), 704–716.
- [04497] **Zurbrugg C., Drescher S., Patel A.H., Sharatchandra H.C.** (2004): Decentralised composting of urban waste – an overview of community and private initiatives in Indian cities. *Waste Management* 24, (7), 655–662.
- [04498] **Sigg L., Black F., Buffle J., Cao J., Cleven R.F.M.J., Davison W., Galceran J., Gunkel P., Kalis E., Kistler D., Martin M., Noel S., Nur Y., Odzak N., Puy J., van Riemsdijk W.H., Temminghoff E., Tercier-Waeber M.L., Töpferwien S., Town R.M., Unsworth E.R., Warnken K.W., Weng L.P., Xue H.B., Zhang H.** (2006): Comparison of analytical techniques for dynamic trace metal speciation in natural freshwaters. *Environmental Science & Technology* 40, (6), 1934–1941.
- [04499] **Unsworth E.R., Warnken K.W., Zhang H., Davison W., Black F., Buffle J., Cao J., Cleven R.F.M.J., Galceran J., Gunkel P., Kalis E., Kistler D., Van Leeuwen H.P., Martin M., Noel S., Nur Y., Odzak N., Puy J., van Riemsdijk W.H., Sigg L., Temminghoff E., Tercier-Waeber M.L., Töpferwien S., Town R.M., Weng L.P., Xue H.B.** (2006): Model predictions of metal speciation in freshwaters compared to measurements by *in situ* techniques. *Environmental Science & Technology* 40, (6), 1942–1949.
- [04500] **Kaiser S.M., Escher B.I.** (2006): The evaluation of liposome-water partitioning of 8-hydroxyquinolines and their copper complexes. *Environmental Science & Technology* 40, (6), 1784–1791.
- [04501] **Dodd M.C., Buffle M.O., von Gunten U.** (2006): Oxidation of antibacterial molecules by aqueous ozone: Moiety-specific reaction kinetics and application to ozone-based wastewater treatment. *Environmental Science & Technology* 40, (6), 1969–1977.
- [04502] **Buschmann J., Canonica S., Lindauer U., Hug S.J., Sigg L.** (2005): Photoirradiation of dissolved humic acid induces arsenic(III) oxidation. *Environmental Science & Technology* 39, (24), 9541–9546.
- [04503] **Urmann K., Gonzalez-Gil G., Schroth M. H., Hofer M., Zeyer J.** (2005): New field method: Gas push-pull test for the *in situ* quantification of microbial activities in the vadose zone. *Environmental Science & Technology* 39, (1), 304–310.
- [04504] **Collins A.G., Schuchert P., Marques A.C., Jankowski T., Medina M., Schierwater B.** (2006): Medusozoan phylogeny and character evolution clarified by new large and small subunit rDNA data and an assessment of the utility of phylogenetic mixture models. *Systematic Biology* 55, (1), 97–115.
- [04505] **Luo J., Wu W.M., Fienen M.N., Jardine P.M., Mehlhorn T.L., Watson D.B., Cirpka O.A., Criddle C.S., Kitanidis P.K.** (2006): A nested-cell approach for *in situ* remediation. *Ground Water* 44, (2), 266–274.
- [04506] **Cirpka O.A., Olsson A., Ju Q.S., Rahman M.A., Grathwohl P.** (2006): Determination of transverse dispersion coefficients from reactive plume lengths. *Ground Water* 44, (2), 212–221.
- [04507] **Steiner M., Pronk W., Boller M.** (2006): Modeling of copper sorption onto GFH and design of full-scale GFH adsorbers. *Environmental Science & Technology* 40, (5), 1629–1635.
- [04508] **Lienert J., Monstadt J., Truffer B.** (2006): Future scenarios for a sustainable water sector: A case study from Switzerland. *Environmental Science & Technology* 40, (2), 436–442.
- [04509] **Egli T.** (2001): Biodegradation of metal-complexing aminopolycarboxylic acids. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 92, (2), 89–97.
- [04510] **Mieleitner J., Reichert P.** (2006): Analysis of the transferability of a biogeochemical lake model to lakes of different trophic state. Selected Papers from the Fourth European Conference on Ecological Modelling, September 27–October 1, 2004, Bled, Slovenia 194, (1–3), 49–61.
- [04511] **Matzinger A.D., Spirkovski Z., Patceva S., Wüest A.** (2006): Sensitivity of ancient Lake Ohrid to local anthropogenic impacts and global warming. *Journal of Great Lakes Research* 32, (1), 158–179.
- [04512] **Jankowski T., Livingstone D.M., Bühner H., Forster R., Niederhauser P.** (2006): Consequences of the 2003 European heat wave for lake temperature profiles, thermal stability, and hypolimnetic oxygen depletion: Implications for a warmer world. *Limnology and Oceanography* 51, (2), 815–819.
- [04513] **Janssen G.M.C.M., Cirpka O.A., van der Zee S.E.A.T.M.** (2006): Stochastic analysis of nonlinear biodegradation in regimes controlled by both chromatographic and dispersive mixing. *Water Resources Research* 42, (1), W01417, doi: 10.1029/2005WR004042.
- [04514] **Uehlinger U.** (2006): Annual cycle and inter-annual variability of gross primary production and ecosystem respiration in a floodprone river during a 15-year period. *Freshwater Biology* 51, (5), 938–950.
- [04515] **Buffle M.O., Schumacher J., Salhi E., Jekel M., von Gunten U.** (2006): Measurement of the initial phase of ozone decomposition in water and wastewater by means of a continuous quench-flow system: Application to disinfection and pharmaceutical oxidation. *Water Research* 40, (9), 1884–1894.
- [04516] **Meunier L., Canonica S., von Gunten U.** (2006): Implications of sequential use of UV and ozone for drinking water quality. *Water Research* 40, (9), 1864–1876.
- [04517] **Joss A., Zabczynski S., Göbel A., Hoffmann B., Löffler D., McARDell C.S., Ternes T.A., Thomsen A., Siegrist H.** (2006): Biological degradation of pharmaceuticals in municipal wastewater treatment: Proposing a classification scheme. *Water Research* 40, (8), 1686–1696.
- [04518] **Wegelin M., Canonica S., Alder A.C., Marazuela M.D., Suter M.J.F., Bucheli T.D., Haefliger O.P., Zenobi R., McGuigan K.G., Kelly M.T., Ibrahim P., Larroque M.** (2001): Does sunlight change the material and content of polyethylene terephthalate (PET) bottles? *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua* 50, (3), 125–133.
- [04519] **Borsuk M.E., Reichert P., Peter A., Schager E., Burkhardt-Holm P.** (2006): Assessing the decline of brown trout (*Salmo trutta*) in Swiss rivers using a Bayesian probability network. *Ecological Modelling* 192, (1–2), 224–244.
- [04520] **Huber C., Beyerle U., Leuenberger M., Schwander J., Kipfer R., Spahni R., Severinghaus J.P., Weiler K.** (2006): Evidence for molecular size dependent gas fractionation in firn air derived from noble gases, oxygen, and nitrogen measurements. *Earth and Planetary Science Letters* 243, (1–2), 61–73.
- [04521] **Ho L., Onstad G., von Gunten U., Rinck-Pfeiffer S., Craig K., Newcombe G.** (2006): Differences in the chlorine reactivity of four micro-

- cystin analogues. *Water Research* 40, (6), 1200–1209.
- [04522] **Greinert J., Artemov Y., Egorov V., De Batist M., McGinnis D.F.** (2006): 1300-m-high rising bubbles from mud volcanoes at 2080 m in the Black Sea: Hydroacoustic characteristics and temporal variability. *Earth and Planetary Science Letters* 244, (1–2), 1–15.
- [04523] **Pronk W., Palmquist H., Biebow M., Boller M.** (2006): Nanofiltration for the separation of pharmaceuticals from nutrients in source-separated urine. *Water Research* 40, (7), 1405–1412.
- [04524] **Niggemann J., Schubert C.J.** (2006): Sources and fate of amino sugars in coastal Peruvian sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, (9), 2229–2237.
- [04525] **Niggemann J., Schubert C.J.** (2006): Fatty acid biogeochemistry of sediments from the Chilean coastal upwelling region: Sources and diagenetic changes. *Organic Geochemistry* 37, (5), 626–647.
- [04526] **Pronk W., Biebow M., Boller M.** (2006): Electrodialysis for recovering salts from a urine solution containing micropollutants. *Environmental Science & Technology* 40, (7), 2414–2420.
- [04527] **Tandy S., Ammann A.A., Schulin R., Nowack B.** (2006): Biodegradation and speciation of residual SS-ethylenediaminedisuccinic acid (EDDS) in soil solution left after soil washing. *Environmental Pollution* 142, (2), 191–199.
- [04528] **Tockner K., Peter A.** (2003): Totholz und Schwemmgut – entsorgungspflichtig oder ökologisch wertvoll? *Wasser Energie Luft* 95, (11/12), 351–374.
- [04529] **Langhans S.D., Tockner K.** (2006): The role of timing, duration, and frequency of inundation in controlling leaf litter decomposition in a river-floodplain ecosystem (Tagliamento, north-eastern Italy). *Oecologia* 147, (3), 501–509.
- [04530] **Nakamura K., Tockner K., Amano K.** (2006): River and wetland restoration: Lessons from Japan. *Bioscience* 56, (5), 419–429.
- [04531] **Bernasconi D., Burckhardt S., Peter P., Gujer W.** (2000): Anwendung der Datenstruktur Siedlungsentwässerung (VSA-DSS). *GWA Gas, Wasser, Abwasser* 86, (4), 245–253.
- [04532] **Zurbrügg C., Strauss M., Schertenleib R., Morel A.** (2006): Wiederverwenden statt verschwenden. *Helvetas Partnerschaft* 183, 16–18.
- [04533] **Zurbrügg C., Strauss M., Schertenleib R., Morel A.** (2006): Recycler au lieu de jeter. *Helvetas Partnerschaft* 183, 16–18.
- [04534] **Chèvre N.** (2006): Pestizide in Schweizer Oberflächengewässern. *GWA Gas, Wasser, Abwasser* 4, 297–307.
- [04535] **Burgherr P., Meyer E.I.** (1997): Regression analysis of linear body dimensions vs. dry mass in stream macroinvertebrates. *Archiv für Hydrobiologie* 139, (1), 101–112.
- [04536] **Dodd M.C., Vu N.D., Ammann A.A., Le V.C., Kissner R., Pham H.V., Cao T.H., Berg M., von Gunten U.** (2006): Kinetics and mechanistic aspects of As(III) oxidation by aqueous chlorine, chloramines, and ozone: Relevance to drinking water treatment. *Environmental Science & Technology* 40, (10), 3285–3292.
- [04537] **Dodd M.C., Huang C.H.** (2004): Transformation of the antibacterial agent sulfamethoxazole in reactions with chlorine: Kinetics mechanisms, and pathways. *Environmental Science & Technology* 38, (21), 5607–5615.
- [04538] **Hostmann M.** (2005): Decision support for river rehabilitation. Dissertation 16136, ETH-Zürich, Switzerland, 170 pp.
- [04539] **Reinhardt M., Müller B., Gächter R., Wehrli B.** (2006): Nitrogen removal in a small-constructed wetland: An isotope mass balance approach. *Environmental Science & Technology* 40, (10), 3313–3319.
- [04540] **Seehausen O.** (2006): African cichlid fish: a model system in adaptive radiation research. *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 1–12.
- [04541] **Schubert C.J., Durisch-Kaiser E., Holzner C.P., Klauser L., Wehrli B., Schmale O., Greinert J., McGinnis D.F., De Batist M., Kipfer R.** (2006): Methanotrophic microbial communities associated with bubble plumes above gas seeps in the Black Sea. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 7, Q04002, doi: 10.1029/2005GC001049.
- [04542] **Lomstein B.A., Jorgensen B.B., Schubert C.J., Niggemann J.** (2006): Amino acid biogeo- and stereochemistry in coastal Chilean sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, (12), 2970–2989.
- [04543] **Burkhardt M.** (2006): Einsatz von Bioziden in Fassaden. *Applica* 113, (12), 2–6.
- [04544] **Hammes F.A., Salhi E., Köster O., Kaiser H.P., Egli T., von Gunten U.** (2006): Mechanistic and kinetic evaluation of organic disinfection by-product and assimilable organic carbon (AOC) formation during the ozonation of drinking water. *Water Research* 40, (12), 2275–2286.
- [04545] **Wu W.M., Carley J., Gentry T., Ginder-Vogel M.A., Fioren M.N., Mehlhorn T., Yan H., Carol S., Pace M.N., Nyman J., Luo J., Gentile M.E., Fields M.W., Hickey R.F., Gu B.H., Watson D.B., Cirpka O.A., Zhou J.Z., Fendorf S., Kitani-dis P.K., Jardine P.M., Criddle C.S.** (2006): Pilot-scale *in situ* bioremediation of uranium in a highly contaminated aquifer. 2. Reduction of U(VI) and geochemical control of U(VI) bioavailability. *Environmental Science & Technology* 40, (12), 3986–3995.
- [04546] **Wu W.M., Carley J., Fioren M.N., Mehlhorn T., Lowe K., Nyman J., Luo J., Gentile M.E., Rajan R., Wagner D., Hickey R.F., Gu B.H., Watson D.B., Cirpka O.A., Kitani-dis P.K., Jardine P.M., Criddle C.S.** (2006): Pilot-scale *in situ* bioremediation of uranium in a highly contaminated aquifer. 1. Conditioning of a treatment zone. *Environmental Science & Technology* 40, (12), 3978–3985.
- [04547] **Kohler A., Abbaspour K.C., Fritsch M., Schulin R.** (2005): Solute recycling by crops and leaching in a drained arable soil. *European Journal of Soil Science* 56, (2), 145–153.
- [04548] **Yang H., Wang L., Abbaspour K.C., Zehnder A.J.B.** (2006): Virtual water trade: an assessment of water use efficiency in the international food trade. *Hydrology and Earth System Sciences* 10, 443–454.
- [04549] **Uehlinger U.** (1994): Sauerstoff in der Glatt: Photosynthese, Respiration und Sauerstoffhaushalt in einem anthropogen stark beeinflussten Mittellandfluss (Glatt, Kt. ZH). *GWA* 2/94, 123–128.
- [04550] **Gerecke A.C., Giger W., Hartmann P.C., Heeb N.V., Kohler H.-E., Schmid P., Zennegg M., Kohler M.** (2006): Anaerobic degradation of brominated flame retardants in sewage sludge. *Chemosphere* 64, (2), 311–317.
- [04551] **Müller T.A., Fleischmann T., van der Meer J.R., Kohler H.P.E.** (2006): Purification and characterization of two enantioselective α -Keto-glutarate-dependent dioxygenases, RdpA and SdpA, from *Sphingomonas herbicidovorans* MH. *Applied and Environmental Microbiology* 72, (7), 4853–4861.
- [04552] **Moosmann L., Gächter R., Müller B., Wüest A.** (2006): Is phosphorus retention in autochthonous lake sediments controlled by oxygen or phosphorus? *Limnology and Oceanography* 51, (1, part 2), 763–771.
- [04553] **Schmitt H., Stoob K., Hamscher G., Smit E., Seinen W.** (2006): Tetracyclines and tetracycline resistance in agricultural soils: microcosm and field studies. *Microbial Ecology*, doi: 10.1007/s00248-006-9035-y.
- [04554] **McGinnis D.F., Bocaniov S., Teodoru C., Friedl G., Lorke A., Wüest A.** (2006): Silica retention in the Iron Gate I reservoir on the Danube River: The role of side bays as nutrient. *River Research and Applications* 22, (4), 441–456.
- [04555] **Peter A.** (2006): Hydropeaking hinders biodiversity in Swiss rivers. *World Water and Environmental Engineering* 29, (2), 27–28.
- [04556] **Uoskin I.G., Solanki S.K., Kovaltsov G.A., Beer J., Kromer B.** (2006): Solar proton

- events in cosmogenic isotope data. *Geophysical Research Letters* 33, (8),
- [04557] **Schmitt H., Martinali B., Stoob K., Hamscher G., van Beelen P., Smit E., van Leeuwen K., Seinen W.** (2006): Antibiotika als Umweltkontaminanten – Effekte auf Bodenbakterien. *UWSF – Z Umweltchem Ökotox* 18, (2), 110–118.
- [04558] **Buffle M.O., von Gunten U.** (2006): Phenols and amine induced HO center dot generation during the initial phase of natural water ozonation. *Environmental Science & Technology* 40, (9), 3057–3063.
- [04559] **Leuz A.K., Hug S.J., Wehrli B., Johnson C.A.** (2006): Iron-mediated oxidation of antimony(III) by oxygen and hydrogen peroxide compared to arsenic(III) oxidation. *Environmental Science & Technology* 40, (8), 2565–2571.
- [04560] **Berney M., Weilenmann H.U., Egli T.** (2006): Flow-cytometric study of vital cellular functions in *Escherichia coli* during solar disinfection (SODIS). *Microbiology* 152, 1719–1729.
- [04561] **Maurer M., Rothenberger D., Larsen T. A.** (2006): Decentralised wastewater treatment technologies from a national perspective: at what cost are they competitive? *Water Science and Technology* 5, (6), 145–154.
- [04562] **Wenger K., Bigler L., Suter M.J.F., Schönenberger R., Gupta S.K., Schulin R.** (2005): Effect of corn root exudates on the degradation of atrazine and its chlorinated metabolites in soils. *Journal of Environmental Quality* 34, (6), 2187–2196.
- [04563] **Nesatyy V., Ammann A.A., Rutishauser B.V., Suter M.J.F.** (2006): Effect of cadmium on the interaction of 17 beta-estradiol with the rainbow trout estrogen receptor. *Environmental Science & Technology* 40, (4), 1358–1363.
- [04564] **Tockner K., Klaus I., Baumgartner C., Ward J.V.** (2006): Amphibian diversity and nest-ness in a dynamic floodplain river (Tagliamento, NE-Italy). *Hydrobiologia* 565, 121–133.
- [04565] **Paetzold A., Bernet J.F., Tockner K.** (2006): Consumer-specific responses to riverine subsidy pulses in a riparian arthropod assemblage. *Freshwater Biology* 51, (6), 1103–1115.
- [04566] **Li W., Cirpka O.A.** (2006): Efficient geostatistical inverse methods for structured and unstructured grids. *Water Resources Research* 42, (6), W06402, doi: 10.1029/2005WR004668.
- [04567] **Matzinger A.D.** (2006): Is anthropogenic nutrient input jeopardizing unique Lake Ohrid? – Mass flux analysis and management consequences. Dissertation 16390, ETH-Zürich, Switzerland, 130 pp.
- [04568] **Vonmoos M.V.** (2005): Rekonstruktion der solaren Aktivität im Holozän mittels Beryllium-10 im GRIP Eisbohrkern. Dissertation 16224, ETH-Zürich, Schweiz, 145 S.
- [04569] **Philipp B., Erdbrink H., Suter M.J.F., Schink B.** (2006): Degradation of and sensitivity to cholate in *Pseudomonas* sp strain Chol1. *Archives of Microbiology* 185, (3), 192–201.
- [04570] **Franchini A.G., Egli T.** (2006): Global gene expression in *Escherichia coli* K-12 during short-term and long-term adaptation to glucose-limited continuous culture conditions. *Microbiology* 152, (7), 2111–2127.
- [04571] **Gasser D., Hauser L., Quirici R., Preusschoff P., Schläpfer M., Wegmann R., Kleinn J., Verbunt M., Gurtz J., Schär C., Wehrli B.** (2003): Einfluss von Klima- und Landnutzungsänderungen auf den Abfluss der Thur. *Wasser, Energie, Luft* 11/12, 337–344.
- [04572] **Wittmer D.** (2006): Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt. Dissertation 16325, ETH-Zürich, Schweiz, 201 S.
- [04573] **Hostmann M., Bernauer T., Mosler H.J., Reichert P., Truffer B.** (2005): Multi-attribute value theory as a framework for conflict resolution in river rehabilitation. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 13, (2–3), 91–102.
- [04574] **Hoehn E., Cirpka O.A.** (2006): Assessing residence times of hyporheic ground water in two alluvial flood plains of the Southern Alps using water temperature and tracers. *Hydrology and Earth System Sciences* 10, 553–563.
- [04575] **Dominguez D., Gujer W.** (2006): Evolution of a wastewater treatment plant challenges traditional design concepts. *Water Research* 40, (7), 1389–1396.
- [04576] **Luo J., Cirpka O.A., Kitanidis P.K.** (2006): Temporal-moment matching for truncated breakthrough curves for step or step-pulse injection. *Advances in Water Resources* 29, (9), 1306–1313.
- [04577] **Sanchez-Polo M., Rivera-Utrilla J., Salhi E., von Gunten U.** (2006): Removal of bromide and iodide anions from drinking water by silver-activated carbon aerogels. *Journal of Colloid and Interface Science* 300, (1), 437–441.
- [04578] **Leuz A.K.** (2006): Redox reactions of antimony in the aquatic and terrestrial environment. Dissertation 16582, ETH-Zürich, Switzerland, 121 pp.
- [04579] **Töpperwien S.** (2006): Cadmium accumulation in *Scenedesmus vacuolatus* under freshwater conditions. Dissertation 16607, ETH-Zürich, Switzerland, 124 pp.
- [04580] **Franchini A.G.** (2006): Physiology and fitness of *Escherichia coli* during growth in carbon-excess and carbon-limited environments. Dissertation 16585, ETH-Zürich, Switzerland, 219 pp.
- [04581] **Schubert C.J., Durisch-Kaiser E., Wehrli B., Thamdrup B., Lam P., Kuypers M.M.M.** (2006): Anaerobic ammonium oxidation in a tropical freshwater system (Lake Tanganyika). *Environmental Microbiology*, doi: 10.1111/j.1462-2920.2006.001074.x.
- [04582] **Schubert C.J., Coolen M.J.L., Neretin L. N., Schippers A., Abbas B., Durisch-Kaiser E., Wehrli B., Hopmans E.C., Sinninghe Damsté J. S.S., Wakeham S.G., Kuypers M.M.M.** (2006): Aerobic and anaerobic methanotrophs in the Black Sea water column. *Environmental Microbiology*, doi: 10.1111/j.1462-2920.2006.01079.x.
- [04583] **Benekos I.D., Cirpka O.A., Kitanidis P.K.** (2006): Experimental determination of transverse dispersivity in a helix and a cochlea. *Water Resources Research* 42, (7), W07406, doi: 10.1029/2005WR004712.
- [04584] **Hermann E., Schwengeler R., Rotzetter A., Steiner M., Boller M.** (2005): Behandlung von hochbelastetem Strassenabwasser. *GWA Gas, Wasser, Abwasser* 12, 953–959.
- [04585] **Maerki M., Müller B., Wehrli B.** (2006): Microscale mineralization pathways in surface sediments: A chemical sensor study in Lake Baikal. *Limnology and Oceanography* 51, (3), 1342–1354.
- [04586] **Kaenel B.R., Uehlinger U.** (1998): Effects of plant cutting and dredging on habitat conditions in streams. *Archiv für Hydrobiologie* 143, (3), 257–273.
- [04587] **Shen C., Beer J., Ivy-Ochs S.D., Sun Y., Yi W., Kubik P.W., Suter M.J.F., Li Z., Peng S., Yang Y.** (2004): Be-10, C-14 distribution, and soil production rate in a soil profile of a grassland slope at Heshan Hilly Land, Guangdong. *Radio-carbon* 46, (1), 445–454.
- [04588] **Filippini M., Buesing N., Bettarel Y., Sime-Ngando T., Gessner M.O.** (2006): Infection paradox: High abundance but low impact of freshwater benthic viruses. *Applied and Environmental Microbiology* 72, (7), 4893–4898.
- [04589] **Müller B., Wang Y., Wehrli B.** (2006): Cycling of calcite in hard water lakes of different trophic states. *Limnology and Oceanography* 51, (4), 1678–1688.
- [04590] **Dudgeon D., Arthington A.H., Gessner M.O., Kawabata Z.I., Knowler D.J., Leveque C., Naiman R.J., Prieur-Richard A.H., Soto D., Stiassny M.L.J., Sullivan C.A.** (2006): Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews* 81, (2), 163–182.
- [04592] **Finger D., Jaun L., Wüest A.** (2006): Auswirkungen der Stauseen auf den Schwebstoffhaushalt und auf die Primärproduktion des Brienzersees. Veränderungen im Ökosystem Brienzersee, Schlussbericht des Teilprojektes C, 45 S.



La maison économe

«Le bâtiment du futur», «Un pas vers la société à 2000 watts», «La carte de visite de l'architecture zéro énergie», les médias n'ont pas manqué de qualificatifs pour parler du Forum Chriesbach. Le fil conducteur entre tous les comptes rendus: l'Eawag explore tous les aspects de la gestion durable de l'eau en tant que ressource et ouvre lui-même la voie vers un développement viable à long terme.

Le 1^{er} septembre 2006, l'Eawag a procédé à l'inauguration officielle de son nouveau bâtiment. Le jour suivant, près de 2500 personnes intéressées ont profité de l'opportunité qui leur était offerte de venir visiter les locaux abrités derrière la grande façade couverte de lamelles de verre bleu. Par divers moyens de communication, les visiteurs ont reçu une information très complète sur le bâtiment mais aussi sur divers aspects de la recherche de l'Eawag concernant la résolution des problèmes actuels touchant à l'eau.

Un bâtiment sans installation de chauffage. Ce qui fait toute la particularité du Forum Chriesbach, c'est la mise en œuvre systématique des connaissances actuelles en matière de construction durable. Evitant sciemment l'écueil des éléments particulièrement ambitieux ou encore au stade expérimental, les concepteurs ont misé sur des technologies simples et reconnues jouant ensemble de manière simple. Mis à part le rez-de-chaussée abritant le restaurant du personnel, l'accueil et

la bibliothèque, le bâtiment ne nécessite aucune installation de chauffage à proprement parler. Son mur de façade de 45 cm d'épaisseur (dont 30 cm de laine minérale) et ses fenêtres très performantes lui procurent une isolation telle que les déperditions de chaleur sont minimales. Toutes les sources de chaleur sont exploitées, qu'il s'agisse des émissions thermiques des ordinateurs ou de l'éclairage ou de la chaleur corporelle des employés. En hiver, l'air frais provenant de l'extérieur est réchauffé en sous-sol par le biais de 80 tuyaux enterrés de 20 m de long et par échange de chaleur avec l'air repris et celui de la salle des serveurs. L'air peut d'autre part recevoir de la chaleur en provenance du réservoir d'eau chaude. Celui-ci est chauffé grâce aux capteurs solaires installés sur le toit (50 m², système à tubes sous vide) et aux émissions de chaleur en provenance des unités de réfrigération des cuisines. Pour les périodes de pointe correspondant aux périodes de grand froid, une chaleur supplémentaire peut être tirée du réseau de l'Empa et de l'Eawag. D'après les es-

timations, cette consommation ne devrait pas excéder 2500 l de pétrole par an, ce qui est à peine plus élevé que les besoins d'une maison individuelle de conception traditionnelle.

Une fraîcheur agréable en été. 1232 lamelles de verre revêtues d'une trame sérigraphiée constituent une alternative très esthétique aux stores habituels. Toutes les lamelles de la façade s'orientent simultanément en fonction du soleil et des besoins: en hiver, de façon à ce que le maximum d'énergie solaire atteigne le bâtiment, en été, de manière que les rayons du soleil ne surchauffent ni les fenêtres ni l'intérieur. Pendant les périodes très chaudes, l'ensemble du bâtiment est rafraîchi la nuit grâce à l'ouverture de fenêtres dans les bureaux et de lucarnes sur le toit. La chaleur s'échappe par l'atrium comme dans une cheminée et l'air frais de la nuit pénètre dans les bureaux. Les plafonds en béton servent de masse de stockage et les cloisons en terre apportent une contribution supplémentaire à la régulation du climat intérieur. Ainsi, même lorsque la chaleur de juillet atteint 35°C et devient étouffante à l'extérieur, la température ne dépassa pas 26°C à l'intérieur du Forum Chriesbach – et ce, sans aucun système de climatisation consommateur d'énergie.

L'énergie grise. Construire écologiquement signifie aussi prendre en compte tout le cycle de vie du bâtiment, c'est-



Les 1^{er} et 2 septembre derniers, l'Eawag a fêté l'inauguration de son nouveau bâtiment principal, le Forum Chriesbach. Ce bâtiment administratif, sans doute le plus durable de la Suisse, fait partie des lauréats du Prix Solaire 2006 dans la catégorie «Bâtiments». (Photos: Eawag; Roger Frei, Zurich; Sandra Neuhaus, Meilen)

à-dire aussi l'énergie grise investie pour sa fabrication. Relativement parlant, sa part est d'autant plus élevée que les besoins énergétiques liés à l'exploitation et à l'utilisation du bâtiment sont faibles. Les concepteurs ont donc veillé à utiliser des matériaux peu consommateurs de ressources comme du béton recyclé, des cloisons en terre-copeaux bois ou des planchers en xylolite. L'usage de matériaux composites difficilement démantelables a été évité autant que possible. De même, les matériaux forts consommateurs d'énergie pour leur fabrication devaient présenter la plus grande durée de vie possible. 460 mètres carrés de cellules photovoltaïques installés sur le toit du bâtiment permettent de couvrir un tiers des besoins en électricité. En 25 ans, cette installation aura produit 7,5 fois plus d'énergie que la quantité nécessaire pour sa fabrication. Avec une consommation d'énergie par personne d'environ 190 watts pour l'électricité et la chaleur et 240 watts pour l'énergie grise, le Forum Chriesbach démontre que la société à 2000 watts¹ n'est plus seulement une vision d'avenir dans le domaine du bâtiment, mais peut bel et bien être réalisée dès aujourd'hui.

L'application pratique sur place. La gestion de l'eau et des eaux usées a naturellement une importance toute particulière dans le bâtiment de l'Eawag: les eaux de toiture sont collectées dans un jardin d'eau d'une capacité de stockage

de 80 m³ et réutilisées pour alimenter les chasses d'eau des toilettes. Le reste des eaux ruisselant sur les autres surfaces imperméabilisées est récupéré et épandu sur des pelouses extensives afin de s'infiltrer dans le sol. Toutes les toilettes sont conçues pour effectuer une séparation des urines alors collectées à des fins de recherche expérimentale. Il est ainsi possible d'acquérir une expérience pratique très précieuse sur la technologie NoMix et de faire avancer la recherche sur place en fonction des idées et développements les plus récents. Des informations plus détaillées sont disponibles à ce sujet sur le site www.novaquatis.ch. Il est d'autre part prévu d'amorcer prochainement la revitalisation du Chriesbach, ruisseau qui traverse le site de l'Eawag. L'ensemble de la zone comprenant également la nouvelle garderie commune à l'Eawag et à l'Empa contribue ainsi de plus en plus à la création d'un «sustainable campus», un campus universitaire durable.

Le refus du luxe. Le Forum Chriesbach a été conçu par l'équipe de Bob Gysin + Partner BGP et réalisé par l'entreprise générale Implenia. Le bâtiment de six étages abrite 150 postes de travail, une salle de congrès pouvant accueillir 140 personnes, deux salles de conférences d'une capacité de 40 personnes, plusieurs salles de réunion et zones de communication, de même que la bibliothèque commune de l'Eawag et de l'Empa et le restaurant du personnel

aQa détenteur du Biolabel. Les locaux sont occupés depuis juin 2006. Jusqu'à présent, les utilisateurs sont satisfaits, les petits problèmes de démarrage dus par exemple à des défaillances de capteurs ou de signaux de contrôle étant résolus au fur et à mesure. Le préjugé selon lequel un tel bâtiment ne saurait être financable que par les pouvoirs publics s'avère non fondé. En effet, le renoncement délibéré à un aménagement intérieur luxueux et à une autarcie énergétique ne se justifiant pas par la situation économique actuelle a permis de maintenir les coûts en dessous de la somme de 32,7 millions de francs alloués par le crédit de la Confédération. Le prix de construction de 572 francs par mètre cube (SIA, CFC2) ne craint en aucun cas la comparaison avec les frais de construction traditionnelle. ○ ○ ○

Andri Bryner, Eawag

Pour plus d'informations et renseignements sur les visites du Forum:

www.forumchriesbach.eawag.ch

¹ La consommation de 2000 watts par personne s'applique à tous les domaines de la vie quotidienne et ne se limite pas aux lieux de travail. En Suisse, elle est actuellement comprise entre 5000 et 6000 watts par personne.

Notes

Visite du président de la Confédération

Monsieur Moritz Leuenberger, président de la Confédération, a visité l'Eawag le 1^{er} décembre 2006, accompagné de son état-major. L'attraction principale était certainement le Forum Chriesbach, pour l'heure probablement le bâtiment administratif le plus durable de Suisse (cf. p. 30). C'est le credo que reprit l'ancien directeur Ueli Bundi pour son allocution dans laquelle il souligna que l'Eawag s'attachait à l'élaboration de solutions durables pour les problèmes de plus en plus brûlants qui se posent dans le monde par rapport à l'eau, et qu'il était donc de son devoir de commencer par appliquer lui-même les

principes qu'il préconise. Les invités se sont montrés impressionnés par la nouvelle construction mais aussi par le «feu sacré» qui anime l'Eawag.

Photos: Eawag



Journée CCR: intensifier la coopération de recherche avec l'Europe

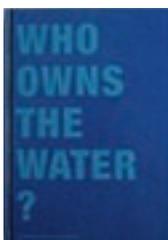
Beaucoup de chercheurs suisses n'avaient jusqu'à présent qu'une idée assez vague de ce qu'est le Centre Commun de Recherche (CCR/JRC) de la Commission européenne et de ce que représentent ses objectifs et missions. Pour pallier ce manque d'information, le CCR s'est présenté aux scientifiques suisses par le biais d'un colloque organisé par l'Eawag, le Secrétariat d'Etat à l'éducation et à la recherche, le Conseil des EPF et Euresearch qui s'est tenu au Forum Chriesbach le 16 mars dernier. Cette journée d'information a proposé un tour d'horizon des activités très variées du CCR qui se compose de sept instituts localisés sur cinq sites aux Pays-Bas, en Belgique, en Allemagne, en Italie et en Espagne, et qui compte près de 3000 employés. Charles Kleiber, Secrétaire d'Etat à l'éducation et à la recherche, a qualifié

cette journée de «kick-off meeting» amorçant l'intensification de la collaboration de recherche entre la Suisse et l'Union Européenne. A ses yeux, la coopération avec le CCR constitue une perspective de grande valeur tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif. Roland Schenkel, Directeur Général du CCR estime lui aussi que de nombreuses possibilités s'offrent aux chercheurs venant de Suisse pour s'impliquer dans les travaux du CCR.



A qui appartient l'eau?

Le nouveau livre intitulé «A qui appartient l'eau?» se voit déjà comparé au livre et au film d'Al Gore sur le changement climatique. L'Eawag a contribué à la réalisation de cet ouvrage par des moyens tant humains que financiers. Des textes compétents mais accessibles et des



photos esthétiques et dérangeantes poussent le lecteur à se préoccuper des problèmes liés à l'eau et notamment de la question fondamentale: «L'eau est-elle un produit négociable ou sa libre disposition fait-elle partie des droits intrinsèques de l'être humain?»

CHF 69.90/€ 49,90, disponible en allemand et en anglais; Editeur: Lars Müller, Baden, septembre 2006.

Agenda

Conférences de vendredi «Linking Science and Water Management»

Chaque vendredi à 11 heures, Eawag Dübendorf

27 Avril

Membrane Processes for Treatment of Drinking and Wastewater. Overview of the Research Activities

Wouter Pronk, Eawag

4 Mai

Urbane Wasserinfrastruktursysteme: Nachhaltigkeitsdefizite und Handlungsoptionen

Harald Hiessl, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, Deutschland

11 Mai

The Water Framework Directive: Characterisation of Surface Waters in Austria

Martin Wimmer, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich

25 Mai

Ecological and Biogeochemical Consequences of Ocean Acidification

Jean-Pierre Gattuso, CNRS-UPMC, Frankreich

1 Juin

Advective Processes in a Canyon-shaped Mediterranean Reservoir: Ecological Basis for Drinking Water Supply Management

Joan Armengol, University Barcelona, Spanien

8 Juin

Fast Microbial Analysis of Drinking Water Based on Flow Cytometry: New Methods and their Application

Thomas Egli, Eawag Dübendorf

15 Juin

Uncertainty Analysis for Urban Water Engineering

Marc Neumann, Eawag Dübendorf

22 Juin

The new WHO Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater – from Strict Norms to a Comprehensive Risk Assessment/Management Framework

Robert Bos, World Health Organisation (WHO), Genf

29 Juin

Climate Change and Water Resources

Glen George, University College London, UK

Info unter: www.eawag.ch/veranstaltungen