

Eawag

News



Mix ou NoMix? La séparation des urines sous tous les angles

C'est une bonne idée, mais personne n'en veut! Page 8

Un engrais tiré de la bibliothèque. Page 17

NoMix: Solution au problème des médicaments dans l'environnement? Page 23



Willi Gujer, membre de la direction de l'Eawag, professeur de gestion des eaux urbaines à l'EPF de Zurich

NoMix, une option à prendre au sérieux

C'est dans une petite salle de cours placée dans un endroit discret que j'ai tenu ma première conférence sur l'idée bizarre de collecter les urines séparément des autres eaux noires pour les soumettre à un traitement spécial. C'était en 1996, lors d'un grand colloque de l'International Association of Water Quality (IAWQ, aujourd'hui IWA). Peu de participants avaient trouvé le chemin de cette petite salle et certains collègues étaient même venus m'écouter par esprit de solidarité. Aujourd'hui, les conférences sur la technologie NoMix se tiennent dans les sessions principales de ce même colloque où elles font salle comble et le nombre de publications augmente de façon exponentielle.

A la recherche de solutions économiques pour la protection des eaux et guidés par la pensée du développement durable, nos premières idées ont été axées sur le recyclage des nutriments et notamment du phosphore. D'autres aspects sont depuis venus se greffer sur cette idée première; le devenir et l'impact des micropolluants contenus dans l'urine, c'est-à-dire des hormones et résidus médicamenteux, ont maintenant plus d'attrait pour les médias que les matières nutritives dont l'élimination peut être effectuée depuis des années grâce à une technologie fiable.

A côté de ces questions techniques et scientifiques, les projets liés à la technologie NoMix réservaient à l'ingénieur que je suis de nouveaux aspects à la fois inattendus et intéressants: la mise à contribution des ménages et donc le contact direct avec les utilisateurs étaient totalement inhabituels. De même, nous avons dû apprendre à dialoguer avec les industriels du sanitaire et nos succès ne sont encore que très relatifs dans ce domaine. Les décisions politiques ont subitement joué un rôle à la fois différent et plus important que lors de la planification de stations d'épuration traditionnelles. Pour nous montrer à la hauteur de nos

nouvelles attributions, nous avons cherché la collaboration d'économistes et de spécialistes des sciences sociales, une tendance qui apparemment ne caractérise pas uniquement notre projet.

Le groupe de projet de Novaquatis a fait preuve de courage. Il s'est engagé avec beaucoup d'énergie dans un projet qui dans ses débuts était certes jugé intéressant de par les buts poursuivis, mais dont la plupart se moquaient, trouvant les moyens par trop exotiques. Le projet déconcertant des débuts a aujourd'hui acquis une importance et une reconnaissance internationales. Il suscite un intérêt grandissant dans le monde entier et livre de vraies réponses à des problèmes autrement inextricables. L'une des grandes forces de l'Eawag est de permettre l'émergence et la réalisation de projets aussi étendus et de si longue haleine. Si en effet l'Eawag se limitait à n'être qu'un institut universitaire, il serait contraint de donner davantage de poids au court terme.

Je me réjouis avec tous ceux qui ont participé à Novaquatis du succès avec lequel il a pu être achevé et des résultats parlants et probants qu'il a pu livrer. J'espère maintenant que les praticiens auront eux aussi suffisamment de courage pour concrétiser les résultats que nous avons obtenus. Même si pour le moment ce ne sont pas les nations industrielles qui en profiteront, comme nous l'imaginions à nos débuts, mais bien plutôt les pays en développement et émergents, ce succès va déjà au-delà de nos espérances initiales.

Photo de couverture: WC NoMix de la société Roediger installés au Forum Chriesbach et dans la bibliothèque cantonale de Bâle-Campagne à Liestal. L'orifice d'évacuation des urines n'est ouvert que lorsque l'utilisateur est assis sur les WC. Dès qu'il se relève pour actionner la chasse d'eau, une valve referme automatiquement le conduit. Les urines parviennent ainsi non diluées dans le réservoir de stockage. © Ruedi Keller, Zurich

Sommaire

Article thématique

4 NoMix sous tous les angles



Ruedi Keller, Zurich

Est-il possible de faire avancer le traitement des eaux usées sur la voie de la durabilité en partant d'une séparation des urines à la source suivie d'un traitement spécifique? Cette question a occupé le projet transversal Novaquatis pendant les six dernières années.

Recherches actuelles

8 C'est une bonne idée, mais personne n'en veut!

Quelle est l'opinion de la population sur les WC NoMix et sur les engrais à base d'urine?

11 NoMix: tout commence dans la salle de bain



Ruedi Keller, Zurich

L'élaboration d'installations NoMix capables de collecter une urine concentrée sans toutefois rencontrer de problèmes d'obstruction est une véritable gageure pour l'industrie sanitaire. Novaquatis livre une

base solide pour ce travail de recherche et développement.

14 Traitement de l'urine: souplesse à la carte

De nombreuses techniques peuvent être utilisées pour traiter les urines. Elles peuvent, chacune à sa manière, modifier cette matière première insolite en fonction des besoins.

17 Un engrais tiré de la bibliothèque



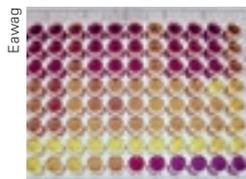
Eawag

Pour la première fois en Suisse, la fabrication d'engrais à partir des urines est tentée avec les urines collectées à la bibliothèque cantonale de Liestal entièrement équipée de WC NoMix.

20 Traitement de l'urine: de l'expérimentation à la pratique

Par le biais de l'électrodialyse et de l'ozonation, il est possible de produire un engrais ne présentant aucun danger pour la santé et l'environnement.

23 NoMix: la solution au problème des médicaments dans l'environnement?



Eawag

Lors du traitement des urines, il faut s'assurer que les médicaments et hormones contenus ne puissent être libérés dans l'environnement. Novaquatis a développé un système de tests particulier.

26 Ce que la Chine savait depuis longtemps

La ville de Kunming et ses millions d'habitants veulent enfin maîtriser leur problème d'assainissement. La technologie NoMix peut les y aider de manière décisive.

Conclusion

29 Premières expériences pratiques NoMix peut secourir les océans Aux praticiens de jouer

Divers

30 Publications Novaquatis

33 Publications

35 Lettre de la nouvelle directrice

36 Notes

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

Figures: Peter Nadler, Küssnacht

Maquette: TBS Identity, Zurich

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

NoMix sous tous les angles



Tove A. Larsen, ingénieur chimiste, et Judit Lienert, biologiste, dirigent de concert le projet Novaquatis de l'Eawag

Novaquatis, le projet inter et transdisciplinaire de l'Eawag, a étudié les différents aspects de la collecte et du traitement séparé des urines pour une nouvelle approche de la gestion des eaux urbaines. Les résultats montrent que la technologie NoMix représente une innovation flexible et avantageuse dans les scénarios les plus divers. Mais c'est avant tout dans la résolution du problème grandissant de la gestion des ressources nutritives globales et du recyclage des nutriments que réside la contribution majeure du nouveau concept de séparation des urines.

Est-il possible de développer le traitement des eaux usées dans une optique de durabilité en partant d'une séparation des urines à la source? Cette question occupe l'Eawag déjà depuis le milieu des années 1990 [1]. L'idée est venue du fait que l'urine constitue moins de 1% des eaux usées mais livre la majeure partie des substances nutritives. Ainsi, si les urines étaient collectées à la source et traitées séparément, les nutriments pourraient être mieux éliminés. Cette approche permettrait de construire les stations d'épuration plus petites alors dimensionnées pour une dégradation et une rétention optimale de la matière organique dissoute et en suspension véhiculée par les eaux usées. Les matières nutritives pourraient en outre être réintégrées dans les cycles agronomiques. Ceci serait particulièrement intéressant pour le phosphore dont les réserves naturelles intéressantes sur le plan de l'accessibilité et de la qualité risquent d'être épuisées à

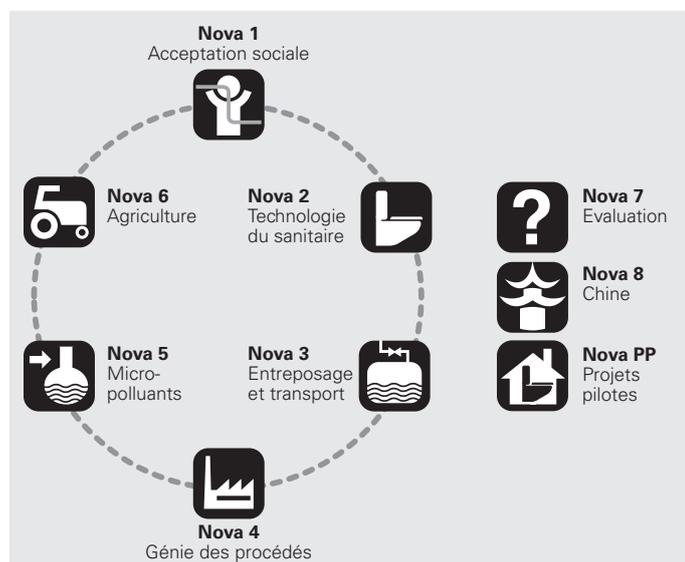
moyen terme. Dans le but d'évaluer la faisabilité de la technologie NoMix, l'Eawag a lancé le projet transversal Novaquatis. Ce projet inter et transdisciplinaire s'est déroulé de 2000 à 2006.

Les travaux du projet ont été répartis en neuf blocs de travail (Fig. 1). La plupart des résultats de Novaquatis sont très satisfaisants et ont prouvé toute la justesse de consacrer créativité, énergie et moyens au développement et à la promotion du concept et de la technologie NoMix. Nous disposons maintenant d'une vision plus différenciée des avantages et inconvénients de cette nouvelle technologie.

Nova 1: Acceptation sociale. Parce qu'elle intervient au niveau de ce que les ménages ont de plus privé, la technologie NoMix doit impérativement être acceptée et plébiscitée par la population. Dans le bloc de travail Nova 1, nous avons donc étudié les aspects d'acceptation sociale de la séparation des urines. Résultat principal: la plupart des personnes interrogées se déclare *a priori* favorable à la technologie NoMix, mais refuse à long terme de faire des concessions au niveau du confort. L'article de Judit Lienert, p. 8, en dit plus long.

Nova 2: Technologie du sanitaire. La fabrication de WC NoMix est l'affaire de l'industrie sanitaire. Les WC NoMix, actuellement produits en petit nombre, ne sont pas encore totalement optimisés. Le plus grand problème qui se pose encore est celui de l'obstruction des tuyauteries d'évacuation des urines par des dépôts minéraux. Nous avons donc cherché le dialogue avec les industriels et exposé nos résultats sur les processus de cristallisation des dépôts, sur leur étendue et sur les moyens éventuels d'éviter leur formation (cf. article de Kai Udert, p. 11). Les discussions ont clairement montré que les industriels du sanitaire ne seront prêts à s'engager pleinement dans l'optimisation de la technologie NoMix qu'une fois qu'une stratégie générale aura été établie et que l'existence de marchés concrets sera clairement reconnaissable. Pour l'heure, on observe aux Pays-Bas les premiers signes d'émergence d'un marché de lancement européen: près

Fig. 1: Les neuf blocs de travail du projet Novaquatis.





Eawag

Forum Chriesbach, même les urines provenant des toilettes des dames et des hommes empruntent des voies différentes. Le nouveau bâtiment principal de l'Eawag est entièrement équipé de WC NoMix.

de 20 projets pilotes y sont en cours de planification ou de réalisation. Ils sont le résultat direct de la rigidification de la législation hollandaise sur les normes de rejet des matières nutritives [2].

Nova 3: Entreposage et transport. Le transport des urines de chez les particuliers jusqu'à un centre de traitement s'est révélé être le problème majeur de la technologie NoMix. Si ce n'est pas réellement une surprise, l'acuité du problème s'est révélée dans toute son ampleur lors du dialogue avec les industriels du sanitaire engagé dans le bloc Nova 2. Bien que Novaquatis ait développé diverses stratégies pour le transport des urines à travers le réseau d'assainissement en place [1, 3], elles ne semblent pas constituer de motivation suffisante pour susciter l'engagement des fabricants qui restent sceptiques face à des concepts ne pouvant fonctionner que dans des zones d'assainissement de petite dimension et dans des conditions bien précises.

Les alternatives telles que le transport par camion-citerne ou l'installation de canalisations spécifiques aux urines nous semblent peu attrayantes du fait de leur coût très élevé. Par contre, l'idée d'un traitement décentralisé des urines, au niveau même des habitations par exemple, semble assez prometteuse, comme le montrent les résultats du bloc Nova 4.

Nova 4: Génie des procédés. Que l'on veuille éliminer les substances nutritives ou au contraire les récupérer à des fins agricoles, un traitement des urines semble inévitable dans un contexte urbain. D'un côté, parce que leur transport et entreposage en sont tributaires. De l'autre, parce que de nombreux pays ont établi des cahiers des charges très stricts en matière de fertilisants. La recherche effectuée dans le bloc Nova 4 a montré qu'il existait un grand nombre de techniques envisageables pour le traitement et la transformation des urines et que la plupart d'entre elles étaient peu demandeuses en énergie. Cette diversité rend le traitement des urines particulièrement flexible, différents scénarios pouvant être choisis en fonction des objectifs poursuivis. Dans son article de la page 14, Max Maurer récapitule les diffé-

rents procédés envisageables, dont un grand nombre ont été mis au point à l'Eawag. Wouter Pronk décrit quant à lui une séquence particulière de procédés destinée à la fabrication d'un engrais à base d'urine (cf. article p. 20) et actuellement testée dans le cadre d'un projet pilote mené sur le site d'une station de traitement des eaux usées du canton de Bâle-Campagne.

Nova 5: Micropolluants. Par la fonction rénale, nous n'éliminons pas seulement des substances nutritives mais aussi des produits organiques dissous issus de notre métabolisme. Dans le projet Novaquatis, nous nous sommes intéressés de près à deux groupes de composés excrétés: les hormones et les médicaments. Ces substances se rencontrent en effet de plus en plus fréquemment dans le milieu aquatique et de plus en plus d'études démontrent qu'elles ont une influence délétère sur les organismes vivants. Il apparaît donc opportun de débarrasser les urines de ces micropolluants, que ce soit par souci de protection des eaux ou pour éviter leur rejet dans l'agriculture par le biais d'un engrais à base d'urine.

Mû par ces préoccupations, l'Eawag a testé différentes techniques de traitement telles que la nanofiltration ou l'électrodialyse sur leur pouvoir de séparation des micropolluants (cf. article de Wouter Pronk, p. 20). Au-delà de cet aspect, des procédures d'essais ont été développées dans le cadre de Nova 5 pour détecter et doser différents composés et pour évaluer l'impact écotoxicologique des mélanges de polluants. Ces techniques permettent de suivre les micropolluants tout au long du traitement des urines. Cet aspect est traité en détail dans l'article de Beate Escher et Judit Lienert, p. 23.

Nova 6: Agriculture. L'agriculture occupe une position stratégique dans les cycles d'éléments nutritifs. Bien que nous n'ayons pu trouver de financement approprié pour ce bloc de travail de Novaquatis, nous avons pu obtenir des résultats très intéressants grâce à la bonne volonté et à la collaboration de chercheurs externes. Ainsi, une enquête d'opinion effectuée dans la paysannerie suisse a montré que les agriculteurs seraient disposés à utiliser des matières fertilisantes obtenues à partir d'urine humaine. L'innocuité du produit doit cependant avoir été démontrée tant sur le plan de l'hygiène que des micropolluants et l'engrais doit être bon marché (cf. article de Judit Lienert, p. 8). Pour juger de sa qualité agronomique, l'Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL) basé à Frick et l'Université de Bonn ont d'autre part effectué des essais de fertilisation avec des produits à base d'urine livrés par le bloc Nova 4. Leurs résultats font état d'une efficacité équivalente à celle des engrais habituels du commerce. L'article de Markus Boller, p. 17, livre des informations supplémentaires à ce sujet ainsi que sur les conditions que doit remplir un engrais à base d'urine pour pouvoir être homologué en Suisse.

Nova 7: Evaluation. Même au terme du projet Novaquatis, une évaluation définitive de la technologie NoMix reste impossible. Cependant, il semble maintenant certain que le problème de l'élimination des nutriments gagnera encore en importance au niveau global, suite notamment à la croissance démographique galo-

pante et à la concentration des populations dans les villes [4]. On constate en même temps que les solutions «end-of-pipe» consistant dans l'assainissement en un système d'égouts et de stations d'épuration terminales deviennent insuffisantes dans les zones fortement peuplées (voir dans ce cadre l'exemple de la ville de Kunming exposé dans l'article de Tove Larsen et collaborateurs, p. 26). La technologie NoMix pourrait représenter une solution économique pour réduire à long terme les rejets de substances nutritives [5]. Selon les besoins, ces nutriments peuvent être

restitués à l'agriculture ou utilisés dans l'industrie, ce qui peut être particulièrement intéressant dans le cas du phosphore. Etant donné la pénurie d'eau qui règne à l'échelle planétaire, la technologie NoMix peut être très avantageuse dans certaines régions où les eaux usées sont directement réutilisées après leur traitement, comme par exemple en Afrique du Sud. Si les eaux usées étaient débarrassées des urines à la source, leur épuration serait largement simplifiée et l'eau traitée de bien meilleure qualité.

Les aspects financiers jouent également un rôle important. Si l'on considère que les coûts de l'épuration des eaux usées resteront au niveau actuel après mise en œuvre de la stratégie NoMix, chaque ménage Suisse pourrait effectuer un investissement de 1250 à 2100 francs (comprenant WC NoMix, transport et traitement des urines; [7]). Le rendement d'élimination des substances nutritives serait d'autre part largement accru du fait de la technologie NoMix. La mise en œuvre de la nouvelle technique d'assainissement s'accompagnera cependant tout d'abord d'un surcroît d'investissement. Les économies qu'elle permet ne seront en effet visibles que lors de la construction de nouvelles stations d'épuration nécessitant alors un équipement moins élaboré et fonctionnant à long terme à moindre coût. Il est donc primordial de bien ordonner la période de transition entre le système actuel et un système impliquant la technologie NoMix.

Nova 8: Chine. La séparation des urines était autrefois très répandue dans les campagnes chinoises. Au vu des importants problèmes environnementaux auxquels la Chine est actuellement

La technologie NoMix: un produit d'exportation?

Le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUÉ) avertissait dès 2004 sur les problèmes d'eutrophisation rencontrés dans beaucoup de zones côtières du monde. Les stocks de poissons du plateau continental y seraient menacés par des apports excessifs d'éléments nutritifs et en particulier d'azote [6].

Le projet Novaquatis intervient exactement au cœur du problème, au niveau des rejets de matières nutritives: jusqu'à 50 % du phosphore et même 80 % de l'azote des eaux usées domestiques proviennent des urines. A l'échelle globale, il est illusoire d'espérer résoudre rapidement et efficacement les problèmes de charge nutritive à la seule aide des stations d'épuration traditionnelles. La séparation des urines propose une alternative prometteuse.

Mais l'Europe souhaite elle aussi intensifier sa lutte contre la pollution azotée et les normes de rejet vont certainement être revues à la baisse. Les responsables hollandais de la protection des eaux tentent actuellement de savoir si la séparation des urines ne représenterait pas une solution plus avantageuse que les filières classiques de traitement des eaux usées pour respecter les normes de rejet [2].

Dans le cadre de Novaquatis, nous nous sommes surtout concentrés sur la situation en Suisse étant donné que nous y disposons de l'expérience la plus riche et que nous souhaitons évaluer l'intérêt de la séparation des urines pour les villes modernes. Il est maintenant clair que l'avenir se jouera au niveau international. C'est pourquoi les aspects globaux occuperont une place centrale dans les projets consécutifs à Novaquatis. Partant des résultats déjà obtenus, nos efforts se concentreront tout d'abord sur les zones dans lesquelles la technologie NoMix devrait apporter rapidement des améliorations significatives, c'est-à-dire notamment les villes côtières en forte expansion.

Dans les zones urbaines en forte expansion, le système d'assainissement traditionnel est souvent pris de vitesse. La situation est souvent particulièrement précaire à proximité des lacs ou des côtes. La technologie NoMix peut apporter des solutions intéressantes. C'est ce qu'a montré le projet Novaquatis dans le cadre d'un projet pilote mené à Kunming (à gauche), une ville de plusieurs millions d'habitants située en bordure du lac Dianchi fortement concerné par les problèmes d'eutrophisation (cf. article p. 26) [8].

NASA



confrontée, il nous a semblé pertinent de tenter d'introduire la technologie NoMix également en milieu urbain. Dans notre article de la page 26, nous relatons notre expérience de Kunming, la ville jumelée avec Zurich. Le lac Dianchi situé non loin de la ville ne parvient pas à être protégé d'une surfertilisation grandissante par le phosphore, même par la mise en œuvre des techniques traditionnelles les plus performantes au niveau de l'épuration des eaux résiduelles. A l'inverse, un potentiel énorme semble résider dans les mesures à la source comme la séparation des urines. C'est pourquoi le concept NoMix est majoritairement plébiscité par les experts chinois. Il est donc tout à fait concevable que la technologie NoMix puisse être développée et optimisée grâce à l'implantation massive des toilettes séparatrices en Chine.

Nova PP: Projets pilotes. Nos recherches n'auraient pas abouti de la sorte sans les projets pilotes permettant d'observer et d'étudier la séparation des urines en conditions réelles (voir l'article de Markus Boller, p. 17). Une contribution décisive a été apportée par les projets importants réalisés dans le canton de Bâle-Campagne. Une comparaison avec les réalisations similaires dans d'autres pays européens comme la Suède, l'Allemagne, l'Autriche ou les Pays-Bas révèle une évolution rapide: la technologie NoMix est de plus en plus considérée comme une alternative réaliste aux techniques classiques d'élimination des substances nutritives.

Les avantages de NoMix: réduire les émissions d'éléments nutritifs, récupérer les nutriments et éliminer les micropolluants. Les résultats de Novaquatis dressent le portrait d'une technologie élégante et en bien des points séduisante mais devant encore surmonter un certain nombre d'obstacles avant de trouver une réelle application pratique. Les apports pour l'environnement sont clairs: la technologie NoMix permet de respecter des standards élevés en matière de rejets de matières nutritives et de faire progresser le traitement des eaux usées sur la voie du recyclage des nutriments et de l'élimination des micropolluants. En Europe, ces objectifs peuvent également être atteints par le biais de techniques classiques de traitement des eaux à condition d'engager les moyens nécessaires. Mais plus la réglementation en matière de rejets sera sévère, plus les coûts du traitement traditionnel augmenteront, jusqu'à ce que, finalement, la restauration d'un lac ou cours d'eau doive un jour être abandonnée pour raisons financières. En Suisse, le Greifensee en est malheureusement un exemple.

Les exigences posées à la technologie NoMix sont donc de multiple nature. Elle doit livrer à *moindre coût* une solution qui remplace ou complète les techniques traditionnelles d'élimination des matières nutritives pratiquées dans les stations d'épuration. En même temps, cette solution NoMix doit laisser le champ libre aux options de séparation des urines, de recyclage des nutriments et d'élimination de micropolluants.

L'avenir de NoMix: le développement de solutions décentralisées. Les résultats de Novaquatis montrent clairement ce que sera la prochaine tâche à accomplir: trouver une solution au problème du transport des urines. En effet, soit une voie de

transport adéquate est identifiée et développée, soit l'urine doit être traitée sur place, au niveau du lotissement, du bloc d'habitation ou au mieux, de l'immeuble ou de la maison. Il est difficile de trouver des solutions de transport adaptées et leur recherche n'entre pas directement dans les compétences de l'Eawag. Par contre, l'Eawag est prédestiné à la recherche de solutions de traitement décentralisées. Ceci consiste d'une part à élaborer des techniques et installations pouvant être produites à faible coût et demandant peu d'entretien et de surveillance. D'un autre côté, des solutions doivent être développées au niveau organisationnel: comment s'assurer d'une utilisation et d'un entretien corrects des installations? Quels sont les dispositifs à mettre en place pour que les pannes et défaillances techniques puissent être signalées et traitées à temps?

Pour que la technologie NoMix atteigne un coût de mise en œuvre et d'utilisation assez bas, il faut que des marchés autorisant une production de masse se mettent en place. Au cours du projet Novaquatis, nous avons constaté que la technologie NoMix trouverait une application judicieuse dans bien des régions, notamment celles marquées par une forte croissance démographique comme les régions côtières par exemple. Nous sommes donc persuadés que des marchés de lancement adéquats pourront être identifiés.

Au niveau scientifique, l'élaboration de solutions décentralisées constitue une énorme gageure tant du point de vue technique que socio-économique. Nous sommes cependant d'avis que l'environnement fondamentalement interdisciplinaire de l'Eawag est particulièrement propice à un tel travail de recherche et développement et réfléchissons actuellement à la possibilité de nous engager dans cette voie pour les années à venir. ○ ○ ○

- [1] Larsen T.A., Gujer W. (1996): Separate management of anthropogenic nutrient solutions (human urine). *Water Science and Technology* 34 (3-4), 87-94.
- [2] www.stowa.nl
- [3] Rauch W., Brockmann D., Peters I., Larsen T.A. Gujer W. (2003): Combining urine separation with waste design: an analysis using a stochastic model for urine production. *Water Research* 37, 681-689.
- [4] Larsen T.A., Maurer M., Udert K.M., Lienert J. (submitted): Nutrient cycles and resource management: Implications for choice of wastewater treatment technology. *Water Science and Technology*. Accepted for presentation at the IWA conference on Advanced Sanitation in Aachen, 12-13th March, 2007.
- [5] Wilsenach J.A., van Loosdrecht M.C.M. (2006): Integration of processes to treat wastewater and source-separated urine. *Journal of Environmental Engineering* 132, 331-341.
- [6] Pelley J. (2004): «Dead zones» on the rise. *Online Science News* May 5, Environmental Science & Technology.
- [7] Maurer M., Rothenberger D., Larsen T.A. (2005): Decentralised wastewater treatment technologies from a national perspective: At what cost are they competitive? *Water Science and Technology, Water Supply* 5 (6), 145-154.
- [8] Image Science and Analysis Laboratory, NASA-Johnson Space Center, 26 Aug. 2005, <http://earth.jsc.nasa.gov/sseop/efs/>



Judit Lienert, biologiste, est co-directrice du projet Novaquatis

C'est une bonne idée, mais personne n'en veut!

Vrai? Non, faux! Notre étude d'acceptation réalisée dans le cadre de projets pilotes lancés dans des lieux publics, des ménages et des exploitations agricoles montre que de nombreuses personnes sont tout à fait favorables aux WC NoMix et à l'utilisation de fertilisants à base d'urine. Les WC NoMix présentent cependant encore quelques faiblesses qui devront être corrigées par l'industrie sanitaire. C'est alors seulement qu'une diffusion à grande échelle pourra être envisagée.

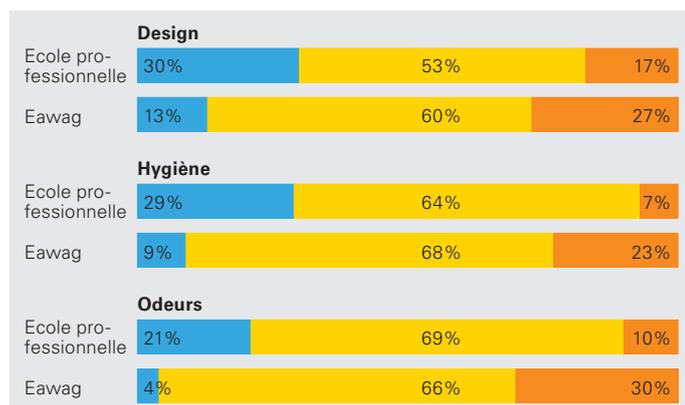
L'innovation technologique «NoMix» n'est pas testée à l'écart de tous dans quelque station d'épuration anonyme mais bien au cœur de notre vie quotidienne dans nos propres salles de bain. La première réaction lorsque l'on aborde le sujet de la séparation des urines est bien souvent: «C'est une bonne idée, mais personne ne veut sérieusement de WC NoMix!» Et si on ajoute que les urines ainsi collectées serviront à la production d'un fertilisant, on entend: «Laissez tomber! Les paysans sont contre et personne n'achètera les légumes ainsi produits.» Pour vérifier le bien-fondé de ces dires, nous avons mené une enquête auprès de la population, sur les WC NoMix et sur les fertilisants à base d'urine.

Les WC NoMix sont-ils bien acceptés dans les lieux publics?

En Suisse, certains lieux publics ont déjà été équipés de WC NoMix. Nous avons interrogé 1249 utilisateurs et utilisatrices de ce nouveau type de toilettes dans une école professionnelle d'une part et à l'Eawag d'autre part. Le degré d'acceptation était

Fig. 1: Opinion d'utilisateurs et utilisatrices de WC NoMix dans une école professionnelle (534 personnes) et à l'Eawag (715 personnes) sur les qualités de design et d'hygiène ainsi que sur les émissions d'odeurs du nouveau système comparé aux WC traditionnels [1].

En bleu: les WC NoMix sont meilleurs que les WC classiques; en jaune: les deux systèmes sont équivalents; en orange: les WC NoMix sont moins bons.

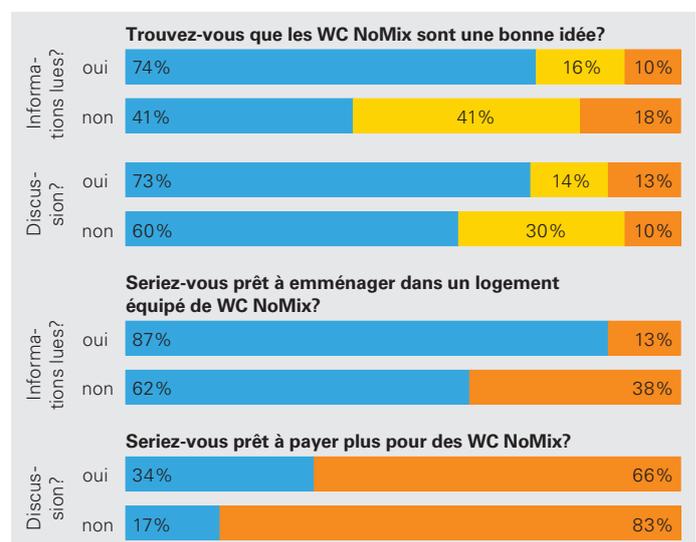


très élevé dans les deux cas: 72% des personnes interrogées trouvaient que la collecte séparative des urines était une bonne idée et 86% d'entre eux seraient prêts à emménager dans un logement équipé de WC NoMix [1]. Ces WC sont en majorité jugés équivalents aux toilettes classiques aussi bien sur le plan du design que de l'hygiène et des odeurs (Fig. 1). Une grande partie des usagers interrogés a d'autre part adopté un nouveau comportement pour la nouvelle technologie: 72% d'entre eux ont déclaré s'asseoir pour uriner et 58% jeter le papier hygiénique dans un conteneur séparé, permettant ainsi d'économiser 84 litres d'eau pour 100 utilisations [calcul effectué dans 1].

Une grande disparité d'opinion a cependant pu être observée entre les groupes d'utilisateurs. Ainsi, 32% des employés de

Fig. 2: Relations entre acceptation des WC NoMix et information sur la technologie NoMix [1]. En plus des questions d'opinion, il a été demandé à 480 usagers dans une école professionnelle et à l'Eawag s'ils avaient lu nos informations ou discuté des WC NoMix avec d'autres personnes.

En bleu: oui; en jaune: sans opinion; en orange: non.



l'Eawag jugent l'hygiène des WC NoMix moins bonne que celle des WC classiques. En ce qui concerne les odeurs, ils sont même 50% à privilégier l'ancien système. Curieusement, seuls 17% des visiteurs de l'Eawag partageaient cette opinion. La raison en est peut-être que les employés de l'Eawag restent désagréablement marqués par des événements antérieurs: ils se souviennent sans doute de pannes au cours desquelles un mauvais fonctionnement du réservoir d'urine et la manipulation d'urines non diluées ont généré de fortes nuisances olfactives.

La propreté des WC est donc certainement le préalable indispensable à une meilleure acceptation de la nouvelle technologie et à l'adoption de nouveaux comportements. Mais nous avons aussi constaté qu'une bonne politique d'information soutenue par des entretiens personnalisés permettait également d'influer sur le degré d'acceptation, le comportement et l'opinion des usagers (Fig. 2).

Ces résultats se voient confirmés par un sondage représentatif mené pour nous auprès de 501 visiteurs de la bibliothèque cantonale de Bâle-Campagne à Liestal (résultats non encore publiés) dont le bâtiment est entièrement équipé de WC NoMix.

Les Suisses seraient-ils prêts à utiliser des WC NoMix chez eux?

Les résultats d'une étude menée avec des groupes de réflexion composés de 44 volontaires issus de la population civile semblent indiquer que les WC NoMix pourraient être acceptés dans les ménages à certaines conditions (Fig. 3) [2]. Les participants s'étaient informés sur cette nouvelle technologie à l'aide d'un outil informatique [3] avant d'utiliser un WC NoMix à l'Eawag. Un aspect est souvent revenu au cœur des débats: le fort besoin d'entretien du système dû à la cristallisation de l'urine dans les conduits pouvant à la longue s'en trouver obturés (voir également l'article de Kai Udert, p. 11) [4]. Cet aspect en découragerait la plupart des participants.

Nous avons poursuivi nos investigations en installant des WC NoMix dans 4 logements privés. Les réactions des habitants et habitantes ont été très diverses: certains restaient sceptiques, d'autres étaient favorables à ce type de WC pour des raisons environnementales et n'avaient pas de difficultés particulières. Plusieurs d'entre eux ont constaté un besoin accru de nettoyage. En outre, on a critiqué le fait que certains utilisateurs masculins hésitaient à s'asseoir ou que la position assise était inconfortable. Il a enfin été constaté que les enfants en particulier ont de grandes difficultés à atteindre le bon compartiment, ce qui accroît nettement les besoins de nettoyage (aspect également valable pour les lieux publics). Ces enseignements demandent à être confirmés par des études de plus grande envergure, qui ne sont malheureusement pas réalisables en Suisse à cause d'un manque de projets pilotes au niveau des ménages.

Quelle est la situation dans les autres pays? A l'inverse, certains pays européens ont déjà mené dans le domaine privé des projets pilotes d'envergure parfois considérable. Ainsi, plus de 135000 toilettes bicamérales ont été installées en Suède depuis 1990. Il s'agit en général de systèmes très rustiques installés dans les maisons de vacances isolées de toute infrastructure [5].



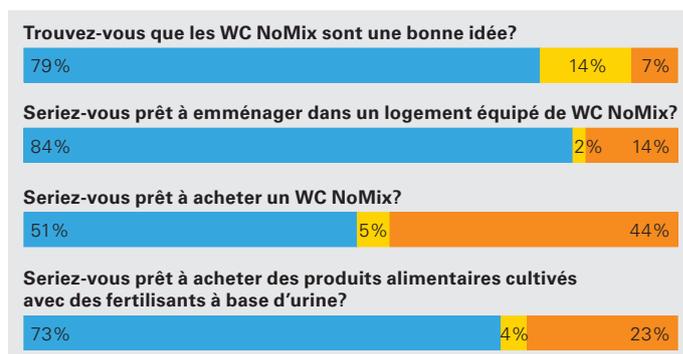
Ruedi Keller, Zurich

«Etes-vous satisfait des WC NoMix?» Sondage effectué auprès du personnel de l'Eawag.

Mais des milliers de WC NoMix ont également été installés dans des quartiers écologiques et dans le cadre de projets pilotes communaux en milieu urbain. Les projets pilotes se multiplient d'autre part aux Pays-Bas, en Autriche et en Allemagne. Dans les pays récemment industrialisés comme la Chine, la collecte séparative des urines est également une solution intéressante aux problèmes environnementaux (cf. article de Tove Larsen, p. 26).

A Linz, en Autriche, 88 logements et une école ont été équipés de WC NoMix en 2003 [6]. 50% des usagers jugent le confort d'utilisation de ce nouveau type de WC moins bon que celui des WC traditionnels. 69% des utilisateurs masculins déclarent tout de même avoir souvent ou systématiquement adopté une position assise lors de l'utilisation. Environ 65% des personnes interrogées observent un besoin accru de nettoyage, ce qui correspond bien à notre propre expérience. Dans l'ensemble, les usagers sont uniformément répartis sur l'échelle de satisfaction, un tiers d'entre eux étant soit entièrement satisfaits, soit moyennement satisfaits, soit non satisfaits du système NoMix. S'ils en avaient la possibilité, la moitié d'entre eux reviendraient à un système traditionnel.

Fig. 3: Opinion de 44 participants à des groupes de réflexion sur la technologie NoMix [2]. En bleu: oui; en jaune: sans opinion; en orange: non.



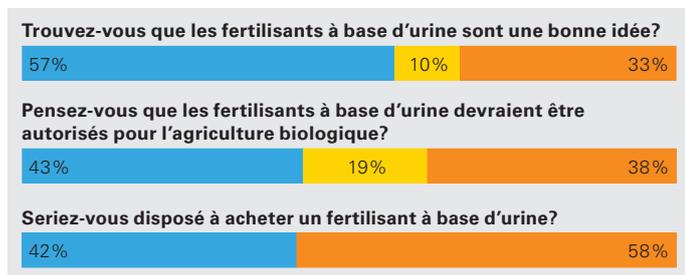


Fig. 4: Opinion d'agriculteurs de Suisse alémanique sur les fertilisants à base d'urine [8]. Des questionnaires avaient été adressés par courrier à 467 exploitants, 127 ont répondu. En bleu: oui; en jaune: sans opinion; en orange: non.

Comme en Suisse, les responsables des projets en Autriche et en Suède observent une meilleure acceptation du système et une meilleure motivation pour la position assise lorsque les personnes concernées sont bien informées et convaincues de l'utilité (écologique) du nouveau concept [7].

Les agriculteurs et la population seraient-ils prêts à accepter un fertilisant à base d'urine? L'idée de produire un fertilisant à partir des urines collectées a été étonnamment bien acceptée par les agriculteurs (Fig. 4) [8]. Tel est le résultat d'un sondage que nous avons mené par courrier. L'important pour les producteurs est cependant d'obtenir un produit non pollué: les agriculteurs interrogés se disaient préoccupés par le fait que le fertilisant pouvait contenir des résidus de médicaments ou d'hormones.

La population semble encore plus favorable à ce type de fertilisant, à condition bien sûr qu'il ne présente pas de risque pour la santé. La majorité des personnes interrogées dans les groupes de réflexion (Fig. 3) ou à la bibliothèque cantonale se déclaraient prêts à acheter des produits alimentaires cultivés avec des fertilisants à base d'urine. Une grande partie des 501 personnes interrogées à la bibliothèque cantonale pouvaient également envisager d'utiliser ce type de fertilisant dans leur propre jardin ou sur leur balcon. Toutefois, un petit tiers d'entre elles se disaient opposées au fertilisant à base d'urine, en partie par dégoût et en partie par crainte des résidus médicamenteux et des agents pathogènes qu'il pourrait contenir.

Peu d'études similaires ont été menées dans d'autres pays. En Suède, les fertilisants à base d'urine sont largement acceptés par la population. Les urines y sont stockées et hygiénisées mais n'y sont pas traitées ou conditionnées. Il se trouve cependant toujours un agriculteur pour épandre l'urine ou les habitants l'utilisent directement dans leur jardin. Les odeurs perçues lors de l'épandage ne sont pas considérées comme dérangeantes et les utilisateurs ne semblent pas craindre de consommer les légumes ainsi cultivés [7].

Et maintenant? Nous savons aujourd'hui que la population est grandement favorable aux toilettes NoMix. Ces WC présentent cependant encore des défauts pouvant être jugés dérangeants au quotidien. La diffusion de la technologie NoMix au niveau des ménages peut donc s'avérer délicate et elle doit en tout cas faire l'objet d'un suivi et d'un accompagnement très sérieux. Les usa-

gers privés doivent être informés dès le début des inconvénients possibles et doivent s'engager de manière contractuelle à les accepter [4]. Il est très important d'établir un contact personnel avec les habitants de manière à réagir promptement aux problèmes qui pourraient se poser. L'installation des WC NoMix dans les lieux publics pose moins de problèmes – dans la mesure où l'entretien et le nettoyage sont assurés par le service domestique.

Nous nous trouvons aujourd'hui face à un dilemme: d'un côté, il est nécessaire de mettre en place des projets pilotes d'envergure pour perfectionner la technologie NoMix; d'un autre côté, les WC NoMix ne sont pas encore à la hauteur des WC traditionnels. Il est dangereux de lancer à grande échelle une technologie encore immature au risque de provoquer des réactions de rejet et de faire avorter le projet. Il reviendrait en fait à l'industrie sanitaire d'optimiser les WC NoMix pour faire avancer cette nouvelle technologie. Mais les grandes firmes hésitent à réaliser des investissements importants tant qu'elles ne sont pas convaincues de l'existence d'un marché pour le nouveau produit. Il reste donc aux spécialistes de l'assainissement ainsi qu'à l'administration, aux maîtres d'œuvre et aux politiciens à montrer aux industriels qu'un intérêt pour la technologie NoMix existe bel et bien au sein de la population [9]. Cette dernière semble tout à fait désireuse de contribuer au développement de cette innovation. C'est pourquoi nous sommes d'avis qu'il faut oser une application pratique des WC NoMix, même si le procédé n'est pas encore arrivé à maturité et sous réserve, évidemment, que les projets soient convenablement accompagnés. ○ ○ ○

- [1] Lienert J., Larsen T.A. (2006): Considering user attitude in early development of environmentally-friendly technology: A case study of NoMix toilets. *Environmental Science & Technology* 40, 4838–4844.
- [2] Pahl-Wostl C., Schönborn A., Willi N., Muncke J., Larsen T.A. (2003): Investigating consumer attitudes towards the new technology of urine separation. *Water Science and Technology* 48 (1), 57–65.
- [3] www.novaquatis.eawag.ch/english/NoMixtool_e.html
- [4] Lienert J., Larsen T.A. (submitted): Pilot projects in bathrooms: a new challenge for wastewater professionals.
- [5] Kvarnström E., Emilsson K., Richert Stintzing A., Johansson M., Jönsson H., af Petersens E., Schönning C., Christensen J., Hellström D., Qvarnström L., Ridderstolpe P., Drangert J.-O. (2006): Urine diversion: one step towards sustainable sanitation. *EcoSanRes Publications Series Report* 2006-1. www.ecosanres.org/news-publications.htm
- [6] Starkl M., Binner E., Fürhacker M., Holubar P., Koeck S., Lenz K., Mascher F., Ornetzeder M., Pollak M., Haberl R. (2005): Nachhaltige Strategien der Abwasserentsorgung im ländlichen Raum – SUS-SAN. Endbericht Forschungsprojekt des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Wien, www.wassernet.at/article/archive/5688/
- [7] Johansson M., Jönsson H., Höglund C., Richert Stintzing A., Rodhe L. (2001): Urine separation – closing the nutrient cycle. Final report on the R&D project: Source-separated human urine – a future source of fertilizer for agriculture in the Stockholm region? *VERNA Ecology & Stockholm Water Company, Stockholm*.
- [8] Lienert J., Haller M., Berner A., Stauffacher M., Larsen T.A. (2003): How farmers in Switzerland perceive fertilizers from recycled anthropogenic nutrients (urine). *Water Science and Technology* 48 (1), 47–56.
- [9] Larsen T.A., Lienert J. (2003): Societal implications of re-engineering the toilet. *Water Intelligence Online* March 2003. www.iwaponline.com/wio/2003/03/default001.htm

NoMix: tout commence dans la salle de bain



Kai Udert, ingénieur environnemental et collaborateur scientifique au département Génie de l'environnement

Le principe des WC NoMix est simple: les urines sont séparées du reste des eaux noires et acheminées vers un conteneur spécial. Or, les conduits qu'elles empruntent se bouchent facilement par des dépôts minéraux et la teneur en matières nutritives des urines collectées est parfois bien plus faible que ne le laisseraient présager les estimations. Les résultats que nous avons obtenus par expérimentation et par simulation assistée par ordinateur permettent, en collaboration avec l'industrie sanitaire, d'envisager des systèmes sanitaires améliorés.

L'urine fraîche est une solution instable. L'urée qu'elle contient se dégrade très vite, sa dégradation commençant déjà dans le siphon et les conduites. Il s'ensuit une précipitation de calcium et de magnésium dont les dépôts viennent boucher les conduits d'évacuation. Le risque d'obstruction est limité par la chasse d'eau mais cela provoque inévitablement une dilution des urines qui impose l'installation de réservoirs de grande capacité et complique tout traitement ultérieur. Le développement de systèmes NoMix capables de collecter une urine concentrée sans pour autant se boucher est une véritable gageure pour l'industrie sanitaire.

Dans le but de fournir une base solide pour l'optimisation des toilettes NoMix, nous avons étudié certains processus dans le détail: nous voulions d'une part savoir comment se forment les dépôts, quelle est leur composition et comment il serait possible de les empêcher. D'autre part, nous avons cherché à comprendre pourquoi la composition des urines collectées différerait si radica-

lement des données sur l'urine fraîche citées dans la littérature [1–3].

Formation et composition des dépôts. Les résultats de nos études expérimentales indiquent que les dépôts proviennent de précipitations consécutives à l'hydrolyse de l'urée. Les microorganismes présents dans les toilettes et les conduites d'évacuation transforment l'urée en ammoniac et en dioxyde de carbone et font ainsi monter le pH de l'urine aux environs de 9 (Fig. 1A). Ce pH élevé provoque à son tour une sursaturation en différents minéraux qui cristallisent sous la forme de struvite ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) et d'hydroxylapatite ($Ca_5(PO_4)_3OH$), de même que de calcite ($CaCO_3$) lorsque la part d'eau de chasse est importante (Fig. 1B) [2]. Grâce à une simulation assistée par ordinateur, nous avons calculé qu'il suffisait que 8% de l'urée contenue dans les urines fraîches soient dégradés pour qu'un pH propice à la cristallisation de 95% des dépôts possibles soit atteint. Si ces précipités obstruent conduites et siphons, ils ne posent aucun problème dans les conteneurs car ils ne peuvent s'y dessécher et n'ont donc pas de possibilité de se fixer.

Les conduites d'évacuation du système NoMix peuvent s'obstruer facilement.



Kai Udert, Eawag

Plus la dilution de l'urine est forte, plus le risque d'obstruction est faible. Les toilettes séparatrices doivent capter les urines sans les mélanger à une eau de rinçage. Or, c'est justement lorsque l'urine n'est pas ou peu diluée que les WC NoMix se bouchent (Fig. 2). C'est ce qu'ont révélé nos études de terrain. Cette constatation vient contredire l'idée reçue selon laquelle les concrétions ne se formeraient que lorsque l'urine est mélangée à de l'eau puisque le calcium et le magnésium entrant dans la composition des précipités seraient livrés par cette même eau. Il se trouve cependant que l'urine renferme davantage de calcium et de magnésium que l'eau potable ordinaire. Nos calculs montrent que 1400 mg de sels peuvent cristalliser à partir d'un litre d'urine non diluée alors qu'un litre d'urine diluée dans un rapport de 1:1 livrerait environ 900 mg de sels [2]. La quantité des produits de précipitation par unité de volume est un facteur important de

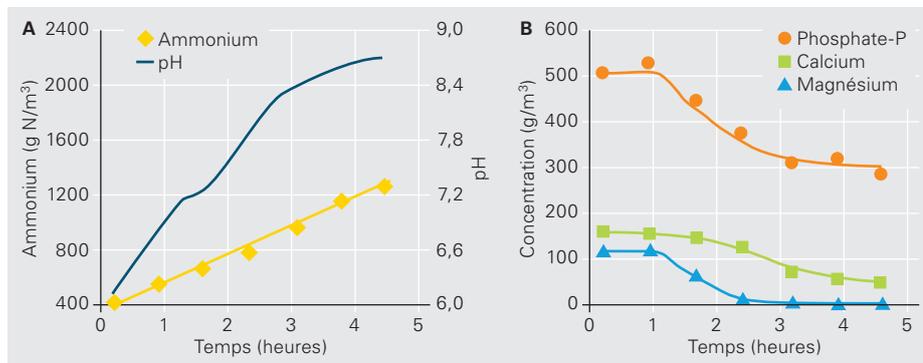


Fig. 1: Suite à l'hydrolyse de l'urée, la concentration d'ammonium et le pH montent (A) tandis que les concentrations en calcium, magnésium et phosphate diminuent (B).

l'obstruction des conduites mais il n'est pas le seul. Des temps de séjour prolongés de l'urine dans les conduites et siphons et des sections trop faibles lui sont également favorables. Ces observations permettent d'énoncer un certain nombre de recommandations permettant d'éviter ou de retarder la formation de dépôts obstruants dans les conduites [1]. Au niveau actuel des connaissances, les mesures suivantes peuvent être envisagées :

- ▶ Dissolution et évacuation des produits de précipitation à intervalles réguliers (avec de l'acide citrique à 10% par exemple).
- ▶ Précipitation ciblée dans de grands siphons (comme cela est pratiqué dans les urinoirs sans eau).
- ▶ Utilisation d'eau de pluie au lieu d'eau potable pour les chasses d'eau.
- ▶ Elargissement de la section des conduites.
- ▶ Evacuation rapide de l'urine en dehors des conduites à petite section, p. ex. par des conduites verticales.

D'autres solutions ont été imaginées mais elles doivent encore être développées et testées avant de pouvoir être recomman-

dées. L'une d'elles consisterait par exemple en un revêtement intérieur des tuyauteries susceptible de repousser bactéries ou d'empêcher la fixation de dépôts.

Concentrations des composants de l'urine collectée. Les caractéristiques techniques des toilettes NoMix ont une grande influence sur la composition des urines collectées. Des concentrations élevées sont souhaitables pour faciliter les traitements ultérieurs, ce qui est particulièrement valable pour le phosphore et l'azote. Or les concentrations énoncées dans la littérature pour les urines non diluées n'ont pu être atteintes dans aucun des projets pilotes que nous avons menés (cf. article de Max Maurer p. 14). Dans l'urine stockée, les concentrations en azote et en phosphore étaient respectivement de 1,5 à 5 fois, et de 2 à 10 fois inférieures aux valeurs citées pour l'urine fraîche [3, 9, 10]. Plusieurs causes peuvent être avancées: la dilution avec l'eau de rinçage est la même pour les deux éléments nutritifs. Une grande partie des phosphates dissous est extraite de l'urine lors des cristallisations

Les WC NoMix et les urinoirs sans eau collectent les urines et économisent l'eau

De nombreuses cultures pratiquent la collecte séparée des urines et des matières fécales depuis des siècles et elle est encore très répandue dans certains pays en développement et émergents. Il faudra cependant attendre les années 1990 pour voir apparaître en Suède les premières toilettes séparatrices à chasse d'eau. A l'heure actuelle plusieurs petits fabricants proposent des WC NoMix. Dans les projets pilotes de Novaquatis, nous avons testé ceux de quatre sociétés: WostMan [4], Dubbletten [5], Gustavsberg [6] et Roediger [7]. Tous les modèles présentent une évacuation séparée de l'urine et des autres eaux noires dans la cuvette mais se distinguent au niveau du système de chasse d'eau. Dans la plupart des modèles, l'eau de rinçage est répartie sur l'ensemble de la cuvette, une partie de l'eau empruntant donc la voie d'évacuation des urines lors de chaque chasse. Le WC de la société Roediger est différent. Il comprend en effet une valve qui ne s'ouvre que lorsqu'une personne est assise sur la lunette. Lorsque cette personne se relève et actionne la chasse d'eau, la valve se ferme et l'urine est récupérée presque sans dilution. La société Dubbletten

s'efforce elle aussi de réduire la dilution mais applique pour cela un principe totalement différent: les urines et les eaux noires résiduelles sont recueillies dans deux cuvettes différentes qui sont rincées à l'aide de deux dispositifs séparés. La quantité d'eau de rinçage entraînée dans le réservoir de stockage avec les urines peut ainsi être maintenue à un niveau très faible. La plupart des projets pilotes de Novaquatis comprenaient d'autre part des urinoirs sans eau. Contrairement aux WC NoMix, ces urinoirs sont proposés par un grand nombre de fabricants et sont installés dans de nombreux lieux publics dans le but notamment d'économiser l'eau, ce qui s'explique par leur conception particulièrement économe en eau. Les toilettes NoMix de type Dubbletten remplissent également cette fonction, à condition toutefois que le papier hygiénique n'ait pas à être évacué avec les urines mais soit jeté dans un conteneur prévu à cet effet. Un sondage mené à l'Eawag a montré que 58% des utilisateurs et utilisatrices de ces WC Dubbletten avaient effectivement adapté leur comportement aux exigences du nouveau système [8].

consécutives à l'hydrolyse de l'urée [2]. Dans le cas où les conduites et réservoirs sont aérés, une partie de l'azote peut s'échapper sous la forme gazeuse d'ammoniac à la suite également de la dégradation de l'urée. Dans les installations prévues pour le public ou les bureaux, une faiblesse des concentrations peut aussi s'expliquer par l'absence de l'urine matinale très concentrée.

Les WC NoMix doivent être perfectionnés. A l'heure actuelle, les WC NoMix ne sont proposés que par un petit nombre de fabricants, et ce dans des quantités très limitées. Le développement des toilettes NoMix ne progresse donc que très lentement, ce qui rend la diffusion de la nouvelle technologie encore plus difficile. Les premiers enseignements tirés des projets pilotes de Novaquatis ont déjà pu être intégrés dans le perfectionnement des WC NoMix de la société Roediger. Ils se basent principalement sur les réponses des utilisateurs et utilisatrices consultés par sondage (cf. article de Judit Lienert, p. 8). Les critiques portent sur la difficulté et la nécessité accrue de nettoyage des toilettes, sur la nécessité de la position assise et sur l'emplacement des deux points d'évacuation. Des problèmes olfactifs ont d'autre part été signalés; il est cependant tout à fait possible que les désagréments perçus n'aient pas émané des toilettes NoMix mais plutôt des urinoirs sans eau voisins mal nettoyés.

Pour faire avancer le processus de développement, des représentants de l'industrie sanitaire et de l'assainissement ont d'autre part été conviés à une table ronde. Les discussions conduites par Novaquatis portaient sur les conditions à remplir pour pouvoir mettre sur le marché des toilettes NoMix optimisées. Il s'est avéré que les fabricants de sanitaire souhaitaient des marchés de lancement bien caractérisés et suffisamment importants pour pouvoir faire correspondre les développements aux besoins identifiés. De tels marchés existent principalement là où l'assainissement et la protection des eaux se heurtent à des problèmes qu'ils ont du mal à résoudre, c'est-à-dire dans les villes en forte expansion des pays en développement et émergents. Mais les régions arides comme l'Australie peuvent également constituer un marché intéressant pour la technologie NoMix. La stratégie de Novaquatis qui vise à introduire progressivement la technologie NoMix dans les villes disposant déjà d'un système d'assainissement constitue cependant une option peu intéressante pour les industriels qui jugent le marché insuffisant. L'industrie sanitaire accorde d'autre part une grande importance à l'opinion des pro-

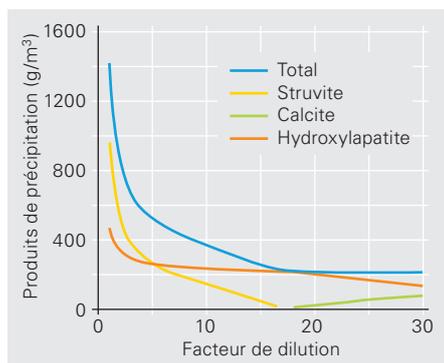


Fig. 2: La formation de cristaux de struvite, d'hydroxylapatite et de calcite dépend du degré de dilution des urines.



Les conduites d'évacuation des urines verticales et de grand diamètre permettent d'éviter les risques d'obstruction.

fessionnels de l'assainissement. Si ceux-ci jugent la technologie NoMix intéressante et soutiennent son implantation, l'industrie sanitaire se sentirait stimulée dans cette direction.

L'industrie sanitaire reste néanmoins favorable et intéressée et estime être en mesure de résoudre assez rapidement les problèmes techniques des WC NoMix actuels. Un tel travail de recherche et développement a évidemment un certain prix. ○ ○ ○

- [1] Udert K.M., Larsen T.A., Gujer W. (2003): Biologically induced precipitation in urine-collecting systems. *Water Science and Technology: Water Supply*. 3 (3), 71–78.
- [2] Udert K.M., Larsen T.A., Gujer W. (2003): Estimating the precipitation potential in urine-collecting systems. *Water Research* 37, 2667–2677.
- [3] Udert K.M., Larsen T.A., Biebow M., Gujer W. (2003): Urea hydrolysis and precipitation dynamics in a urine-collecting system. *Water Research* 37, 2571–2582.
- [4] www.wost-man-ecology.se
- [5] www.dubblotten.nu
- [6] www.gustavsberg.com
- [7] www.roevac.com
- [8] Lienert J., Larsen T.A. (2006): Considering user attitude in early development of environmentally-friendly technology: A case study of NoMix toilets. *Environmental Science & Technology* 40, 4838–4844.
- [9] Ciba-Geigy (1977): *Wissenschaftliche Tabellen Geigy, Teilband Körperflüssigkeiten*. 8. Ausgabe, Basel.
- [10] Rossi L., Lienert J., Larsen T.A. (submitted): Real-life efficiency of urine source separation: experience from households and an institutional setting. *Water Research*.



Max Maurer, ingénieur chimiste et ingénieur des procédés au sein du département de Génie de l'environnement

Traitement de l'urine: souplesse à la carte

Une fois l'urine collectée, que faire? Les propriétés très particulières de l'urine autorisent une grande diversité de traitements. Ceux-ci peuvent modifier ce liquide particulier en fonction des besoins: en retirer certaines substances polluantes ou le transformer en fertilisant agricole par exemple. L'Eawag a testé l'aptitude de certains traitements à atteindre les divers objectifs.

La technologie NoMix prévoit un traitement séparé des urines collectées. Or, le traitement de ce liquide très particulier (Tab. 1 et encadré) nécessite le développement de techniques de procédé spécifiques. Notre objectif a donc été de rassembler différentes approches méthodologiques de bonne applicabilité pratique. Pour ce faire, nous avons tout d'abord effectué une recherche bibliographique sur les procédés déjà utilisés pour le traitement des urines. Nous avons d'autre part testé en laboratoire l'aptitude d'autres techniques de traitement. Le résultat de ces travaux se présente sous la forme d'un vaste catalogue de méthodes d'hygiénisation et de stabilisation, de séparation et d'inactivation des micropolluants organiques ainsi que de récupération ou d'élimination des nutriments (Tab. 2, détails dans [1]). Elles permettent un traitement d'autant plus flexible de l'urine qu'elles peuvent être combinées en une même unité de traitement pour répondre aux besoins les plus divers (voir également l'article de Wouter Pronk, p. 20).

Hygiénisation par stockage. L'urine collectée peut renfermer des germes pathogènes provenant soit de personnes malades soit d'une contamination par les matières fécales. La méthode la plus simple pour hygiéniser l'urine consiste à la stocker sur une période de plusieurs mois. La température de stockage est alors décisive. Certaines études ont montré qu'un stockage de 6 mois à 20°C était suffisant pour obtenir une urine de qualité hygiénique irréprochable. D'autres techniques de stérilisation existent comme par exemple l'exposition aux UV ou le traitement à haute pression mais elles n'ont jamais été testées sur les urines.

Le traitement à l'acide ou les traitements biologiques stabilisent les urines. Il est nécessaire dans certains cas de stabiliser les urines avant leur traitement. La stabilisation consiste à conserver ou à éliminer les composants labiles de façon à écarter les sources de mauvaises odeurs et les nuisances environnementales dues aux émanations d'ammoniac.

L'urine fraîche peut être conservée grâce à l'adjonction d'un acide fort comme par exemple une solution de 2,9 g/l d'acide sulfurique, puisqu'elle est stable à un pH inférieur à 4. Lors des missions spatiales de longue durée c'est par exemple de cette façon que l'urine est préparée en vue de la récupération de l'eau.

En revanche, la filtration stérilisante, autre procédé de stabilisation testé dans le cadre de notre étude, ne s'est pas avérée viable dans la pratique étant donné que les enzymes de décomposition dissoutes dans l'urine ne sont pas retenues par les filtres.

Les urines déjà décomposées peuvent également être stabilisées par le biais de traitements biologiques. Nous avons déjà utilisé différentes configurations de bioréacteurs à cet effet. Dans un tel système, la matière organique facilement biodégradable est décomposée par voie bactérienne tandis qu'une nitrification, processus bactérien aérobie par lequel l'ammoniac est transformé en nitrites et en nitrates, permet d'abaisser le pH de l'urine et d'éliminer l'ammoniac volatil. Selon la configuration du réacteur biologique, la nitrification est plus ou moins complète et la solution obtenue est un mélange inodore de nitrate ou de nitrite d'ammonium.

Tab. 1: Composition chimique de l'urine collectée et stockée provenant soit d'un ménage équipé de WC séparateurs à chasse d'eau [2] soit du bâtiment administratif de l'Eawag équipé d'urinoirs sans eau [3] comparée à celle de l'urine fraîche [4]. DCO = demande chimique en oxygène, paramètre de mesure de la teneur en matière organique.

	Urine stockée		Urine fraîche
	Avec chasse d'eau Ménage	Sans chasse d'eau Bureaux	Non diluée Données biblio
Degré de dilution $V_{urine}/(V_{urine} + V_{eau})$	0,33	1	1
pH	9,0	9,1	6,2
N_{total} (g/m ³)	1795	9200	8830
$NH_4^+ + NH_3$ (g N/m ³)	1691	8100	463
$NO_3^- + NO_2^-$ (g N/m ³)	0,06	0	–
P_{total} (g/m ³)	210	540	800–2000
DCO (g O ₂ /m ³)	–	10000	–
K (g/m ³)	875	2200	2737
Na (g/m ³)	982	2600	3450
Cl (g/m ³)	2500	3800	4970
Ca (g/m ³)	15,75	0	233
Mg (g/m ³)	1,63	0	119

L'urine, un liquide à part

Les urines collectées et stockées sur une période prolongée ont des caractéristiques très différentes du produit d'origine (Tab. 1). Elles se parent en effet d'une odeur très agressive d'ammoniac et leur pH passe d'une valeur de 6 à plus de 9. Ces deux propriétés sont le résultat de l'hydrolyse bactérienne de l'urée qui s'accompagne d'une libération d'ammoniac et de gaz carbonique. De plus, la quantité d'eau de rinçage présente dans les conteneurs de stockage influe sur la composition des urines.

L'élément le plus marquant est certainement la forte concentration en nutriments et en matière organique de l'urine non diluée. Les concentrations en azote et en phosphore totaux sont respectivement 200 fois et 100 fois supérieures aux teneurs des eaux usées normales cependant que la demande chimique en

oxygène est environ 30 fois plus élevée. Si on compare d'autre part l'urine stockée à l'urine fraîche, on observe certaines transformations: d'un côté, la teneur en azote minéral ($\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$) et le pH augmentent suite à l'hydrolyse de l'urée. De l'autre, ce processus induit une baisse des concentrations en calcium (Ca), en magnésium (Mg) et en phosphates qui se déposent sous forme solide sur les parois des conteneurs de stockage ou dans les canalisations (cf. article de Kai Udert, p. 11).

Les métaux lourds sont pratiquement absents des urines humaines. Celles-ci renferment en revanche de nombreux résidus pharmaceutiques et hormones excrétés par voie rénale (cf. article de Beate Escher, p. 23).

La solution de nitrate peut ensuite être utilisée pour produire un fertilisant liquide à action rapide, la solution de nitrite pouvant subir un traitement ultérieur en réacteur Anammox. Le procédé Anammox consiste en une transformation anaérobie d'ammoniac en azote moléculaire par adjonction de nitrites. Il est également envisageable d'utiliser les deux types de solutions pour lutter contre les odeurs et la corrosion dans les égouts.

Les micropolluants sont détruits ou inactivés par ozonation.

L'ozonation s'est avérée être une méthode efficace d'élimination des micropolluants. Ce procédé ne produit pas toujours une dégradation complète des polluants mais permet leur désactivation presque totale. Pour extraire les polluants d'un produit spécifique,

comme d'un engrais par exemple, le recours à la nanofiltration ou à l'électrodialyse peut être envisagé (pour plus de détails, voir l'article de Wouter Pronk, p. 20). Il semble que tous les micropolluants ne soient pas dégradables dans les réacteurs et qu'une élimination totale nécessite une étape supplémentaire d'ozonation. Dans nos études, les composés les moins bien dégradés ont été le propranolol (bêtabloquant), l'ibuprofène (anti-inflammatoire) et l'éthinylestradiol (hormone de synthèse), les hormones naturelles telles que l'estradiol et l'estrone étant à l'inverse très bien éliminées.

Récupération des nutriments par évaporation et par stripping.

De par sa composition, l'urine est un engrais de type

Tab. 2: Procédés envisageables pour le traitement des urines [1]. o = aucun effet, + = effet positif, ++ = fort effet positif, ? = effet possible mais non étudié.

	Hygiénisation	Réduction de volume	Stabilisation	Récupération des nutriments	Dégradation/inactivation des micropolluants	Séparation des nutriments/micropolluants	Élimination des nutriments
Hygiénisation							
Stockage	+	o	o	o	o	o	o
Stabilisation							
Acidification	+	o	++	o	?	o	o
Filtration stérilisante	+	o	++	o	o	o	o
Nitrification	+	o	++	o	?	o	o
Récupération des nutriments							
Réduction de volume, par évaporation par ex.	+	++	+	++	o	o	o
Cristallisation de struvite	o	++	+	++ (surtout P)	o	++	o
Adsorption sélective	o	+	o	++ (seul N)	o	+	o
Stripping de l'ammoniac	o	+	o	++ (seul N)	o	++	o
Élimination des nutriments							
Anammox	+	o	++	o	?	+	++
Élimination des micropolluants							
Electrodialyse	++	+	+	+	o	+	o
Nanofiltration	++	o	+	o	o	++	o
Ozonation	+	o	+	o	++	o	o

composé. La proportion d'azote, de phosphore et de potassium (rapport N:P:K) est à peu près de 100:6:25 (Tab. 1), soit conformément à la nomenclature habituelle pour les fertilisants N:P₂O₅:K₂O = 0,9:0,12:0,26 (pourcentages massiques). Différentes méthodes peuvent être utilisées pour concentrer les nutriments ou pour les extraire isolément:

► Réduction de volume: cela permet de faciliter le stockage, le transport et le dosage. La méthode la plus répandue est la concentration par évaporation. Elle est également pratiquée à petite échelle dans les stations spatiales. Dans l'essai que nous avons réalisé en soumettant de l'urine non hydrolysée (cf. encadré) à 200 mbar et 78 °C, nous avons obtenu une réduction de volume d'un facteur 10. Dans un autre procédé, la congélation partielle, l'urine est congelée jusqu'à ce qu'une petite quantité reste encore liquide. A ce stade, la phase liquide renferme la majeure partie des nutriments tandis que la glace est essentiellement constituée d'eau.

► Stripping: l'ammoniac est entraîné hors de l'urine par le biais d'un courant de gaz ou d'air puis récupéré sous la forme d'une solution d'ammoniac ou de sulfate d'ammonium. Les deux produits peuvent être utilisés comme matière première chimique ou comme fertilisant azoté.

Récupération des nutriments par précipitation de struvite et par adsorption sélective.

La struvite (= phosphate ammoniac-magnésien, MgNH₄PO₄, PAM) est un engrais composé à action lente et d'efficacité prouvée. Nos essais de laboratoire ont montré que ce composé pouvait également être produit à partir d'urine. La struvite se forme spontanément dès que l'urine entre en contact avec du magnésium, par exemple ajouté sous la forme d'oxyde ou de chlorure de magnésium. Cette réaction est rapide et totale (Fig. 1). Plus l'urine est diluée par les eaux de rinçage, plus la quantité de struvite précipitée est faible. Une manière de pallier ce problème est de procéder à des ajouts fortement excédentaires de magnésium. La cristallisation volontaire de la struvite permet de récupérer entre 96 et 98 % du phosphore contenu dans les urines [5].

Nos essais ont d'autre part démontré que les hormones et médicaments étudiés demeuraient totalement en solution et n'étaient donc pas décelables dans le précipité. Une proportion maximale de 20–40% des métaux lourds éventuellement présents dans les urines est intégrée dans les précipités de struvite [6]. La précipitation volontaire de la struvite est donc une méthode simple et efficace permettant de récupérer les nutriments en évitant les contaminations par les polluants véhiculés par les eaux jaunes.

La récupération des nutriments peut également se faire par adsorption sélective. Le recours aux zéolithes prévu par cette méthode est particulièrement intéressant. En effet, lorsque ce composé minéral est ajouté aux urines, il se charge d'azote et peut ensuite être utilisé comme produit azoté d'amendement des sols.

Élimination des nutriments. Si l'objectif premier du traitement des urines est la protection des eaux, il se peut que l'on cherche à

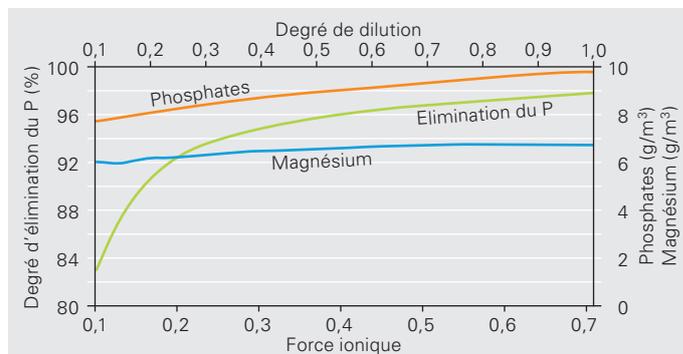


Fig. 1: Les concentrations de phosphates et de magnésium encore dissous dans l'urine après précipitation de la struvite dépendent de son degré de dilution avec les eaux de rinçage (1 = non diluée, 0,1 = diluée d'un facteur 10). Concentrations de départ des éléments nutritifs dans l'urine non diluée: Phosphates = 440 g P/m³; Ammonium = 7850 g N/m³. Ajout d'une quantité équimolaire de chlorure de magnésium (par rapport aux phosphates).

extraire l'azote et le phosphore de l'urine sans avoir l'intention de réutiliser les nutriments. En plus des techniques classiquement employées pour le traitement des eaux usées, le procédé Anamox précédemment cité peut également être utilisé.

Une technique des flexible procédés est disponible pour le traitement des urines.

Un nombre conséquent de techniques se prête donc au traitement des urines collectées séparément des matières fécales. La technique des procédés ne constituera donc certainement pas de facteur limitant pour la mise en pratique de la séparation des urines. Il n'en reste pas moins que la plupart des techniques disponibles en sont encore au stade des essais. L'expérience pratique est encore limitée et des lacunes importantes persistent, notamment au niveau du développement de petits appareils fiables pour les utilisations décentralisées.

Cependant, la diversité des techniques envisageables pour le traitement des urines montre aussi que les mesures à la source comme la séparation des urines offrent une plus grande marge de manœuvre pour la gestion des eaux usées. Les bases du développement futur sont en place. Il s'agit maintenant de progresser dans le domaine pratique. ○ ○ ○

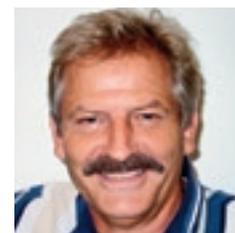
- [1] Maurer M., Pronk W., Larsen T.A. (2006): Treatment processes for source separated urine. *Water Research* 40, 3151–3166.
- [2] Kirchmann H., Pettersson S. (1995): Human urine – chemical composition and fertilizer use efficiency. *Fertilizer Research* 40, 149–154.
- [3] Udert K.M., Larsen T.A., Gujer W. (2006): Fate of Major Compounds in Source-Separated Urine. *Water Science and Technology* 54 (11–12), 413–420.
- [4] Ciba-Geigy (1977): *Wissenschaftliche Tabellen Geigy, Teilband Körperflüssigkeiten* 8. Ausgabe, Basel.
- [5] Ronteltap M., Maurer M., Gujer W. (2007) Struvite precipitation thermodynamics in source-separated urine. *Water Research* 41 (5), 977–984.
- [6] Ronteltap M., Maurer M., Gujer W. (in press): The fate of pharmaceuticals and heavy metals during struvite precipitation in urine. *Water Research*.

Un engrais tiré de la bibliothèque

La fabrication d'un fertilisant sans danger à partir des urines est une grande nouveauté. De premiers essais sont actuellement en cours de réalisation à partir de la bibliothèque cantonale de Bâle-Campagne à Liestal, entièrement équipée de WC NoMix. Les urines qui y sont collectées sont traitées pour être transformées en engrais liquide. Mais avant que ce produit fertilisant puisse être utilisé, un certain nombre d'obstacles doivent encore être surmontés. Les projets pilotes réalisés dans les autres pays se trouvent confrontés aux mêmes types de problèmes.

Un des objectifs de la séparation des urines est la restitution à l'agriculture des éléments nutritifs principaux, azote, phosphore et potassium qu'elles contiennent. Ces substances nutritives excrétées par l'être humain proviennent des denrées alimentaires. L'amenuisement progressif des ressources en nutriments – notamment en phosphore dont les réserves naturelles seront épuisées dans 50 à 100 ans au rythme actuel d'extraction – impose désormais une gestion durable des éléments fertilisants. Au lieu de continuer à disperser les nutriments pourtant si précieux dans les eaux, les airs et les boues par le biais des stations d'épuration pour les y «perdre» irrémédiablement, il s'agit maintenant de progresser vers un recyclage aussi complet que possible de ces éléments fertilisants à la manière des pratiques ancestrales de valorisation des excréments animales. Mais de nombreux obstacles se dressent sur la voie d'un tel progrès. En effet, il faut tout d'abord que cette idée de recyclage fasse son chemin et finisse par s'imposer aussi bien sur le plan politique et économique que technique et écologique avant de pouvoir être appliquée avec succès dans la pratique.

Un fertilisant à base d'urine doit être exempt de micropolluants. Nos études ont montré que la population était plutôt ouverte à la technologie NoMix. Dans sa majorité, elle affirme pouvoir s'accommoder de toilettes séparatrices [1] et les agriculteurs suisses ne sont pas opposés à l'utilisation d'un engrais à base d'urine [2] (cf. article de Judit Lienert, p. 8). La condition posée est cependant que le fertilisant proposé soit efficace, bon marché, sans risque sanitaire et exempt de micropolluants organiques tels que les résidus médicamenteux et les hormones. De fortes exigences ont également été exprimées par les autorités chargées de l'agriculture. Non content de prouver son efficacité de fertilisation, l'engrais à base d'urine doit subir une procédure d'autorisation prévoyant notamment des essais de laboratoire destinés à démontrer l'absence de contamination par les micropolluants. L'expérience acquise dans le cadre des débats sur la valorisation agricole des boues d'épuration nous a enseigné



Markus Boller, ingénieur, dirige le département de Gestion des eaux urbaines; professeur titulaire à l'EPF de Zurich dans le domaine de l'approvisionnement en eau et des technologies de l'eau

qu'une utilisation d'urine non traitée serait absolument impensable en Suisse. L'extraction des substances indésirables constitue donc une première étape indispensable, même si le traitement et la transformation des urines s'en trouvent techniquement très allourdis.

Traitement et transformation des urines: un terrain vierge sur le plan de la technique des procédés. Pour engager le processus d'autorisation et pour démontrer qu'il était techniquement possible de produire un engrais sans danger à partir des urines, l'Eawag a lancé un projet pilote de traitement des urines sur le site de la station de traitement des eaux polluées (STEP) Birs I à Birsfelden, dans le canton de Bâle-Campagne. A l'aide d'une technique de procédé développée à l'Eawag, un engrais liquide y est fabriqué en conditions réelles à partir d'urine. L'urine utilisée provient de la nouvelle bibliothèque cantonale de Liestal qui a pu être entièrement équipée de toilettes NoMix et d'urinoirs sans

Le nouveau produit à base d'urine «Urevit» est-il un bon engrais? L'intensité du vert des feuilles (ici de maïs d'ensilage) est l'un des critères d'évaluation employés.

Martin Koller, FIBL



Lieu	Nombre de toilettes NoMix	Nombre d'urinoirs sans eau	Quantité d'urine produite (l/semaine)	Capacité des réservoirs de collecte (m ³)	Traitement des urines	Devenir, utilisation, valorisation
GTZ Eschborn D	56	25	8000	10	Précipitation de struvite, stripping de NH ₃	Tests d'efficacité, essais de plein champ
Huber D	13	10	550	0,9	Précipitation de struvite, précipitation de sulfate d'ammonium	Fertilisation de cultures
Lambertsmühle D	4	2	60	4	Aucun	Agriculture
Linz A Logements Ecole	88 18	12	env. 2500 env. 1500	16 6	Aucun	Réseau d'assainissement
Gebers S	25	0	env. 700	3x3,5	Stockage de 6 mois	Agriculture
Understenshöjden S	50	0	env. 1000		Stockage de 6 mois	Agriculture
Bibliothèque cantonale Bâle-Campagne CH	10	2	100	1,7	Electrodialyse, ozonation	Tests d'efficacité
Eawag CH	39	7	250	1 chacun (hommes + femmes)	Traitement biologique	Recherche: développement de nouvelles techniques de traitement

Tab. 1: Projets de séparation des urines au niveau national et international.

eau grâce à l'ouverture d'esprit des politiciens bâlois et des autorités compétentes. Depuis son inauguration en juin 2005, l'urine de près de 4000 visiteurs par semaine y est collectée et mise à la disposition du pilote de la STEP de Birs I pour la fabrication de fertilisant.

Quatre objectifs doivent être poursuivis lors du traitement et de la transformation des urines en fertilisant:

- ▶ Concentration des éléments nutritifs azote, phosphore et potassium.
- ▶ Elimination des micropolluants organiques tels que les hormones et médicaments.
- ▶ Innocuité du produit sur le plan sanitaire.
- ▶ Entreposage de l'urine sous la forme stable de solution d'urée ou d'ammonium.

Parmi la multitude de méthodes, pour la plupart assez complexes, que l'on pourrait envisager [3] (voir aussi l'article de Max Maurer, p. 14) le choix a porté sur une électrodialyse suivie d'une ozonation pour le pilote de traitement de l'urine de la STEP de Birs I. Ces deux techniques n'ont jamais été employées dans le domaine de l'assainissement communal. Elles ont été développées dans les laboratoires de l'Eawag jusqu'à atteindre une bonne applicabilité pratique et sont actuellement testées à grande échelle dans le cadre du projet pilote. L'article de Wouter Pronk, p. 20, livre des informations plus détaillées sur la conception et le fonctionnement du pilote de traitement [4]. L'objectif principal de notre projet pilote est de réaliser à partir d'un cas d'étude des instruments techniques utilisables pour fermer les cycles des éléments nutritifs et de montrer aux experts, aux autorités et à la population tout le potentiel qui réside dans la récupération des nutriments à partir des urines. Les résultats obtenus jusqu'à présent sont encourageants et préparent le terrain pour le développement des techniques alternatives dans l'assainissement.

La séparation des urines à l'étranger. Les efforts de l'Eawag pour «restaurer» les cycles de nutriments au niveau des communautés urbaines ne constituent pas un cas isolé sur le plan international. En effet, des activités d'un ordre similaire sont également en cours depuis plusieurs années en Suède, en Allemagne, en Autriche et en Hollande (Tab. 1). Parmi elles, plusieurs projets décrits dans la littérature font appel à une technologie de type NoMix. A l'origine, les solutions séparatrices souvent conçues pour les zones rurales ne se souciaient pas de la qualité de l'urine collectée, ce qui en permettait une utilisation aussi simple que directe. Ces temps sont révolus: les micropolluants contenus dans

Tab. 2: Composition de l'urine brute et de l'«Urevit», engrais liquide élaboré dans la station pilote de traitement des urines (premiers résultats).

Paramètre	Urine brute	Urevit
pH	8,7	9,1
Conductivité (µS)	–	150
Carbone organique dissous COD (g/l)	1,2	3,0–3,5
Demande chimique en oxygène DCO (g O ₂ /l)	3,6	10
Azote total (g/l)	3,0	12
Ammonium (g/l)	2,9	11
Phosphore total (g/l)	0,18	0,65
Potassium (g/l)	1,4	5,7
Magnésium (g/l)	–	0,008
Calcium (g/l)	–	0,020
Sodium (g/l)	1,6	6,5
Chlorures (g/l)	3,0	15
Sulfates (g/l)	0,7	2,5

les urines sont aujourd'hui au cœur des débats. Ainsi, des essais de fertilisation de cultures réalisés récemment avec de l'urine non traitée concentrée appliquée à forte dose ont montré que les substances indésirables s'accumulaient dans le sol et dans les plantes dont elles limitaient même la croissance [5]. Le risque lié aux micropolluants ne doit donc pas être sous-estimé; il occupe actuellement une place centrale dans les efforts de développement de techniques adéquates de stockage et de traitement des urines. Par ailleurs, les recherches se concentrent de plus en plus sur les propriétés fertilisantes des différentes formes de produits obtenues.

Divers projets réalisés en Suède démontrent que les possibilités de réutilisation de l'urine collectée sont décisives pour la motivation de la population à installer et utiliser les toilettes séparatrices. Ainsi, les toilettes de ce type installées dès 1995 dans la ville de Björnsby ont dû être à nouveau remplacées par des toilettes classiques. Des défaillances techniques et l'absence de concept pour une valorisation agricole sans danger des produits de la collecte expliquent cet échec.

De l'urine au fertilisant. Le fertilisant «Urexit» produit par le pilote de traitement installé à la STEP de Birs I est une solution nutritive dont les propriétés diffèrent fortement du produit d'origine (Tab. 2). Il présente une concentration quatre fois plus élevée que l'urine en N, P, K et autres minéraux et se caractérise par une absence de micropolluants, de bactéries et de virus de même que par une teneur légèrement moindre en matière organique.

Comme dans la plupart des pays européens, la mise sur le marché d'un engrais à base d'urine est ici aussi soumise à autorisation. L'Ordonnance sur le livre des engrais de 2001 [6] distingue en effet différentes classes de fertilisants: les engrais minéraux simples et composés ou à base d'urée sont considérés comme sans danger et peuvent être mis en circulation sans procédure d'autorisation. Une annonce est par contre obligatoire pour les engrais organiques et les engrais de ferme tels que les purins et les coulages de silos, tandis qu'il est totalement interdit d'utiliser les engrais à base de farine de viande, d'os ou de sang. Pour tous les autres engrais ne figurant pas explicitement sur la liste des engrais, la demande d'homologation passe par une procédure d'autorisation. C'est par exemple le cas des urines humaines et des produits qui en sont dérivés. Dans le cadre de cette procédure, le demandeur doit apporter la preuve de l'innocuité du nouveau produit pour l'homme, la faune et l'environnement, et démontrer que la qualité des denrées alimentaires produites ne s'en trouve pas altérée.

L'Office fédéral de l'agriculture a entre-temps attribué une autorisation provisoire de mise en circulation de l'engrais «Urexit». En parallèle, des démarches ont été engagées pour l'obtention d'une autorisation globale et l'établissement d'un cadre juridique pour les produits fertilisants à base d'urine en général. Les conditions à remplir sont les suivantes:

- ▶ Comparaison du potentiel fertilisant avec celui d'engrais classiques dans le cadre d'essais en plein champ (portant également sur les possibilités d'utilisation en agriculture biologique).
- ▶ Déclaration et composition chimique du produit.

- ▶ Mode d'emploi du produit.
- ▶ Preuve de la qualité hygiénique irréprochable du produit.
- ▶ Preuve de l'absence de micropolluants (en dessous du seuil de détection).

L'Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL) basé à Frick a étudié le potentiel de fertilisation de l'Urexit sur le maïs d'ensilage. Les résultats montrent que l'Urexit constitue un engrais tout à fait valable. La croissance obtenue était en effet maximale, que les plantes aient été fertilisées avec de l'Urexit ou avec du nitrate d'ammonium. Dans les deux cas, elle était significativement plus élevée que celle obtenue avec du purin de bovins. Par contre, le rendement de récolte était de 13% plus élevé avec le nitrate d'ammonium. Cette différence est probablement due à une perte d'ammonium à l'air lors de l'application de l'Urexit. Une optimisation des méthodes d'application permettra certainement d'obtenir des rendements comparables à ceux livrés par le nitrate d'ammonium.

Profiter du temps imparti. L'étude pilote de traitement et de transformation de l'urine dans le canton de Bâle-Campagne est prévue pour une durée de six ans. Pendant cette période, l'Eawag souhaite développer d'autres techniques de traitement à l'échelle expérimentale. La récupération du phosphore par traitement biologique ou par le biais du phosphate ammoniac-magnésien (PAM) constituent à cet égard des perspectives prometteuses. Les urines utilisées pour ces expérimentations proviennent du nouveau bâtiment de l'Eawag, le Forum Chriesbach, entièrement équipé, comme la bibliothèque cantonale de Liestal, de toilettes NoMix.

Au niveau international comme national, on peut s'attendre dans les prochaines années à une forte intensification des recherches sur les alternatives de traitement et de gestion des eaux usées et sur les nouvelles techniques de traitement et de transformation des urines. Il s'agit là d'une tendance encourageante, car plus l'expérience s'enrichira dans ce domaine, plus il y aura de chances que les nouveaux concepts et les nouvelles technologies vont trouver une application à grande échelle. ○ ○ ○

- [1] Lienert J., Larsen T.A. (2006): Considering user attitude in early development of environmentally-friendly technology: A case study of NoMix toilets. *Environmental Science & Technology* 40, 4838–4844.
- [2] Lienert J., Haller M., Berner A., Stauffacher M., Larsen T.A. (2003): How farmers in Switzerland perceive fertilizers from recycled anthropogenic nutrients (urine). *Water Science and Technology* 48 (1), 47–56.
- [3] Maurer M., Pronk W., Larsen T.A. (2006): Treatment processes for source separated urine. *Water Research*. 40, 3151–3166.
- [4] Pronk W., Zuleeg S., Lienert J., Boller M. (submitted): Pilot experiments with electrodialysis and ozonation for the production of a fertilizer from urine. *Water Science and Technology*. Accepted for presentation at IWA Advanced Sanitation Conference, Aachen, 12.–13.3.2007.
- [5] Bonner Agrikulturchemische Reihe, Band 21, www.ipe.uni-bonn.de/BAR/BAR_21.pdf
- [6] Düngerbuch-Verordnung (28.02.2001). SR-Nummer 916.171.1. www.admin.ch/ch/d/sr/c916_171_1.html

Traitement de l'urine: de l'expérimentation à la pratique



Wouter Pronk, ingénieur des procédés dans le domaine des biotechnologies, dirige l'équipe de Technologie des membranes au sein du département de Gestion des eaux urbaines

Le couplage de l'électrodialyse et de l'ozonation est une solution technique envisageable pour concentrer les nutriments précieux contenus dans les urines. Il permet d'autre part d'éliminer les substances dangereuses qu'elles peuvent renfermer pour produire un fertilisant agricole de qualité irréprochable. Le procédé de traitement mis au point à l'Eawag est actuellement testé dans le canton de Bâle-Campagne.

Etant donné sa forte teneur en éléments nutritifs, l'urine semble toute désignée pour la fabrication d'un fertilisant agricole. Une telle valorisation suppose cependant une élimination préalable des résidus pharmaceutiques et des hormones également excrétées par le biais des urines. Il est en outre souhaitable de concentrer les sels le plus fortement possible pour réduire au maximum les volumes de transport et de stockage des urines et du fertilisant qui en sera issu.

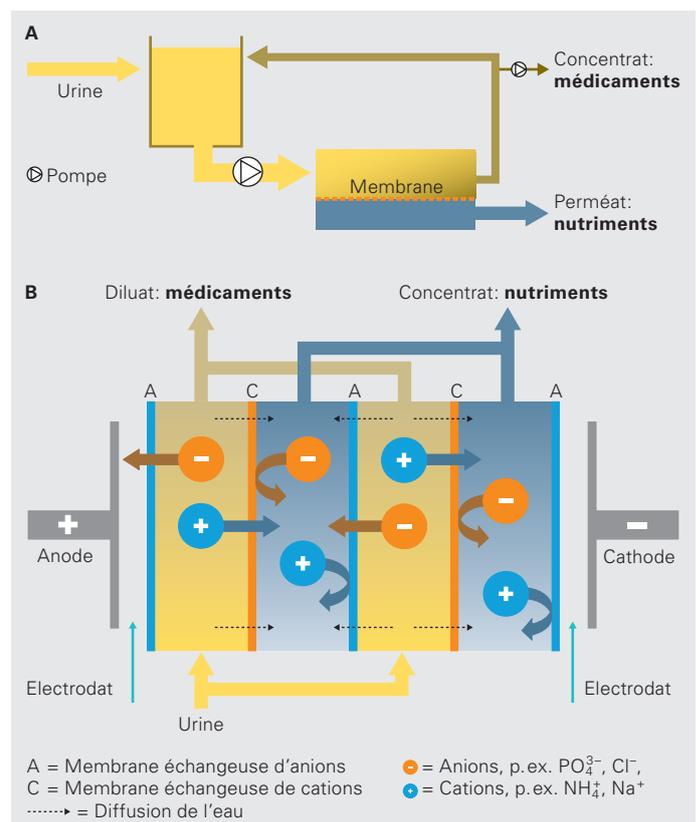
Partant de ces objectifs, l'Eawag a testé plusieurs procédés en laboratoire, notamment la complexation, la précipitation, l'ozonation et différentes techniques membranaires telles que la nanofiltration et l'électrodialyse. Pour la réalisation d'un projet pilote de fabrication d'un fertilisant à base d'urine, un procédé combinant ozonation et électrodialyse a finalement été retenu.

La nanofiltration permet de retenir les substances au niveau moléculaire. Dans le procédé de nanofiltration, les liquides à filtrer passent à travers une membrane à pores très fins de la taille de quelques nanomètres sous l'effet d'une pression très élevée, de l'ordre de 10 à 30 bars (Fig. 1A). En principe, les substances dissoutes dans le liquide sont alors séparées en fonction de leur taille moléculaire, mais leur charge électrique joue également un rôle important. Nous avons cherché à savoir si la nanofiltration pouvait également être utilisée pour le traitement de l'urine et si elle permettait de séparer l'azote et le phosphore des substances indésirables également contenues.

Nous avons testé en laboratoire trois membranes différentes susceptibles de retenir les composés de masse moléculaire supérieure à 150–400 daltons (Da) [1]. Nous avons pour cela ajouté à l'urine un mélange représentatif de substances pharmaceutiques, notamment du propranolol, un bêtabloquant, du diclofénac et de l'ibuprofène, deux anti-inflammatoires et de l'éthinylestradiol, principe actif de la pilule contraceptive. La masse moléculaire de ces composés se situe entre 180 et 300 Da. Celle des nutriments est beaucoup plus faible: dans l'urine fraîche, l'azote est majoritairement présent sous forme d'urée (60 Da) et en faible partie (16 %

env.) sous forme d'ammonium (NH_4^+ , 18 Da); le phosphore est exclusivement présent sous la forme de phosphates (PO_4^{3-} , 95 Da). Dans l'urine stockée, la forme majoritaire de l'azote est l'ammonium, résultat avec le CO_2 de l'hydrolyse bactérienne de l'urée. Ce

Fig. 1: Schémas de principe de la nanofiltration (A) et de l'électrodialyse à deux couples de membranes (B). Dans la pratique, l'électrodialyse met en œuvre des empilements comprenant jusqu'à une centaine de couples de membranes.





Wouter Pronk, Eawag

Station pilote de transformation de l'urine en fertilisant liquide. L'urine utilisée provient de la bibliothèque cantonale du canton de Bâle-Campagne à Liestal, entièrement équipée de WC NoMix.

processus induit par le stockage fait également passer le pH de l'urine de 6 à 9. Nous avons effectué nos essais de nanofiltration avec de l'urine fraîche non hydrolysée.

La nanofiltration permet uniquement la récupération de l'urée à partir des urines. Dans une étude comparative mettant en jeu différents types de membranes, la NF270 (fabriquée par Dow Inc.) a livré les meilleurs résultats. Mais même la plus efficace des membranes testées n'a pas permis la rétention de tous les micropolluants (Fig. 2A). De plus, la membrane s'est avérée quasiment imperméable aux phosphates tandis qu'elle ne laissait passer que la moitié de l'ammonium (Fig. 2B). Les seuls résultats réellement satisfaisants ont été obtenus avec l'urée. Les forces de répulsion qui peuvent exister entre membrane et substances dissoutes chargées expliquent par exemple la rétention des phosphates. Par contre, la molécule d'urée non chargée a pu traverser la membrane sans encombre. De par la complexité des phénomènes qui interviennent, la nanofiltration est donc mal adaptée à la récupération des nutriments contenus dans les urines.

Lors de l'électrodialyse, les substances se déplacent dans un champ électrique. L'électrodialyse correspond mieux à nos be-

soins (Fig. 1B). Des membranes chargées positivement et négativement sont placées en alternance entre deux électrodes. Ces membranes sont en principe perméables aux molécules ionisées de taille inférieure à 200 Da, les molécules à charge négative ou anions se déplaçant en direction de l'anode et les molécules à charge positive ou cations vers la cathode. Les cations ne peuvent cependant traverser que les membranes chargées positivement; ils s'accumulent donc dans le compartiment adjacent. Le même phénomène se produit en sens inverse avec les anions. De cette manière, les substances chargées sont éliminées des compartiments dits de dilution pour s'accumuler dans les compartiments dits de concentration. Les compartiments de dilution sont alimentés par les urines à traiter. L'eau diffuse au travers des membranes de l'urine vers les compartiments de concentration et définit ainsi l'importance du flux de concentrat.

L'électrodialyse permet une séparation quasi-totale des nutriments et des micropolluants. L'objectif de l'électrodialyse est de provoquer une migration des nutriments de faible masse moléculaire dans le concentrat tandis que les médicaments et hormones de masse moléculaire plus élevée demeurent dans les compartiments de dilution. On observe en effet qu'une partie

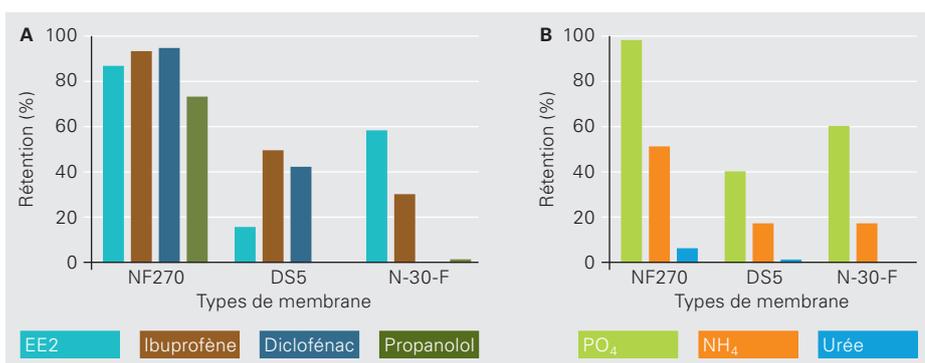


Fig. 2: Rétention de composés pharmaceutiques (A) et de substances nutritives (B) par nanofiltration effectuée avec différents types de membranes (EE2 = éthynylestradiol).

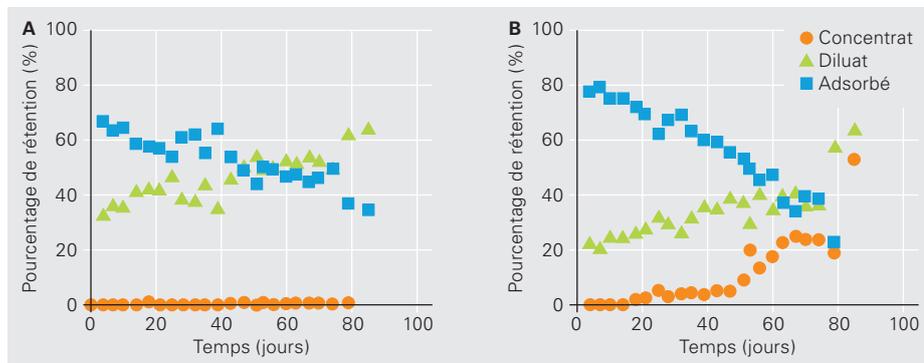


Fig. 3: Bilans de masse de l'éthinylestradiol (A) et du propranolol (B) au cours de l'électrodialyse.

des polluants comme par exemple l'éthinylestradiol (Fig. 3A) et le diclofénac est retenue durablement. Pour le propranolol, la membrane n'est par contre efficace qu'au début de l'électrodialyse, ce produit finissant par la traverser avec le temps (Fig. 3B). Conformément à nos attentes, l'ammonium et le phosphate migrent en totalité dans le concentrat [2] où ils s'accumulent dans une proportion de 3 à 4 fois leur teneur d'origine. L'urée ne peut être récupérée totalement à l'aide de cette méthode: n'étant pas ionisée, elle ne diffuse que très partiellement au travers des membranes. Cependant, l'urine utilisée pour l'électrodialyse a en général déjà subi un stockage prolongé et ne contient donc plus d'urée.

L'ozonation permet d'éliminer les polluants restants. Etant donné que l'électrodialyse ne permet pas de séparer totalement les polluants des nutriments que l'on souhaite récupérer, un traitement supplémentaire s'avérait nécessaire et devait donc être testé. L'expérience de l'Eawag en matière de traitement des effluents de station d'épuration avait déjà montré que les médicaments pouvaient être en grande partie détruits par ozonation. Les essais que nous avons ensuite menés montrent que le même résultat peut être obtenu avec l'urine ou les produits de l'électrodialyse. La quantité d'ozone nécessaire est cependant plus élevée que pour les autres utilisations et s'élève à 1–2 g d'ozone par litre d'urine [3].

Un projet pilote dans le canton de Bâle-Campagne. Dans le cadre d'un projet parrainé par l'Amt für Industrielle Betriebe (AIB) du canton de Bâle-Campagne, la nouvelle bibliothèque cantonale érigée à Liestal a été équipée de toilettes séparatrices et d'un système de collecte des urines. De concert avec l'AIB, l'Eawag a alors décidé de lancer un projet pilote de traitement des urines ainsi collectées combinant les techniques d'électrodialyse et d'ozonation. Nous avons tout d'abord testé deux séquences de procédés différentes: l'ozonation de l'urine brute avant électrodialyse d'une part, l'ozonation des concentrats et diluats livrés par l'électrodialyse d'autre part. Les résultats montrent que le traitement consécutif à l'électrodialyse entraîne une consommation nettement moindre d'ozone et d'énergie qu'une ozonation préalable. Etant donné que des substances tensioactives se développent dans l'urine brute au cours de son stockage et peuvent poser des problèmes de mousse lors de l'ozonation, l'urine brute

doit être pré-filtrée par microfiltration avant d'être traitée. La station pilote comprend donc une microfiltration, une électrodialyse et une ozonation consécutive du concentrat et du diluat. Cette séquence de traitement a fait ses preuves puisqu'elle est utilisée depuis plus d'un an sans problème particulier.

Le fertilisant liquide obtenu par cette chaîne de procédés a été baptisé «Urevit». Des informations concernant la composition de l'Urevit, son action fertilisante et sa procédure d'autorisation sont exposées en détail dans l'article de Markus Boller, p. 17.

Une étape décisive pour la technologie NoMix. Le développement d'un procédé pratique pour la fabrication d'un fertilisant à partir de l'urine collectée est une étape décisive dans la mise en œuvre du concept NoMix. Il est en effet prouvé que l'intérêt et la motivation de la population pour l'installation et l'utilisation de toilettes séparatrices augmentent fortement si des possibilités réalistes de réutilisation de l'urine existent. Pour l'heure, le fertilisant liquide fabriqué selon notre procédé n'a pas encore obtenu d'autorisation administrative. Mais nous sommes certains qu'elle sera attribuée prochainement. ○ ○ ○

Le projet pilote de la bibliothèque cantonale de Liestal et sa station pilote de traitement de l'urine bénéficient du soutien du projet de développement durable Novatlantis du domaine des EPF.

- [1] Pronk W., Palmquist H., Biebow M., Boller M. (2006): Nanofiltration for the separation of pharmaceuticals from nutrients in source-separated urine. *Water Research* 40, 1405–1412.
- [2] Pronk W., Biebow M., Boller M. (2006): Electrodialysis for recovering salts from a urine solution containing micropollutants. *Environmental Science & Technology*, 40, 2414–2420.
- [3] Pronk W., Dodd M.C., Zuleeg S., Escher B.I., von Gunten U. (in preparation): Ozonation of micropollutants in source-separated urine: Feasibility and process modeling.

NoMix: la solution au problème des médicaments dans l'environnement?



Beate Escher, chimiste, dirige le groupe Evaluation des substances chimiques à partir de leur mécanisme d'action
Coauteur: J. Lienert

La technologie NoMix prévoit notamment la préparation de fertilisants à partir des urines collectées. Cependant, celles-ci renferment aussi des résidus médicamenteux et hormonaux qui doivent être totalement éliminés avant toute utilisation agricole. Afin de vérifier l'efficacité de cette élimination lors du traitement des urines, nous avons mis au point un test combinant analyses chimiques et écotoxicologiques.

Nous rejetons avec nos urines une grande proportion des médicaments que nous absorbons, comme par exemple les préparations à bases d'hormones telles que la pilule contraceptive. A ces résidus viennent encore s'ajouter des hormones produites naturellement par notre propre organisme. Véhiculées par les eaux usées, ces substances atteignent les stations d'épuration dans lesquelles elles ne sont bien souvent que partiellement éliminées. On les retrouve alors dans le milieu aquatique où elles sont détectables à des concentrations généralement faibles – de l'ordre du nanogramme au microgramme par litre. Ces résidus forment avec d'autres substances organiques ce que l'on appelle les

micropolluants. Pris isolément, ils présentent rarement un danger pour l'environnement aquatique. Mais dès qu'ils apparaissent en mélange, ils peuvent avoir des impacts significatifs. A cet égard, l'idée de collecter les urines à la source afin de les traiter indépendamment des eaux usées semble particulièrement prometteuse. Mais, là encore, il convient de s'assurer que les micropolluants ne soient pas rejetés dans le milieu naturel. De telles précautions s'imposent tout particulièrement si les urines doivent être utilisées pour la production d'engrais. Pour les besoins de ce contrôle, nous avons développé dans le cadre du projet Novaquatis un test permettant à la fois la mise en évidence par voie chimique des différentes substances et l'étude des effets écotoxicologiques des mélanges présents. Cette démarche permet alors de suivre les micropolluants tout au long du traitement des urines.

Quelle est la toxicité des substances médicamenteuses? Un bioessai sur cellules algales permet de le savoir.



Yvonne Lehnhard, Eawag

Analyses écotoxicologiques: des bioessais sur algues et levures comme indicateurs d'activité hormonale et de cytotoxicité. L'analyse écotoxicologique des urines est particulièrement difficile étant donné que celles-ci représentent des mélanges complexes de substances très diverses. Pour nous assurer du fait que les effets observés ne soient pas dus au pH, aux sels minéraux ou à d'autres caractéristiques naturelles des urines, nous avons tout d'abord cherché à isoler les micropolluants qu'elles renferment. Pour ce faire, nous avons adapté à nos besoins la méthode déjà existante de l'extraction en phase solide [1]. Les extraits d'urine ainsi obtenus ont ensuite été soumis à une série de tests écotoxicologiques destinés à détecter *in vitro* différents types de mécanismes d'action. Ainsi, ce procédé permet par exemple de savoir si un échantillon d'urine donné est susceptible d'endommager les membranes cellulaires, de perturber la protéosynthèse ou de porter atteinte au matériel génétique. A l'origine, ces tests ont été développés pour évaluer le risque toxicologique potentiel des médicaments pour les organismes aquatiques [2].

Etant donné que, dans le projet Novaquatis, nous souhaitons analyser rapidement et à moindre coût le plus grand nombre possible d'échantillons, nous avons concentré nos efforts sur deux

types de bioessais particulièrement parlants [1, 3]. Le bioessai sur levures indique si les urines contiennent des micropolluants à activité hormonale, comme par exemple les hormones sexuelles estradiol et éthynylestradiol (principe actif de la pilule contraceptive) [4]. Le bioessai sur algues permet quant à lui de détecter la présence de substances présentant une toxicité générale pour les cellules, cette toxicité étant mesurée par le degré de perturbation de la photosynthèse algale.

Ces deux types de bioessais n'assurent pas la détection des substances elles-mêmes mais celle des effets toxiques du mélange chimique contenu dans les urines. L'intensité des deux types d'effets étudiés a tout d'abord été mesurée dans les urines non traitées et fixée arbitrairement à une valeur de 100%, ce qui permet de suivre la décroissance de l'activité endocrinienne et de la cytotoxicité tout au long du traitement des urines.

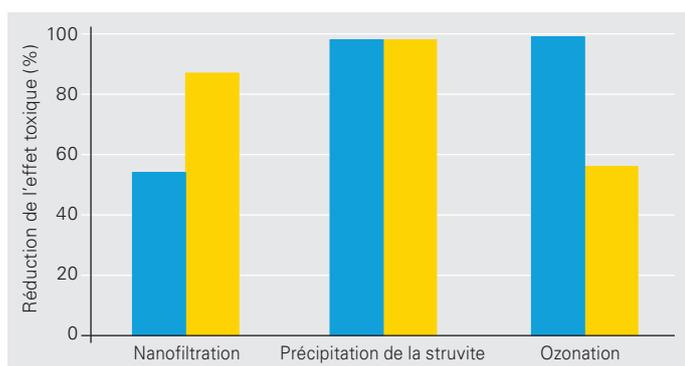
La précipitation de la struvite permet une meilleure élimination des micropolluants que la nanofiltration ou l'ozonation.

Dans le cadre du projet Novaquatis, différentes méthodes de traitement des urines ont été développées (cf. article de Max Maurer, p. 14). Dans la présente étude, nous nous sommes concentrés sur trois d'entre elles: la nanofiltration et la précipitation de la struvite utilisées pour la production d'engrais de même que l'ozonation employée pour une élimination ciblée des micropolluants [Résultats de la totalité de l'étude dans 3].

Dans le procédé de production d'engrais par nanofiltration (cf. article de Wouter Pronk, p. 20), les nutriments se retrouvent dans le liquide qui traverse le filtre, c'est-à-dire dans le perméat, et la solution restante est évacuée. Cette solution résiduelle renferme la majeure partie des résidus médicamenteux et des hormones puisque 54% de l'activité hormonale et 87% de la cytotoxicité ont disparu du perméat (Fig. 1). La précipitation de la struvite se révèle encore plus efficace. Elle permet en effet d'éliminer 98% des micropolluants cytotoxiques ou à effets endocriniens, produisant alors un engrais particulièrement propre (Fig. 1).

La technique d'ozonation met en œuvre de très fortes doses d'ozone pour produire une élimination des micropolluants. Ces

Fig. 1: Décroissance de l'activité endocrinienne (en bleu) et de la cytotoxicité (en jaune) des urines au cours de trois types de traitements. La réduction est exprimée en pourcentage par rapport au niveau dans les urines avant traitement.



forts dosages sont imposés par la composition des urines qui, en plus des résidus médicamenteux et hormonaux, contiennent des substances organiques en grande quantité. A la concentration d'ozone que nous avons utilisée (1,1 g/l d'urine), les composés organiques subissent une oxydation telle que la totalité de l'activité hormonale disparaît. Cette dose ne suffit cependant pas pour éliminer totalement les substances cytotoxiques. La cytotoxicité de l'urine n'est ainsi réduite que d'un peu plus de 50% (Fig. 1). Des fragments de molécules assez grands doivent donc avoir persisté dans l'urine ainsi traitée.

Analyses chimiques: dosage spécifique des substances critiques.

Nous avons d'autre part adopté une démarche analytique pour juger de la persistance après traitement de certaines substances pharmaceutiques dans les urines. Nous avons concentré nos analyses sur des principes actifs fréquemment utilisés et en partie excrétés par voie urinaire, notamment le propranolol, l'ibuprofène, le diclofénac, la carbamapézine et l'éthinylestradiol. Pour faciliter le dosage, nous avons enrichi les urines avec ces substances avant leur traitement. Dans l'ensemble, les résultats des tests écotoxicologiques se voient confirmés par les analyses chimiques [3].

Les analyses chimiques et écotoxicologiques se complètent.

Selon les données du problème, on peut choisir de recourir à l'analyse chimique ou à l'analyse écotoxicologique ou bien à une combinaison des deux. Ainsi, une analyse chimique est toute indiquée si l'on souhaite caractériser le comportement de certaines substances connues. Si, par contre, on s'intéresse au devenir d'un mélange de micropolluants indéterminés au cours d'un traitement donné, on optera pour un ou plusieurs tests écotoxicologiques. Etant donné que ces derniers permettent de mesurer la somme des effets de toutes les substances contenues dans le mélange, ils englobent aussi les composés et métabolites non identifiés de même que les résidus pharmaceutiques présents en quantités faibles dans les urines. Certains composants naturels des urines peuvent aussi contribuer à leur toxicité globale.

Moins de polluants dans les eaux grâce à la séparation des urines?

Nos résultats montrent qu'un traitement adéquat des urines permet tout à fait de produire un fertilisant dépourvu de polluants indésirables. Mais nos questions vont encore plus loin: est-il possible de réduire la teneur des eaux usées en micropolluants par une séparation efficace et systématique des urines? La collecte séparée permettrait-elle alors de soulager les stations d'épuration et d'éviter certains problèmes environnementaux?

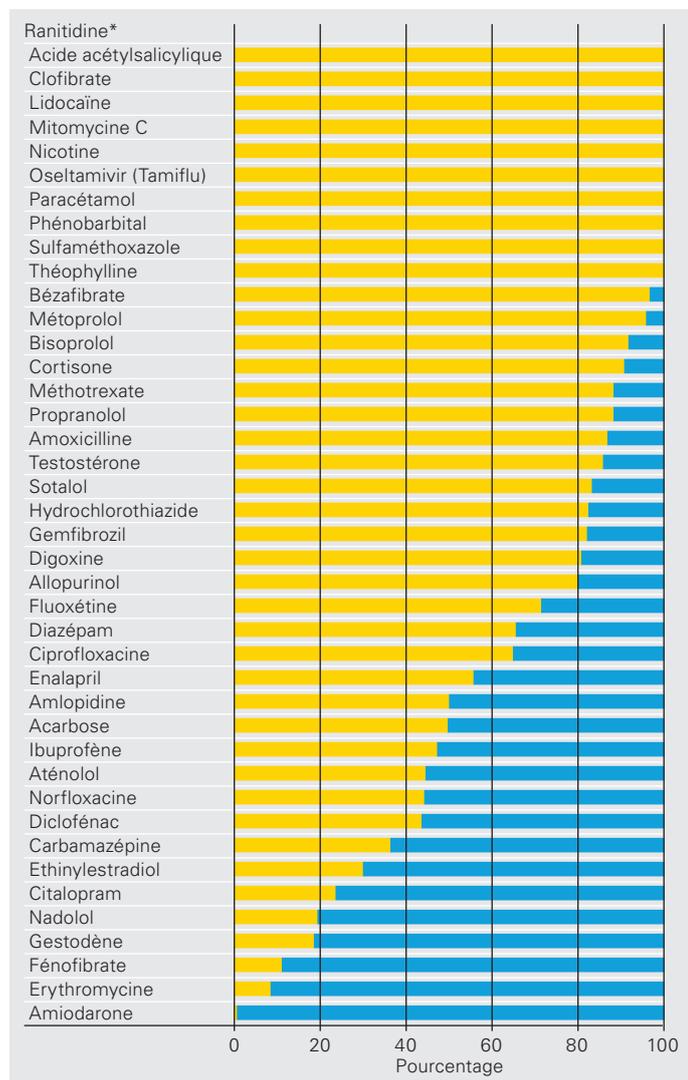
Pour pouvoir en juger, il faut tout d'abord savoir comment les médicaments et les hormones se comportent dans l'organisme humain. En général, une certaine proportion de substance active est résorbée par l'organisme avant d'être transformée (métabolisée) puis rejetée par voie urinaire, le métabolite étant plus hydrosoluble que le composé d'origine. La partie non résorbée ou moins fortement métabolisée est rejetée par voie fécale. Nous avons alors estimé pour 212 composés pharmaceutiques quelle était la part respective de l'excrétion urinaire et de l'excrétion

fécale [5]. Bien que les variations puissent être très importantes d'un médicament à l'autre, il s'avère qu'en moyenne 64% d'un composé absorbé (écart-type $\pm 27\%$) est rejeté avec les urines.

Il faut d'autre part tenir compte de la toxicité des divers métabolites pour les organismes aquatiques. Pour ce faire, nous avons évalué par modélisation la toxicité des fractions urinaires et fécales de 42 composés pharmaceutiques couramment utilisés en Suisse [6, 7]. Le modèle employé part du principe que l'activité

Fig. 2: Toxicité relative moyenne dans les fractions de 42 composés pharmaceutiques contenues dans les urines (en jaune) et dans les fèces (en bleu) après métabolisation dans l'organisme humain [7]. Les valeurs ont été reportées sur une échelle de 100%, ce qui interdit toute comparaison absolue entre composés. Ainsi, si la totalité de la toxicité de l'acide acétylsalicylique se trouve dans les urines, seuls 44% de la toxicité du diclofénac sont attribuables à cette fraction. Il est tout de même possible que les résidus de diclofénac véhiculés par les urines représentent un risque plus important pour la faune aquatique que ceux d'acide acétylsalicylique. Seules des modélisations plus poussées peuvent permettre de trancher sur cette question.

* Pas de données bibliographiques valables sur la ranitidine pour cette modélisation particulière.



biologique d'une substance dépend de sa structure chimique. En règle générale, on considère qu'une substance est d'autant plus toxique pour les organismes aquatiques que sa solubilité dans l'eau est faible. Cela signifierait que la toxicité de la fraction fécale est généralement plus élevée que celle de la fraction urinaire. Or, ce n'est pas si simple. En effet, les propriétés chimiques des métabolites ne sont pas seules en cause, la quantité de substance joue aussi un rôle décisif et nous avons vu que les urines en renfermaient la majeure partie. Notre analyse révèle ainsi de fortes variations (Fig. 2). Elle indique tout de même que la toxicité de 24% des composés étudiés est entièrement véhiculée par les urines et que pour 67% d'entre eux plus de 50% de la toxicité se retrouve dans la fraction urinaire [7]. La séparation des urines permettrait donc effectivement d'éviter une grande partie des résidus médicamenteux et hormonaux contenus dans les eaux usées, ce qui soulagerait à la fois les stations d'épuration et le milieu aquatique. ○ ○ ○

- [1] Escher B.I., Bramaz N., Maurer M., Richter M., Sutter D., von Känel C., Zschokke M. (2005): Screening test battery for pharmaceuticals in urine and wastewater. *Environmental Toxicology & Chemistry* 24, 750–758.
- [2] Escher B.I., Bramaz N., Eggen R.I.L., Richter M. (2005): *In-vitro* assessment of modes of toxic action of pharmaceuticals in aquatic life. *Environmental Science & Technology* 39, 3090–3100.
- [3] Escher B.I., Pronk W., Suter M.J.F., Maurer M. (2006): Monitoring the removal efficiency of pharmaceuticals and hormones in different treatment processes of source-separated urine with bioassays. *Environmental Science & Technology* 40, 5095–5101.
- [4] Rutishauser B.V., Pesonen M., Escher B.I., Ackermann G.E., Aerni H.-R., Suter M.J.F., Eggen R.I.L. (2004): Comparative analysis of estrogenic activity in sewage treatment plant effluents involving three *in vitro* assays and chemical analysis of steroids. *Environmental Toxicology & Chemistry* 23, 857–864.
- [5] Lienert J., Bürki T., Escher B.I. (submitted): Reducing micro-pollutants with source control: Substance flow analysis of 212 pharmaceuticals in feces and urine. *Water Science and Technology*. Accepted for presentation at IWA Advanced Sanitation Conference, Aachen, 12.–13.3.2007.
- [6] Escher B.I., Bramaz N., Richter M., Lienert J. (2006): Comparative ecotoxicological hazard assessment of beta-blockers and their human metabolites using a mode-of-action based test battery and a QSAR approach. *Environmental Science & Technology* 40, 7402–7408.
- [7] Lienert J., Güdel K., Escher B.I. (submitted): Screening method for ecotoxicological hazard assessment of 42 pharmaceuticals considering human metabolism and excretory routes. *Environmental Science & Technology*.

Ce que la Chine savait depuis longtemps



Tove A. Larsen, ingénieur chimiste, co-directrice du projet Novaquatis
Coauteurs: H.-P. Bader, H.-J. Mosler, W. Gujer, E. Medilanski, R. Scheidegger, D.-B. Huang, R. Schertenleib

Kunming, la ville chinoise jumelée avec Zurich, souhaite maîtriser son problème d'assainissement. Partant du principe du recyclage des substances nutritives, qui est depuis fort longtemps pratiqué en Chine, l'Eawag intervient sur place pour aider les autorités et institutions locales à trouver des solutions adaptées aussi bien sur le plan technique que social.

Les quelques millions d'habitants de Kunming tirent la majeure partie de leur eau potable du lac Dianchi. Or, ce lac peu profond se dégrade suite à des apports excessifs de phosphore provenant des eaux usées urbaines et agricoles qui s'y déversent. La ville a déjà commencé à réduire ses prélèvements d'eau lacustre et sera certainement amenée à les enrayer totalement d'ici peu. Face à cette situation des plus précaires les autorités ont exigé une restauration de la qualité des eaux à son niveau de 1960. Reste à savoir comment. Le système est en effet particulièrement complexe et les solutions envisagées doivent être satisfaisantes aussi bien au niveau technique que sur le plan social.

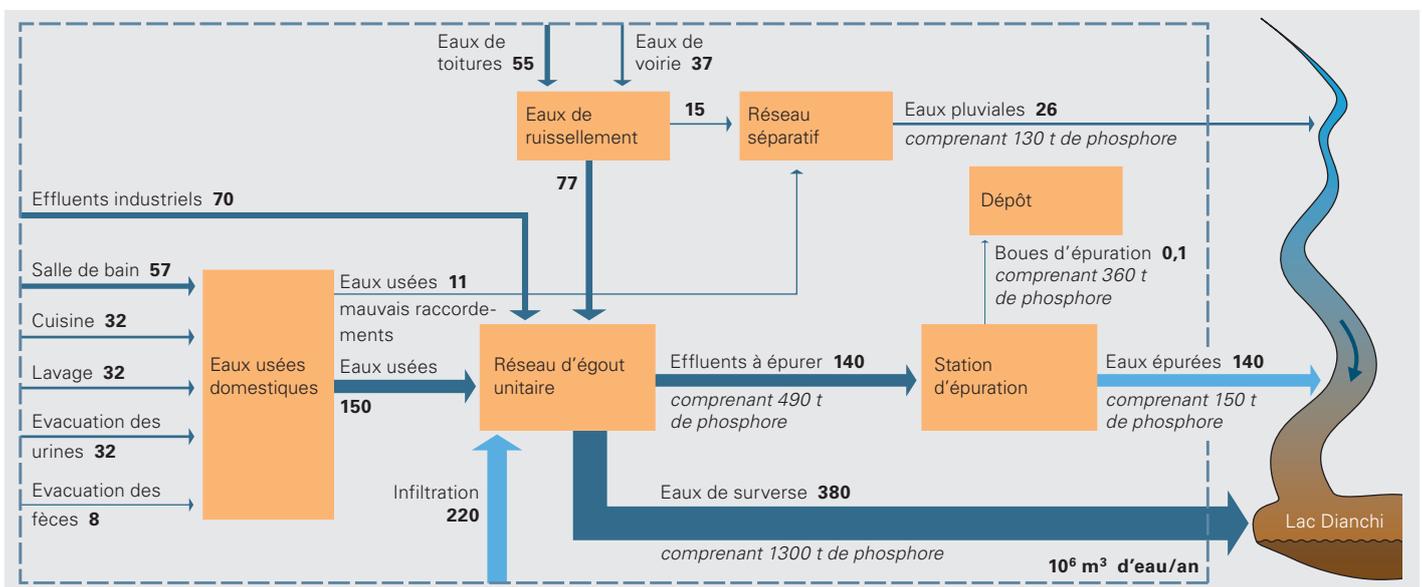
La solution: des mesures à la source? Les mesures à la source sont des alternatives importantes aux méthodes traditionnelles d'assainissement. Le recyclage des nutriments est en effet pratiqué depuis très longtemps en Chine. Dans les campagnes, l'urine est très largement utilisée comme engrais. La collecte séparative

des urines serait-elle alors une solution envisageable pour améliorer la qualité des eaux du Dianchi? Pour répondre à cette question, l'Eawag s'est engagée sur place dans le cadre d'un projet à trois volets financé par le programme suisse «NCCR Nord-Sud» [1]. Les objectifs en étaient:

- ▶ d'analyser les flux d'eaux usées de Kunming et de procéder à une simulation des solutions possibles,
- ▶ d'interroger les principaux acteurs et intervenants sur l'acceptabilité sociale des mesures à la source, sur l'introduction de la collecte séparative des urines et sur les mécanismes possibles de prise de décision,
- ▶ de lancer en zone rurale un projet pilote d'utilisation de toilettes sèches assurant la séparation des urines.

Le bilan des eaux usées de Kunming. En utilisant un simple modèle des flux de matière spécialement développé par nos soins pour l'analyse du système d'assainissement de Kunming,

Fig. 1: Flux d'eaux usées dans la ville de Kunming en 2000 exprimés en 10^6 de m^3 par an. Les quelques données locales disponibles ont été complétées de données bibliographiques et de données de références de la ville de Zurich.



nous avons cherché à déterminer l'origine des nutriments arrivant dans le lac [2]. Le modèle représente les flux d'eau, d'azote et de phosphore, de même que les principales sources d'eaux usées:

- ▶ les ménages (subdivisés en différentes sources d'émissions: hygiène corporelle, cuisine, lavage, chasses d'eau chargées d'urines et de matières fécales),
- ▶ l'industrie,
- ▶ les eaux de toitures et de voirie,
- ▶ les eaux étrangères en particulier les infiltrations d'eau souterraine et fluviale.

La figure 1 présente les flux d'eau et les charges en phosphore qu'ils véhiculent. Les résultats de la modélisation montrent que la capacité du réseau d'assainissement et des stations d'épuration est insuffisante, de même que le niveau technique des installations de traitement. En effet seuls 25% des eaux usées collectées par les égouts finissent par être traités dans l'une des six stations d'épuration de la ville, le reste étant directement déversé dans le lac par le biais de déversoirs. Ce problème est encore amplifié par les infiltrations d'eaux étrangères venant diluer les eaux usées dans une proportion d'au moins 1:1. Tous ces éléments font que chaque année près de 1600 t de phosphore sur les 1960 t que produit la ville sont déversées dans le Dianchi. D'après une estimation [3], les apports totaux de phosphore dans le lac ne doivent cependant pas dépasser 60 t par an si l'on souhaite revenir aux teneurs de 1960. Partant des conditions actuelles dans lesquelles la charge en phosphore provient à parts égales des eaux urbaines et des eaux agricoles [4], l'objectif à atteindre est de 30 t par an en provenance de la ville. Même en considérant la grande incertitude qui accompagne ces estimations, les proportions restent les mêmes et le problème reste de taille.

Des mesures concrètes pour une amélioration réelle de la situation. Pour pouvoir être en mesure de proposer des solutions d'amélioration adéquates, nous avons procédé à des simulations à l'aide d'un modèle décrivant les flux de substances [2]. Nous avons principalement testé les deux options suivantes:

- ▶ L'option BAT («best available technology»), c'est-à-dire l'actualisation technologique du système d'assainissement de Kunming pour atteindre par exemple le niveau de qualité de la ville de Zurich, implique: une réduction des infiltrations, une élimination des mauvais raccordements, une augmentation de la capacité des égouts et la mise en œuvre des meilleures techniques d'épuration actuellement disponibles dans les stations de traitement des eaux polluées. Etant donné la rénovation du réseau d'égouts qu'elle implique, cette solution est particulièrement coûteuse et difficile à mettre en œuvre.
- ▶ L'option BAT plus la collecte séparative des urines, en considérant que deux tiers des ménages soient équipés de toilettes assurant cette séparation.

Les deux solutions produisent une réduction importante de la charge en phosphore. Toutefois, l'option BAT seule livre encore au Dianchi 56 t de rejets annuels de phosphore en provenance de la ville. Cette technologie «end-of-pipe» ne permet donc pas à elle seule d'atteindre l'objectif de qualité visé. Une solution serait alors de dériver une partie des eaux traitées rejetées par les stations



Fig. 2: Deux types de toilettes assurant la séparation des urines: La toilette sèche (photo de gauche) et la toilette NoMix à chasse d'eau (photo de droite).

d'épuration pour que ces effluents ne soient plus déversés dans le lac. Cette mesure aurait cependant l'inconvénient de priver le Dianchi d'une partie de son approvisionnement en eau, ce qui aurait à son tour des effets indésirables sur le plan écologique. Le problème ne semble donc pas pouvoir être résolu par une solution simple et unique mais bien plutôt par le biais de mesures combinées. Notre simulation montre qu'une combinaison de BAT et de collecte séparative des urines permettrait de réduire à 39 t la quantité de phosphore déversée annuellement dans le lac. Etant donné cependant que l'option BAT nous semble peu réaliste, d'autres mesures à la source devront être mises en œuvre pour compléter la collecte séparative des urines qui ne suffit pas à elle seule pour résoudre le problème. Mais quelle que soit la solution envisagée, il est impératif avant toute réalisation de s'assurer de sa faisabilité avec la participation de toutes les parties prenantes.

Quelle est l'opinion des intéressés sur la collecte séparative des urines?

Avant de lancer une nouvelle technologie à grande échelle, il est impératif de bien connaître les acteurs impliqués ou concernés ainsi que leurs intérêts, leurs possibilités et volonté d'action et de bien se familiariser avec les processus décisionnels entrant en jeu. Dans cette optique, nous avons effectué une analyse des acteurs [5, 6]. L'étude a permis d'identifier 35 acteurs issus du monde politique, administratif, scientifique ou économique et de déterminer leur degré d'intérêt pour la séparation des urines et d'influence sur la popularisation du nouveau type de toilettes. Certains acteurs-clés ont une influence particulièrement importante sur les processus en jeu. Il s'agit dans notre cas du Congrès, du Gouvernement, du Parti communiste, du Bureau de protection du Lac Dianchi, de l'Agence d'Etat pour la protection de l'environnement et du bureau environnemental de Kunming, de même que de sociétés immobilières et du service d'urbanisme de la ville.

La majeure partie des acteurs considère que des mesures à la source sont nécessaires, en particulier dans le domaine des effluents industriels et des résidus de toilettes, et les estime réalisables dans les 20 prochaines années. Dans l'ensemble, ils jugent la collecte séparative des urines bien réalisable sur le plan technique et bénéfique sur le plan environnemental. D'autre part, l'acceptation sociale de la nouvelle technique est jugée bonne de même que la flexibilité institutionnelle dans le cadre de son lance-

ment. A la question de savoir lequel des deux types de toilettes séparatrices d'urine (Fig. 2) ils préféreraient, les acteurs privilégient nettement le système NoMix à chasse d'eau au détriment des toilettes sèches pourtant moins onéreuses (Fig. 3). Les intervenants ont toutefois tenu à souligner que les toilettes bicamérales de type NoMix pouvaient certainement être produites en Chine à un coût nettement inférieur qu'il ne l'est en Europe.

Toute l'importance de processus décisionnels sans discordes. Dans le cadre de l'analyse des acteurs, il importe également de bien identifier les processus décisionnels intervenant dans le lancement de la nouvelle technologie. Quels seraient concrètement les processus mis en jeu si l'on souhaitait implanter des systèmes de séparation des urines dans une grande partie de la ville de Kunming? Pour ce faire, l'Agence d'Etat pour la protection de l'environnement devrait s'associer au Bureau de la protection du Dianchi pour déposer une requête auprès du Gouvernement et du Congrès. Si cette requête recueillait un avis favorable, l'Institut de sciences de l'environnement de Kunming se verrait tout d'abord chargé de réaliser un projet pilote destiné à évaluer la faisabilité à petite échelle. Ce n'est qu'après réalisation satisfaisante du projet pilote que le Bureau de la protection du Dianchi pourrait lancer la collecte séparative des urines à grande échelle.

Fait marquant, le lancement d'une nouvelle technologie serait favorisé par une grande flexibilité institutionnelle. En effet, bien que la Loi exige normalement un système centralisé de traitement des eaux usées, le système politique actuel du plan quinquennal autorise la réalisation de projets pilotes innovants, même au niveau des villes.

Un projet pilote: la collecte séparative des urines en milieu rural. L'Institut de sciences de l'environnement de Kunming a lancé avec le concours de l'Eawag un projet pilote prévoyant l'implantation de 100 toilettes sèches à fonction séparatrice dans une zone rurale située à la périphérie de Kunming [7]. L'expérience a été positive sur bien des aspects, mais elle a également montré à quels problèmes et réticences un projet d'implantation à grande échelle pourrait se heurter. En effet, d'après une analyse quantitative du degré de satisfaction par rapport à la nouvelle technologie [8], seuls 40% des habitants avaient utilisé les toilettes sèches. Ceux-ci en étaient cependant majoritairement satisfaits. Le principal problème avancé était d'ordre spatial, l'emplacement des toilettes étant de préférence souhaité à l'extérieur et même en dehors des limites de la propriété. La crainte des nuisances olfactives joue certainement un rôle important à ce niveau.

Ténacité et audace pour une solution durable. Nos études révèlent dans l'ensemble que la collecte séparative des urines peut contribuer dans une large mesure à la résolution du problème d'assainissement de la ville de Kunming même si des solutions différentes doivent sans doute être envisagées pour les zones rurales et les zones urbaines. D'un autre côté, il est très clair que l'assainissement du lac revêt un caractère prioritaire pour les autorités de Kunming étant donné la forte croissance de la population de la ville. Il n'existe cependant pas de solution standard pour

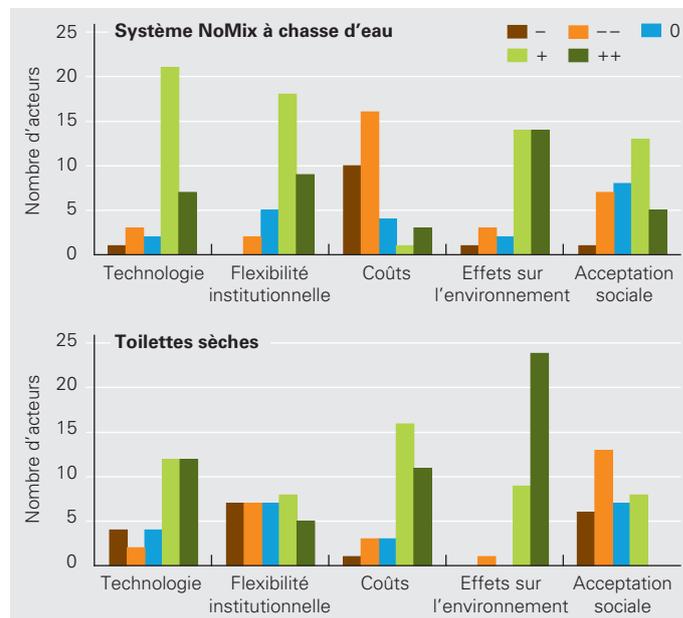


Fig. 3: Opinion des acteurs clés sur deux types différents de toilettes séparatrices des urines. Catégories allant de très négatif (–) à très positif (++).

mener à bien cette tâche des plus ambitieuses: ni l'actualisation du système d'assainissement doublé d'une dérivation des eaux épurées ni la mise en œuvre d'une collecte séparative des urines ne peuvent à elles seules résoudre le problème du Dianchi. Il est ici besoin de mesures combinées et c'est au prix de beaucoup de patience, d'audace et d'esprit d'entreprise que des solutions adéquates pourront être développées et testées avant d'être mises en pratique à grande échelle. ○ ○ ○

- [1] 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-North-South est co-financé par la Direction du développement et de la coopération DDC.
- [2] Huang D.-B., Bader H.-P., Scheidegger R., Schertenleib R., Gujer W. (in press): Confronting Limitations: new solutions required for urban water management in Kunming City. *Journal of Environmental Management*.
- [3] Grey A.V., Li W. (1999): Case study on water quality modelling of Dianchi Lake, Yunnan Province, South West China. *Water Science and Technology* 40 (2), 35–43.
- [4] Liu, Y. (2005): Phosphorus flows in China: physical profiles and environmental regulation. Dissertation Wageningen University, Netherlands, 177 p.
- [5] Medilanski E., Chuan L., Mosler H., Schertenleib R., Larsen T.A. (2006): Wastewater management in Kunming, China: feasibility and perspectives of measures at the source from a stakeholder point of view. *Environment and Urbanization* 18, 353–368.
- [6] Medilanski E., Chuan L., Mosler H., Schertenleib R., Larsen T.A. (in press): Identifying the institutional decision process to introduce decentralized sanitation in the city of Kunming (China). *Environmental Management*.
- [7] Kunming Institute of Environmental Science (2005): Implementation, monitoring and promotion of urine-separating dry toilets in Zhonghe Village, Kunming, China. Final Report. Disponible par internet, voir [1].
- [8] Chuan L., Ronghuai L., Jinming F., Morel A., Medilanski E. (2005): Social acceptance of urine-diverting dry toilets in Zhonghe Village, Kunming, China. Result of the survey. Disponible par internet, voir [1].

Conclusion

Premières expériences pratiques

La Direction cantonale des constructions et de l'environnement de Bâle-Campagne a lancé en 2002 un essai pilote de séparation et de valorisation des urines. Les principaux objectifs en étaient: évaluer le degré d'applicabilité pratique, fermer les cycles d'éléments nutritifs et alléger le cycle de l'eau des polluants. Depuis juin 2005, 20 à 30 litres d'engrais liquide assaini «Urevit» sont produits chaque semaine à partir des urines collectées à la Bibliothèque cantonale de Liestal. Une autorisation provisoire a été octroyée par l'Office fédéral de l'agriculture. Les premiers résultats:

- **Collecte:** les WC NoMix présentent des déficiences au niveau de l'hygiène, de l'utilisation et de l'entretien, cela devrait être optimisé. Les urinoirs sans eau se sont bien établis. Du fait des nuisances olfactives, l'emplacement du réservoir de collecte des urines doit être choisi avec soin.
- **Traitement:** pour protéger les membranes d'électrodialyse, une ultrafiltration est nécessaire en amont. Les nutriments sont concentrés d'un facteur 4 et les polluants traces ne sont plus détectables.
- **Valorisation:** l'Urevit est un engrais de grande qualité pour les usages agronomiques. Le dégagement d'ammoniac lors de son application demande des précautions particulières. Ceci et les apports importants de sels minéraux doivent être pris en compte pour une application en floriculture.

La séparation des urines permet d'atteindre les objectifs fixés. La station de traitement se trouve cependant encore en phase expérimentale et les coûts de production de l'Urevit sont encore supérieurs à ceux des engrais chimiques. Nous poursuivons tout de même nos études sur cette technologie mais envisageons de nous concentrer sur les lieux producteurs d'effluents spéciaux (hôpitaux) ou de grandes quantités d'urines (stades). ○ ○ ○



Toni von Arx, directeur des Services industriels de Bâle-Campagne (AIB)

NoMix peut secourir les océans

Le PNUE, le Programme des Nations Unies pour l'environnement émet des chiffres alarmants: depuis 2004, le nombre de «zones mortes» dans les mers et océans du globe est passé de 150 à plus de 200. Elles doublent tous les dix ans et menacent le développement des populations de poissons au moins autant que la surpêche. Les zones mortes, très pauvres en oxygène, se forment suite à l'eutrophisation des mers par les rejets continentaux d'azote et de phosphore.

Si nous extrapolons les rejets de notre système d'assainissement actuel en tenant compte de la croissance effrénée de la population citadine mondiale, l'eutrophisation des mers devrait prendre des dimensions plus que catastrophiques. Il est donc grand temps de revoir la conception de ce système, toute intervention ultérieure se soldant par des coûts et difficultés plus importants et s'avérant probablement trop tardive. Novaquatis livre une alternative potentielle aux systèmes traditionnels. Celle-ci permet non seulement de retenir et de recycler les matières nutritives mais aussi, notamment, d'économiser une eau devenue précieuse.

C'est uniquement lorsque nous, pays industriels, aurons démontré que les mesures à la source satisfont à de hautes exigences hygiéniques et esthétiques que nous pourrions exporter les techniques correspondantes. Ceci permettrait d'une part de soulager grandement les mers et nos propres écosystèmes aquatiques, d'autre part de créer un nouveau produit d'exportation pour l'industrie suisse. La première chose à faire est donc de concevoir de nouveaux systèmes et de les utiliser avec engagement et détermination. C'est le seul moyen de garantir à l'avenir une quantité suffisante de poisson dans les assiettes du monde entier. ○ ○ ○



Willi Gujer, membre de la direction de l'Eawag, professeur de gestion des eaux urbaines à l'EPF de Zurich

Aux praticiens de jouer

Le projet Novaquatis l'a clairement démontré: l'assainissement pourrait avoir un tout autre visage. Le projet remet en question les traditions et révolutionne les modes de pensée. Ne serait-ce que pour cela, Novaquatis est un progrès énorme.

L'une des principales difficultés du concept de séparation des urines est de déterminer le lieu et la méthode de fabrication des engrais à partir des matières nutritives qu'elles contiennent. L'aménagement de nouvelles canalisations pour le transport de l'urine ou son évacuation par camion-citerne ne semblent pas constituer de solutions attrayantes dans l'immédiat. Les choses se présenteraient déjà mieux si, par exemple, l'évacuation de l'urine collectée s'effectuait en même temps que le ramassage des ordures ménagères. De même, une décentralisation de la transformation des urines résoudrait de nombreux problèmes.

Il importe maintenant que les solutions prometteuses élaborées par Novaquatis soient réellement mises en pratique. Les autorités administratives doivent oser soutenir des projets de construction incluant ces avancées technologiques. De même, l'industrie doit renforcer son engagement et contribuer au développement et à la production de ces nouvelles technologies.

L'assainissement concerne nous tous et les innovations sont les bienvenues. C'est ce dont j'ai pu me convaincre lors de la journée portes ouvertes de la maison sans effluents de Zuchwil qui avait peine à accueillir toutes les personnes venues la visiter. Le contexte est donc favorable à une révision du concept d'assainissement. Les bases théoriques ont été établies et de premières expériences pratiques ont été faites. A nous maintenant d'évaluer où se situent les limites et les opportunités de la séparation des urines. ○ ○ ○



Martin Würsten, chef du Service des eaux de l'Office de l'environnement du canton de Soleure, Président de l'Association suisse des professionnels de la protection des eaux

Publications Novaquatis

La présente liste n'est pas exhaustive; voir aussi sous www.novaquatis.eawag.ch. D'autres publications paraîtront en effet d'ici fin 2007. La plupart des publications ainsi que le rapport final du projet Novaquatis (en allemand et anglais) peuvent être demandés sous novaquatis@eawag.ch.

Publications dans des revues internationales spécialisées

Borsuk M.E., Lienert J., Maurer M., Larsen T.A. (in preparation): Using decision analysis to chart a path for innovative toilet technology. *Decision Analysis*.

Escher B.I., Eggen R.I.L., Schreiber U., Schreiber Z., Vye E., Wisner B., Schwarzenbach R.P. (2002): Baseline toxicity (narcosis) of organic chemicals determined by *in vitro* membrane potential measurements in energy-transducing membranes. *Environmental Science & Technology* 36, 1971–1979.

Escher B.I., Bramaz N., Eggen R.I.L., Richter M. (2005): *In vitro* assessment of modes of toxic action of pharmaceuticals in aquatic life. *Environmental Science & Technology* 39, 3090–3100.

Escher B.I., Bramaz N., Maurer M., Richter M., Sutter D., von Känel C., Zschokke M. (2005): Screening test battery for pharmaceuticals in urine and wastewater. *Environmental Toxicology and Chemistry* 24, 750–758.

Escher B.I., Pronk W., Suter M. J.-F., Maurer M. (2006): Monitoring the removal efficiency of pharmaceuticals and hormones in different treatment processes of source-separated urine with bioassays. *Environmental Science & Technology* 40, 5095–5101.

Escher B.I., Bramaz N., Richter M., Lienert J. (2006): Comparative ecotoxicological hazard assessment of beta-blockers and their human metabolites using a mode-of-action-based test battery and a QSAR approach. *Environmental Science & Technology* 40, 7402–7408.

Huang D.-B., Bader H.-P., Scheidegger R., Schertenleib R., Gujer W. (in press): Confronting limitations: new solutions required in urban water management in Kunming City. *Journal of Environmental Management*.

Huisman J.L., Burckhardt S., Larsen T.A., Krebs P., Gujer W. (2000): Propagation of waves and dissolved compounds in sewer. *Journal of Environmental Engineering-ASCE* 126, 12–20.

Krebs P., Larsen T.A. (1997): Guiding the development of urban drainage systems by sustainability criteria. *Water Science and Technology* 35 (9), 88–98.

Larsen T.A., Gujer W. (1996): Separate management of anthropogenic nutrient solutions (human urine). *Water Science and Technology* 34 (3–4), 87–94.

Larsen T.A., Gujer W. (1997): The concept of sustainable urban water management. *Water Science and Technology* 35 (9), 3–10.

Larsen T.A., Gujer W. (2001): Waste design and source control lead to flexibility in wastewater management. *Water Science and Technology* 43 (5), 309–318.

Larsen T.A., Peters I., Alder A., Eggen R., Maurer M., Muncke J. (2001): Re-engineering the toilet for sustainable waste-water management. *Environmental Science & Technology* 35, 192A–197A.

Larsen T.A., Lienert J., Joss A., Siegrist H. (2004): How to avoid pharmaceuticals in the aquatic environment. *Journal of Biotechnology* 113, 295–304.

Larsen T.A., Maurer M., Udert K.M., Lienert J. (submitted): Nutrient cycles and resource management: Implications for the choice of wastewater treatment technology. *Water Science and Technology*. Accepted for presentation at IWA Advanced Sanitation Conference, Aachen, March 2007.

Lienert J., Larsen T.A. (2006): Considering user attitude in early development of environmentally friendly technology: A case study of NoMix toilets. *Environmental Science & Technology* 40, 4838–4844.

Lienert J., Haller M., Berner A., Stauffacher M., Larsen T.A. (2003): How farmers in Switzerland perceive fertilizers from recycled anthropogenic nutrients (urine). *Water Science and Technology* 48 (1), 47–56.

Lienert J., Thiemann K., Kaufmann-Hayoz R., Larsen T.A. (2006): Young users accept NoMix toilets – a questionnaire survey on urine source separating toilets in a college in Switzerland. *Water Science and Technology* 54 (11–12), 403–412.

Lienert J., Bürki T., Escher B.I. (submitted): Reducing micropollutants with source control: Substance flow analysis of 212 pharmaceuticals in feces and urine. *Water Science and Technology*. Accepted for presentation at IWA Advanced Sanitation Conference, Aachen, March 2007.

Lienert J., Güdel K., Escher B.I. (submitted): Screening method for ecotoxicological hazard assessment of 42 pharmaceuticals considering human metabolism and excretory routes. *Environmental Science & Technology*.

Maurer M., Schwegler P., Larsen T.A. (2003): Nutrients in urine: energetic aspects of removal and recovery. *Water Science and Technology* 48 (1), 37–46.

Maurer M., Rothenberger D., Larsen T.A. (2005): Decentralised wastewater treatment technologies from a national perspective: at what cost are they

competitive? *Water Science and Technology: Water Supply* 5 (6), 145–154.

Maurer M., Pronk W., Larsen T.A. (2006): Treatment processes for source separated urine. *Water Research* 40, 3151–3166.

Medilanski E., Chuan L., Mosler H.-J., Schertenleib R., Larsen T.A. (2006): Wastewater management in Kunming, China: a stakeholder perspective on measures at the source. *Environment and Urbanization* 18, 353–368.

Medilanski E., Chuan L., Mosler H.-J., Schertenleib R., Larsen T.A. (in press): Identifying the institutional decision process to introduce decentralized sanitation in the city of Kunming (China). *Environmental Management*.

Pahl-Wostl C., Schönborn A., Willi N., Muncke J., Larsen T.A. (2003): Investigating consumer attitudes towards the new technology of urine separation. *Water Science and Technology* 48 (1), 57–65.

Pronk W., Biebow M., Boller M. (2006): Electrodialysis for recovering salts from a urine solution containing micropollutants. *Environmental Science & Technology* 40, 2414–2420.

Pronk W., Biebow M., Boller M. (2006): Treatment of source-separated urine by a combination of bipolar electrodialysis and a gas transfer membrane. *Water Science and Technology* 53 (3), 139–146.

Pronk W., Palmquist H., Biebow M., Boller M. (2006): Nanofiltration for the separation of pharmaceuticals from nutrients in source-separated urine. *Water Research* 40, 1405–1412.

Pronk W., Zuleeg S., Lienert J., Escher B., Koller M., Berner A., Koch K., Boller M. (submitted): Pilot experiments with electrodialysis and ozonation for the production of a fertilizer from urine. *Water Science and Technology*. Accepted for presentation at IWA Advanced Sanitation Conference, Aachen, March 2007.

Rauch W., Brockmann D., Peters I., Larsen T.A., Gujer W. (2003): Combining urine separation with waste design: an analysis using a stochastic model for urine production. *Water Research* 37, 681–689.

Ronteltap M., Maurer M., Gujer W. (2007): Struvite precipitation thermodynamics in source-separated urine. *Water Research* 41, 977–984.

Rossi L., Lienert J., Larsen T.A. (submitted): Real-life efficiency of urine source separation: experience from households and an institutional setting. *Water Research*.

Spörri C., Peters I., Larsen T.A., Reichert P. (in preparation): A microsimulation model for optimizing urine tank management strategies of NoMix toilets. *Water Research*.

Udert K.M., Fux C., Münster M., Larsen T.A., Siegrist H., Gujer W. (2003): Nitrification and autotrophic denitrification of source-separated urine. *Water Science and Technology* 48 (1), 119–130.

Udert K.M., Larsen T.A., Biebow M., Gujer W. (2003): Urea hydrolysis and precipitation dynamics in a urine-collecting system. *Water Research* 37, 2571–2582.

Udert K.M., Larsen T.A., Gujer W. (2003): Biologically induced precipitation in urine-collecting systems. *Water Science and Technology: Water Supply* 3 (3), 71–78.

Udert K.M., Larsen T.A., Gujer W. (2003): Estimating the precipitation potential in urine-collecting systems. *Water Research* 37, 2667–2677.

Udert K.M., Larsen T.A., Gujer W. (2005): Chemical nitrite oxidation in acid solutions as a consequence of microbial ammonium oxidation. *Environmental Science & Technology* 39, 4066–4075.

Udert K.M., Larsen T.A., Gujer W. (2006): Fate of major compounds in source-separated urine. *Water Science and Technology* 54 (11–12), 413–420.

Wilsenach J.A., Maurer M., Larsen T.A., van Loosdrecht M.C.M. (2003): From waste treatment to integrated resource management. *Water Science and Technology* 48 (1), 1–9.

Autres publications

Abegglen C., Maurer M. (2003): Nitrifikationskapazität der ARA Arosa. *Eawag Jahresbericht* 2002, 22–23.

Gilg R., Lienert J. (2003): News from Swiss Novaquatis Project. *EcoEng Newsletter* No. 7: www.iees.ch/EcoEng031/EcoEng031_Novaquatis.html.

Huang D.B., Schertenleib R., Siegrist H., Larsen T.A., Gujer W. (2004): Assessment method for evaluating existing and alternative measures of urban water management. In: «ecosan – closing the loop» Proceedings of the 2nd International Symposium on Ecological Sanitation in Lübeck 2003. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, p. 749–756.

Kaufmann-Hayoz R. (2002): Mülltrennung und Recycling auch beim Abwasser? *Universität Bern – Porträt einer schweizerischen Hochschule* 4, 33.

Koch G. (2001): Separate Urinentsorgung – die Revolution am «stillen Örtchen». *Bau- und Umweltzeitung* (Informationen aus der Bau- und Umweltschutzdirektion).

Koch G. (2002): BL Revolution auf dem WC. *Umwelt BUWAL*

Koch G. (2002): Urinabtrennung in der neuen Kantonsbibliothek. *Bau- und Umwelt Zeitung* (Informationen aus der Bau- und Umweltschutzdirektion).

Kühni M., Koch G., Ott E. (2002): Zukunftsweisende Sanitär- und Abwassertechnik – erstes Pilotprojekt der Schweiz für Urinseparierung, -speicherung und -steuerung im technischen Massstab. *Gas Wasser Abwasser* 11, 827–835.

Larsen T.A., Udert K.M. (1999): Urinseparierung – ein Konzept zur Schliessung der Nährstoffkreisläufe. *Wasser & Boden* 51, 6–9.

Larsen T.A., Gujer W. (1999): Tackling problems at the source – even in the household. *Eawag news* 48, 6–7.

Larsen T.A. (1999): Nährstoffkreisläufe in der Siedlungswasserwirtschaft – Technische Möglichkeiten von Eliminations- und Recyclingverfahren. *Schweizer Ingenieur und Architekt* 19, 8–10.

Larsen T.A. (2000): Revolution im Badezimmer – Das WC der etwas anderen Art. *Frauenzeitung (FRAZ)* 3/4/5, 31.

Larsen T.A. (2000): Revolution im Badezimmer – Das WC der etwas anderen Art. *Forum Hauswirtschaft* 10, 23–24.

Larsen T.A., Boller M. (2001): Perspectives of nutrient recovery in DESAR concepts. In: Lens P., G. Zeeman, G. Lettinga (Eds), *Decentralised Sanitation and Reuse: Concepts, Systems and Implementation*. Integrated Environmental Technology Series. IWA Publishing, p. 387–410.

Larsen T.A., Rauch W., Gujer W. (2001): Waste design paves the way for sustainable urban wastewater management. Proceedings of the International UNESCO Symposium «Frontiers in Urban Water Management: Deadlock or Hope?» UNESCO, Paris, p. 219–229.

Larsen T.A., Gujer W. (2001): Elimination von Mikroverunreinigungen – Mit Massnahmen an der Quelle zu mehr Flexibilität in der Abwasserreinigung. *Gas Wasser Abwasser* 3, 159–166.

Larsen T.A., Alder A., Eggen R.I., Maurer M., Muncke J., Peters I. (2001): Trenn-WC auf dem Prüfstand – das Projekt Novaquatis. *Eawag-Jahresbericht* 2000, 7–11.

Larsen T.A., Alder A., Eggen R.I., Maurer M., Muncke J., Peters I. (2001): Testlauf im Kraftwerk1. *Magazin Uni Zürich und Bulletin der ETH Zürich* 281, 47–49.

Larsen T.A., Gujer W. (2002): Waste design, source control und on-site-Technologien: Der Weg zu einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft. *KA – Wasserwirtschaft Abwasser Abfall* 49, 1372–1379.

Larsen T.A., Lienert J. (2003): Societal implications of re-engineering the toilet. *Water Intelligence Online* : www.iwaponline.com/wio/2003/03/default001.htm

Larsen T.A., Lienert J. (2004): Coping with micro-pollutants in urine-based fertilizer. Proceedings of the DeSa/R Symposium, Berching/Opf., Germany, «DeSa/R – Means to achieve the millenium goal for sanitation», p. 155–169.

Larsen T.A., Lienert J., Maurer M., Gujer W. (2005): Ökologische Infrastrukturinnovationen in der Siedlungswasserwirtschaft: Ansätze und Perspektiven. In: Loske R., R. Schaeffer (Hrsg.) *Die Zukunft der Infrastrukturen – Intelligente Netzwerke für eine nachhaltige Entwicklung*. Metropolis-Verlag, Marburg, S. 347–367.

Lienert J., Larsen T.A. (2002): Urinseparierung – eine Alternative für die schweizerische Siedlungswasserwirtschaft? *Gas Wasser Abwasser* 11, 819–826.

Lienert J., Larsen T.A. (2003): NoMix-Technologie: Wie gut ist die Akzeptanz? *EAWAG news* 57, 14–17.

Lienert J. (2003): Novaquatis – Ein Forschungsprojekt der Eawag. Schriftliches Interview mit Judit Lienert. *Novatlantis (Nachhaltigkeit im ETH Bereich)*. *Novatlantis News*.

Lienert J., Larsen T.A. (2004): Introducing urine separation in Switzerland: NOVAQUATIS, an interdisciplinary research project. In: «ecosan – closing the loop» Proceedings of the 2nd International Symposium on Ecological Sanitation in Lübeck 2003. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, p. 891–899.

Lienert J., Larsen T.A. (2005): Making the first step towards a more sustainable urban water management system – with the NoMix toilet. *European Water Day, 84th ASTEE congress, Paris, France*.

Lienert J., Larsen T.A. (2006): Novaquatis – a building block for innovative sanitation technology. In: Lanz K., L. Müller, C. Rentsch, R. Schwarzenbach (Eds.) *Who owns the water?* Lars Müller Publishers, Baden, Switzerland, p. 380–381.

Lienert J., Larsen T.A. (2006): Novaquatis, a cross-cutting research project from Switzerland. Why we consider urine source separation. Abschlussseminar des EU-Demonstrationsvorhabens SCST (Sanitation Concepts for Separate Treatment); Kompetenz-Zentrum Wasser Berlin.

Lienert J., Larsen T.A. (submitted): Pilot projects in bathrooms: a new challenge for wastewater professionals.

Maurer M., Muncke J., Larsen T.A. (2002): Technologies for nitrogen recovery and reuse. In: Lens P., L. Hulshoff Pol, P. Wilderer, T. Asano (Eds.), *Water Recycling and Resource Recovery*

in Industry: Analysis, Technologies and Implementation. IWA Publishing, p. 491–510.

Maurer M., Schwegler P. (2003): Stickstoff rezyklieren oder eliminieren – Ökobilanzvergleich von Urinseparation und Denitrifikation. Eawag-Jahresbericht 2002, 71–72.

Maurer M. (2003): Nährstoffrecycling in der Siedlungsentwässerung. PUSCH Praktischer Umweltschutz Schweiz, Zürich, Thema Umwelt 2, 6–7.

Muncke J., Maurer M. (2001): Paradigmawechsel in der Toilette – Probleme beim Gewässerschutz führen zu einem Überdenken der heutigen Abwasserentsorgung. Gebäudetechnik 6, 60–61.

Muncke J., Maurer M. (2001): Urin separat sammeln; NoMix – die Toilette der Zukunft? Umwelt Focus 5, 13–17.

Muncke J., Maurer M. (2001): Abwasserentsorgung: Heutige Probleme und Wege in die Zukunft. die stadt – les villes (Zeitschrift des schweizerischen Städteverbands, SSV, Bern) 6, 21–21.

Muncke J., Maurer M. (2002): Vor einem Paradigmawechsel bei der Toilette. Haus Tech S. 38–39.

Muncke J., Maurer M. (2002): Changement de paradigme dans les toilettes. Batitech.

Peters I., Brassel K.-H., Spörri C. (2002): A micro-simulation model for assessing urine flows in urban wastewater management. In: Rizzoli, A.E., A.J. Jakemann (Eds), Integrated Assessment and Decision Support. Proceedings of the 1st Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society, p. 508–513.

Peters I., Brassel K.-H., Spörri C. (2002): Modelling the diffusion of urine source separation technology. Presented at the Annual Meeting of the Regional Science Association International, British and Irish section, Brighton, UK.

Pronk W. (2005): Urinbehandlung mit Ozonung und Elektrodialyse, Novatlantis News Update.

Pronk W., Lienert J., Boller M. (2006): Siedlungswasserwirtschaft: Ein Pilotprojekt geht neue Wege. Novatlantis News Update Nr. 6.

Pronk W., Biebow M., Boller M. (2004): Assessment of processing alternatives for source-separated urine. Proceedings of the 4th IWA World Water Congress and Exhibition, Marrakech, Morocco.

Ronteltap M., Biebow M., Maurer M., Gujer W. (2004): Thermodynamics of struvite precipitation in source separated urine. In: «ecosan – closing the loop» Proceedings of the 2nd International Symposium on Ecological Sanitation in Lübeck 2003. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, p. 463–470.

Rossi L., Lienert J., Rauch W. (2004): At-source control of urine to prevent acute wet-weather impacts of ammonia. Presented at 5th International

Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management (NOVATECH). Proceedings, Vol 2, Lyon, France, p. 919–926.

Simons J., Lienert J., Clemens J. (2006): Phosphorous-Availability from substrates of conventional and non-conventional waste water treatment systems. Proceedings of the IWA (International Water Association) World Water Congress, Beijing, China.

Udert K.M., Högger R., Larsen T.A., Gujer W. (2004): Urinausfällungen in Urinalen und NoMix-Toiletten. Vereinigung Schweizerischer Sanitär- und Heizungsfachleute; Installateur 11, 46–48.

Udert K.M., Högger R., Larsen T.A., Gujer W. (2004): Fällungsprodukte in Urinalen und NoMix-Toiletten. Gas Wasser Abwasser 12, 913–920.

Udert K.M., Lienert J., Larsen T.A. (2006): Novaquatis – Neue Wege in der Siedlungswasserwirtschaft. Gewässerschutz – Wasser – Abwasser 204. Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 19/1–19/4.

Thèses de doctorat, de DEA et de semestre

Aegglen C., Haag S. (2002): Nitrifikationskapazität der ARA Arosa. Diplomarbeit am Institut für Hydrodynamik und Wasserwirtschaft der ETH Zürich/Eawag.

Biebow M. (2002): Optimierung der Phosphat-ausfällung in urinhaltigen Lösungen. Diplomarbeit am Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft der Technischen Universität Dresden/Eawag.

Bill C., Wüthrich R. (2003): Abbau von Östrogen in Urin, Diplomarbeit am Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETH Zürich/Eawag.

Bumann A. (2006): Modeling the distribution of different pharmaceuticals in a river. Semester thesis in the Safety and Environmental Technology Group of ETH Zürich/Eawag.

Brockmann D. (2001): Entwicklung eines stochastischen Modells zur Simulation der NoMix Technologie. Diplomarbeit Eawag/Universität Kaiserslautern Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft.

Elmer P. (2000): Waste design durch Urinseparation. Diplomarbeit am Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETH Zürich/Eawag.

Haller, M. (2000): Düngeverhalten von Bio- und IP-Landwirten. Umfrage zur Akzeptanz des Projektes Novaquatis. Semesterarbeit am Departement für Umweltwissenschaften der ETH Zürich/Eawag.

Hausherr R. (2004): Dünger aus Urin? Einfluss von pH und Temperatur auf die Partikelgrössenverteilung von Struvit. Diplomarbeit am Institut

für Hydrodynamik und Wasserwirtschaft der ETH Zürich/Eawag.

Mayer, M. (2001): Verfahrenstechnische Auslegung einer Urin-Eindampfanlage. Diplomarbeit an der Fachhochschule beider Basel, Muttenz/Eawag.

Richter M. (2003): Ökotoxikologische Risikobewertung von Pharmaka in Urin nach Behandlung im Bioreaktor und durch Membranfiltration, Diplomarbeit an der Hochschule Anhalt (FH), Hochschule für angewandte Wissenschaften Bernburg-Dessau-Köthen, Eawag und Hochschule Wädenswil.

Ronteltap M. (planned for 2007): Precipitation of phosphate compounds during the processing of source separated urine. Dissertation ETH Zürich/Eawag.

Schmidtke J. (2004): Marktpotential der Trenntechnologie in den neuen Bundesländern. Diplomarbeit an der Technischen Universität Dresden/Eawag.

Schwegler P. (2002): Vergleich der konventionellen Abwasserreinigung und der Urinseparation zur Stickstoffelimination mittels Ökobilanzen. Diplomarbeit an der Fachhochschule beider Basel, Muttenz/Eawag.

Sutter D., Zschokke M. (2003): Abbau von Östrogenen und Pharmaka in Urinbioreaktoren, Diplomarbeit am Departement für Umweltwissenschaften der ETH Zürich/Eawag.

Thiemann K. (2006): Neue Dinge für eine nachhaltige Entwicklung. Ansätze zu einer Kulturpsychologie nachhaltigen Produktdesigns. Doktorarbeit an der Philosophisch-humanwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, Schweiz.

Tobler N., Niederer C. (2001): Ökotoxikologische Bewertung von Pharmazeutika. Semesterarbeit am Departement für Umweltwissenschaften der ETH Zürich/Eawag.

Udert K.M. (2003): The fate of nitrogen and phosphorus in source-separated urine. Dissertation at the Institute for Hydrodynamics and Water Management, ETH Zürich/Eawag.

von Känel C. (2002): Extraktion von Pharmazeutika aus Urin und deren Toxizitätsmessung mit Hilfe von zwei biologischen Testsystemen, Diplomarbeit am Departement für Umweltwissenschaften der ETH Zürich/Eawag.

Zuleeg S. (2005): Entfernung von Mikroverunreinigungen aus Urin mittels Ozonung. Diplomarbeit an der Technischen Universität Dresden/Eawag.

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

- [04666] **Escher B.I., Quayle P., Muller R., Schreiber U., Mueller J.F.** (2006): Passive sampling of herbicides combined with effect analysis in algae using a novel high-throughput phytotoxicity assay (Maxi-Imaging-PAM). *Journal of Environmental Monitoring* 8, 456–464.
- [04667] **Rothenberger S., Zurbrugg C.** (2006): Decentralised composting for cities of low- and middle-income countries. In: Anonymous Waste Concern, Dhaka, Bangladesh and Eawag, Dübendorf, Switzerland, 108 pp.
- [04668] **Schwarzenbach R.P., Escher B.I., Fenner K., Hofstetter T.B., Johnson C.A., von Gunten U., Wehrli B.** (2006): The challenge of micropollutants in aquatic systems. *Science* 313, 1072–1077.
- [04669] **Köhler A., Hellweg S., Escher B.I., Hungerbühler K.** (2006): Organic pollutant removal versus toxicity reduction in industrial wastewater treatment: The example of wastewater from fluorescent whitening agent production. *Environmental Science & Technology* 40, 3395–3401.
- [04670] **Gianella S., Maurer M.** (2006): Infrastrukturmanagement. *GWA Gas, Wasser, Abwasser* 9, 733–742.
- [04671] **Gianella S., Gujer W.** (2006): Nachführungsstrategie für Infrastrukturdaten. *GWA Gas, Wasser, Abwasser* 11, 887–894.
- [04672] **Wanner O., Eberl H.J., Morgenroth E., Noguera D.R., Picioreanu C., Rittmann B.E., van Loosdrecht M.** (2006): Mathematical modeling of biofilms. In: Anonymous IWA Publishing, London, UK, 208 pp.
- [04673] **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.
- [04674] **Hostmann M.** (2006): Einbezug der Akteure bei Wasserbauprojekten: Schwierigkeiten und Chancen. *Ingenieurbiologie* 3, 11–15.
- [04675] **Markard J., Stadelmann M., Truffer B.** (2006): Analysis of innovation processes and development options: the case of biogas technology in Switzerland. *SPRU Conference on the Future of Science, Technology and Innovation Policy*, Brighton, UK, 11–13 September 2006, 16 pp.
- [04676] **Kourtidis K., Kioutsioukis I., McGinnis D.F., Rapsomanikis S.** (2006): Effects of methane outgassing on the Black Sea atmosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics* 6, 5173–5182.
- [04677] **Brandl R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Stadelmann F.X., Tarradellas J.** (2006): Optimised accelerated solvent extraction of PCBs and PAHs from compost. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 86, 505–525.
- [04678] **Blotvogel J., Reineke A.K., Hollender J., Held T.** (2006): Überwachung von NSO-Heterocyclen an Teeröl-kontaminierten Standorten. *Grundwasser* 4, 295–297.
- [04679] **Wilhelm S., Hintze T., Livingstone D.M., Adrian R.** (2006): Long-term response of daily epilimnetic temperature extrema to climate forcing. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 63, 2467–2477.
- [04680] **Jankowski T., Weyhenmeyer G.A.** (2006): The role of spatial scale and area in determining richness-altitude gradients in Swedish lake phytoplankton communities. *Oikos* 115, 433–442.
- [04681] **Fenner K., Canonica S., Escher B.I., Gasser L., Spycher S., Tülp H.C.** (2006): Developing methods to predict chemical fate and effect endpoints for use within REACH. *Chimia* 60, 683–690.
- [04682] **Jia S.F., Yang H., Zhang S.F., Wang L., Xia J.** (2006): Industrial water use Kuznets curve: Evidence from industrialized countries and implications for developing countries. *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce* 132, 183–191.
- [04683] **Zurbrugg C., Diener S.** (2006): Larven fressen Müll – eine Alternative zur Kompostierung? *ISWA-CH Info* 4 S.
- [04684] **Fenner K., Escher B.I.** (2006): Umweltchemie und Ökotoxikologie im Spannungsfeld von Wissenschaft und Praxis. *GAIA* 2, 121–126.
- [04685] **Klasmeier J., Matthies M., Macleod M., Fenner K., Scheringer M., Stroebe M., Le Gall A.C., McKone T., van de Meent D., Wania F.** (2006): Application of multimedia models for screening assessment of long-range transport potential and overall persistence. *Environmental Science & Technology* 40, 53–60.
- [04686] **Manser R., Gujer W., Siegrist H.** (2006): Decay processes of nitrifying bacteria in biological wastewater treatment systems. *Water Research* 40, 2416–2426.
- [04687] **Rieger L., Alex J., Gujer W., Siegrist H.** (2006): Modelling of aeration systems at wastewater treatment plants. *Water Science and Technology* 53 (4–5), 439–447.
- [04688] **Siegrist H., Joss A.** (2006): Leistung der heutigen Abwasserreinigung und innovative Ansätze für das zukünftige Design. *DWA Tagung «Elimination organischer Spurenstoffe und Mikroorganismen»*, Koblenz, Deutschland, 9 S.
- [04689] **Siegrist H., Joss A.** (2006): Leading-edge processes on urban wastewater treatment – Presentation of the European Project NEPTUNE. *ECOMONDO*, Rimini, Italy, 6 pp.
- [04690] **Siegrist H., Bassanello C.** (2006): Mess- und Regeltechnik auf der ARA. *VSA Fortbildungskurs 2006, Automatisierungstechnik der Abwasserentsorgung*, 61 S.
- [04691] **Dominguez D., Truffer B., Gujer W.** (2006): Driving forces in the long range development of wastewater treatment plants. *iEMS Third Biennial Meeting, «Summit on Environmental Modelling and Software»*. International Environmental Modelling and Software Society, Burlington, USA, 6 pp.
- [04692] **Burkhardt M.** (2006): Untersuchung zum Auswaschverhalten. *Schweizer Baujournal SBJ* 6, S. 44.
- [04693] **Koottatep T., Panuvatvanich A., Morel A.** (2006): Wastewater effluent polishing systems of anaerobic baffled reactor treating black-water from households. *7th Specialised Conference on Small Water and Wastewater Systems*, Mexico City, 8 pp.
- [04694] **Berg M., Pham T. K. T., Stengel C., Pham H.V., Tong N.T., Nguyen V.D., Giger W., Stüben D.** (2006): Hydrological and sedimentary controls leading to groundwater arsenic contamination in Southern Hanoi under a regime of high water abstraction. *National workshop on groundwater arsenic contamination in the Red River Plain, Hanoi, Vietnam*, 10 pp.
- [04695] **Dokulil M.T., Jagsch A., George G.D., Anneville O., Jankowski T., Wahl B., Lenhart B., Blenkner T., Teubner K.** (2006): Twenty years of spatially coherent deepwater warming in lakes across Europe related to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography* 51, 2787–2793.
- [04696] **Diener S.** (2006): Eine Fliege als ökologischer Ingenieur. *Kompostforum Schweiz* 3 S.
- [04697] **Simons J., Lienert J., Clemens J.** (2006): Phosphorous-availability from substrates of conventional and non-conventional waste water treatment systems. *IWA (International Water Association) World Water Congress*, Beijing, China, 2 pp.
- [04698] **Barbante C. et al.** (2006): One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature* 444, 195–198.
- [04699] **Canonica S., Hellrung B., Müller P., Wirz J.** (2006): Aqueous oxidation of phenylurea herbicides by triplet aromatic ketones. *Environmental Science & Technology* 40, 6636–6641.

- [04700] **Gujer W.** (2006): Activated sludge modeling: past, present and future. *Water Science and Technology* 53 (3), 111–119.
- [04701] **Hug T., Gujer W., Siegrist H.** (2006): Modelling seasonal dynamics of «*Microthrix parvicella*». *Water Science and Technology* 54 (1), 189–198.
- [04702] **Reinhardt M., Müller B., Gächter R.** (2006): Retentionsweiher. Ein Beitrag zur Sanierung der Mittellandseen. *gwa* 86, 647–654.
- [04703] **Gianella S., Gujer W.** (2006): Improving the information governance of public utilities through an organizational knowledge base. The first world congress on engineering asset management (WCEAM), Gold Coast, Queensland, Australia, 12 pp.
- [04704] **Udert K.M., Lienert J., Larsen T.A.** (2006): Novaquatis – Neue Wege in der Siedlungswasserwirtschaft. *Gewässerschutz – Wasser – Abwasser* 204, 19/1–19/14.
- [04705] **Udert K.M., Larsen T.A., Gujer W.** (2006): Fate of major compounds in source-separated urine. *Water Science and Technology* 54 (11–12), 413–420.
- [04706] **Escher B.I., Bramaz N., Richter M., Lienert J.** (2006): Comparative ecotoxicological hazard assessment of beta-blockers and their human metabolites using a mode-of-action-based test battery and a QSAR approach. *Environmental Science & Technology* 40, 7402–7408.
- [04707] **Sharma P., Raina V., Kumari R., Malhotra S., Dogra C., Kumari H., Kohler H.P.E., Buser H.R., Holliger C., Lal R.** (2006): Haloalkane dehalogenase LinB is responsible for beta- and delta-hexachlorocyclohexane transformation in *Sphingobium indicum* B90A. *Applied and Environmental Microbiology* 72, 5720–5727.
- [04708] **Geueke B., Heck T., Limbach M., V.N., Seebach D., Kohler H.P.E.** (2006): Bacterial beta-peptidyl aminopeptidases with unique substrate specificities for beta-oligopeptides and mixed beta, alpha-oligopeptides. *Febs Journal* 273, 5261–5272.
- [04709] **Giger W., Schaffner C., Kohler H.P.E.** (2006): Benzotriazole and tolyltriazole as aquatic contaminants. 1. Input and occurrence in rivers and lakes. *Environmental Science & Technology* 40, 7186–7192.
- [04710] **Yildirim S., Ruinatscha R., Gross R., Wohlgenuth R., Kohler H.P.E., Witholt B., Schmid A.** (2006): Selective hydrolysis of the nitrile group of cis-dihydrodiols from aromatic nitriles. *Journal of Molecular Catalysis B-Enzymatic* 38, 76–83.
- [04711] **Lienert J., Larsen T.A.** (2006): Novaquatis: Baustein für eine Sanitärtechnologie der Zukunft. In: Lanz K., L. Müller, C. Rentsch, R. Schwarzenbach (Hrsg.), *Wem gehört das Wasser?* Lars Müller Publishers, Baden, Schweiz, 380–381.
- [04712] **Hug S.J., Bahnemann D.** (2006): Infrared spectra of oxalate, malonate and succinate adsorbed on the aqueous surface of rutile, anatase and lepidocrocite measured with in situ ATR-FTIR. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* 150, 208–219.
- [04713] **Ahmed M.F., Ahuja S., Alauddin M., Hug S.J., Lloyd J.R., Pfaff A., Pichler T., Saltikov C., Stute M., van Geen A.** (2006): Ensuring safe drinking water in Bangladesh. *Science* 314, 1687–1688.
- [04714] **Gianella S., Gujer W.** (2006): Modeling critical knowledge for information governance in public wastewater utilities. 7th International Conference on Hydroformatics, Nice, France, 8 pp.
- [04715] **Tockner K., Paetzold A., Karaus U., Claret C., Zettl J.** (2006): Ecology of braided rivers. In: Sambrook Smith G.H., J.L. Best, C. Britton, G.E. Pett (Eds.), *Braided Rivers*, Blackwell Science, Oxford, UK, 339–359.
- [04716] **Trottmann N., Langhans S.D., Tockner K.** (2006): Schwemmgut als Ausbreitungsmedium. Das Innenleben eines unterschätzten Naturstoffs. *Wasser Energie Luft* 98, 153–159.
- [04734] **Rosenfeldt E.J., Linden K.G., Canonica S., von Gunten U.** (2006): Comparison of the efficiency of center dot OH radical formation during ozonation and the advanced oxidation processes O_3/H_2O_2 and UV/H_2O_2 . *Water Research* 40, 3695–3704.
- [04735] **Teodoru C., Dimopoulos A., Wehrli B.** (2006): Biogenic silica accumulation in the sediments of Iron Gate I Reservoir on the Danube River. *Aquatic Sciences* 68, 469–481.
- [04738] **Hartenbach A., Hofstetter T.B., Berg M., Bolotin J., Schwarzenbach R.P.** (2006): Using nitrogen isotope fractionation to assess abiotic reduction of nitroaromatic compounds. *Environmental Science & Technology* 40, 7710–7716.
- [04740] **Edmunds W.M., Ma J., Aeschbach-Hertig W., Kipfer R., Darbyshire D.P.F.** (2006): Groundwater recharge history and hydrogeochemical evolution in the Minqin Basin, North West China. *Applied Geochemistry* 21, 2148–2170.
- [04741] **Werth C.J., Cirpka O.A., Grathwohl P.** (2006): Enhanced mixing and reaction through flow focusing in heterogeneous porous media. *Water Resources Research* 42, W12414.
- [04742] **Lienert J., Thiemann K., Kaufmann-Hayoz R., Larsen T.A.** (2006): Young users accept NoMix toilets – a questionnaire survey on urine source separating toilets in a college in Switzerland. *Water Science and Technology* 54 (11), 403–412.
- [04744] **Jenny A., Fuentes F.H., Mosler H.J.** (2006): Psychological factors determining individual compliance with rules for common pool resource management: the case of a Cuban community sharing a solar energy system. *Human Ecology*, 12 pp.
- [04745] **Altherr A.M., Mosler H.J., Tobias R., Butera F.** (2006): Attitudinal and relational factors predicting the use of solar water disinfection: a field study in Nicaragua. *Health Education & Behavior* XX, 1–14.
- [04746] **Mosler H.J., Brucks W.M.** (2006): Kooperation und Wettbewerb in sozialen Dilemmas. In: Bierhoff H.W., D. Frey (Hrsg.), *Handbuch der Sozialpsychologie und Kommunikationspsychologie* (Handbuch der Psychologie, Band 3), Hogrefe, Göttingen, Deutschland, 677–683.
- [04747] **Jenny A., Díaz López J.R., Mosler H.J.** (2006): Household energy use patterns and social organisation for optimal energy management in a multi-user solar energy system. *Progress in Photovoltaics* 14, 353–362.
- [04748] **Mosler H.J.** (2006): Better be convincing or better be stylish? A theory based multi-agent simulation to explain minority influence in groups via arguments or via peripheral cues. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 9, 18 pp.
- [04750] **Leuz A.K., Mönch H., Johnson C.A.** (2006): Sorption of Sb(III) and Sb(V) to goethite: Influence on Sb(III) oxidation and mobilization. *Environmental Science & Technology* 40, 7277–7282.
- [04751] **Hormes A., Beer J., Schlüchter C.** (2006): A geochronological approach to understanding the role of solar activity on Holocene glacier length variability in the Swiss Alps. *Geografiska Annaler Series A-Physical Geography* 88A, 281–294.
- [04754] **Reinartz R., Bloesch J.** (2006): History and perspectives of «living fossils» (sturgeons) in the Danube River. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie* 29, 1703–1708.
- [04755] **Coops, H., Tockner, K., Amoros, C., Hein, T., Quinn, G.** (2006): Restoring lateral connections between rivers and floodplains: Lesson from rehabilitation projects. In: Anonymous *Ecological Studies*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 15–32.
- [04756] **Kallistova A.Y., Kevbrina M.V., Pimenov N.V., Rusanov I.I., Rogozin D.Y., Wehrli B., Nozhevnikova A.N.** (2006): Sulfate reduction and methanogenesis in the Shira and Shunet meromictic lakes (Khakasia, Russia). *Microbiology* 75, 720–726.

Lettre de la nouvelle directrice



Dr Janet G. Hering, directrice de l'Eawag, professeur de biogéochimie environnementale à l'EPF Zurich

Chers collègues et amis de l'Eawag,

Je suis particulièrement heureuse de pouvoir saisir une occasion de m'adresser à vous aussi tôt dans ma nouvelle fonction de directrice de l'Eawag. Je suis profondément honorée d'avoir été choisie pour ce poste qui représente pour moi une grande chance sur le plan professionnel, mais aussi une immense responsabilité. Je suis cependant certaine de pouvoir l'assumer avec succès grâce notamment au soutien des chercheurs et du personnel de l'Eawag dont l'engagement n'est plus à démontrer.

Il y a maintenant près de vingt ans, j'ai eu l'immense privilège de venir travailler à l'Eawag avec le Professeur Werner Stumm qui en était alors directeur. Sous sa direction, l'Eawag a consolidé sa réputation internationale et s'est établi au rang des meilleurs instituts de recherche au monde dans le domaine des sciences et techniques de l'environnement. La grande importance accordée aux sciences fondamentales était alors la marque de qualité de l'Eawag. Sous la direction de son successeur, le Professeur Alexander Zehnder, la tradition d'excellence a été perpétuée. Les efforts de recherche ont été davantage focalisés sur les sciences et technologies de l'eau tout en s'ouvrant à de nouveaux domaines comme les sciences sociales, et en élargissant les activités internationales, notamment dans les pays en développement. Plus récemment, l'Eawag a grandement profité de la direction de Ueli Bundi qui a contribué à une meilleure définition des activités de recherche en introduisant les champs d'action, aussi bien perceptibles à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'Eawag. Un autre fait marquant de son directorat a été la construction et l'inau-

guration du Forum Chriesbach qui entrera dans les annales de l'histoire de l'architecture écologique.

Il me revient maintenant de relever le défi à la tête de l'Eawag. Grâce aux talents de son personnel, je souhaite faire de l'Eawag l'institut le plus avancé dans le domaine des sciences et technologies de l'eau au XXI^e siècle. L'augmentation de la croissance démographique et les changements climatiques vont accentuer les problèmes d'approvisionnement en eau potable et accroître les contraintes qui pèsent sur les écosystèmes aquatiques. L'Eawag a un rôle décisif à jouer dans le développement de solutions techniques à ces problèmes et dans l'élaboration de bases scientifiques pour ces développements techniques. En Suisse même, les communautés urbaines sont confrontées à un besoin de renouvellement des infrastructures de traitement de l'eau et d'approvisionnement en eau potable, de même que de traitement et de transport des eaux polluées. Il s'agit là d'une chance à saisir pour mettre en œuvre de nouvelles technologies et de nouveaux paradigmes de gestion des eaux. Certains sujets restent par ailleurs d'actualité comme par exemple la viabilité de la pêche, la réhabilitation des cours d'eau, la protection contre les crues et la qualité des eaux souterraines. Dans tous ces domaines, les changements climatiques risquent d'avoir des effets significatifs dont il sera nécessaire de s'occuper.

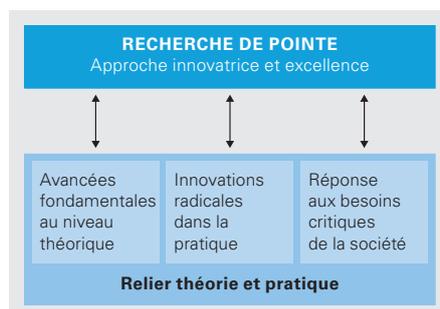
L'Eawag est tout désigné pour relever ces défis car il dispose de quatre

grands atouts dans une combinaison unique au monde. Tout d'abord, sa recherche est clairement axée sur les sciences et technologies de l'eau. Ensuite, il dispose d'une infrastructure humaine exceptionnelle, c'est-à-dire d'un personnel formé de chercheurs et ingénieurs hautement qualifiés, de techniciens et techniciennes particulièrement compétents et d'un personnel administratif des plus dévoués. Troisièmement, l'Eawag dispose d'un équipement technique et analytique de classe internationale. Enfin, il bénéficie d'un grand soutien de la part du gouvernement et de la population suisses, ce qui lui permet d'avancer dans de nouvelles voies et de concentrer ses activités sur l'innovation en recherche fondamentale et sur l'introduction de concepts novateurs (et même parfois radicaux) dans la recherche appliquée. Cette confiance permet à l'Eawag de remplir un rôle social particulier en jetant des ponts entre théorie et pratique et en assurant la participation des parties prenantes dans la conception et la mise en œuvre de projets appliqués.

Dans les mois qui viennent, j'espère pouvoir convier les chercheurs et ingénieurs de l'Eawag à une large discussion sur les principaux défis que les sociétés humaines auront à relever à l'avenir dans le domaine des eaux, et sur le rôle que devra jouer l'Eawag dans ce contexte. Je souhaite voir l'Eawag focaliser ses énergies sur une recherche de pointe, c'est-à-dire une recherche de base visant des progrès fondamentaux au niveau théorique et une recherche appliquée initiatrice d'innovations radicales et orientée vers les besoins aigus de la société (voir figure). Je suis heureuse de voir cette lettre paraître dans un numéro des Eawag news consacré à l'un des exemples les plus brillants de la recherche appliquée de l'Eawag, la technologie NoMix.

Je nous souhaite à tous beaucoup de succès dans les entreprises de l'Eawag,

Principes de recherche définis pour l'Eawag.



Notes

Une politique énergétique engagée

L'Eawag renforce dans ses propres locaux son engagement pour le respect de l'environnement et des ressources naturelles: les besoins en électricité et en chauffage vont progressivement être couverts par des énergies renouvelables et des systèmes respectueux de l'environnement. En plus de développer son installation photovoltaïque, l'Eawag prévoit d'ici 2010 de

consacrer la totalité de ses achats d'électricité à des produits d'éco-électricité certifiés «naturemade star». Ce label a été co-élaboré dans le cadre du projet transversal «Eco-courant» de l'Eawag. En outre, l'Eawag compte dès à présent veiller à la neutralité carbone de ses besoins en mobilité par le biais notamment de versements de compensation du CO₂. ○ ○ ○

De nombreux prix pour le Forum Chriesbach

En plus du Prix solaire suisse et du Prix de l'innovation Swisspor, le nouveau bâtiment de l'Eawag vient de se voir attribuer deux nouvelles distinctions. Le 8 janvier dernier, l'architecte Bob Gysin et Ueli Bundi se sont vus remettre le Prix Watt d'or 2007 au nom de l'Eawag. L'Office fédéral de l'Energie honore de ce prix les meilleures performances réalisées dans le domaine de l'énergie.

Fin janvier, le bureau d'architectes Bob Gysin + Partner a été récompensé du Daylight-Award 2007 doté de 100000 francs.

A travers ce prix, la fondation Velux distingue les réalisations architecturales présentant des solutions innovantes, durables et écologiques pour l'utilisation de la lumière du jour. Dans le Forum Chriesbach, le couplage de l'utilisation de la lumière du jour et de l'approvisionnement énergétique du bâtiment a été particulièrement apprécié. Les trois quarts de la récompense doivent être réinvestis dans la promotion de l'utilisation de la lumière du jour.

www.forumchriesbach.eawag.ch ○ ○ ○

IWMF: un nouveau workshop de l'Eawag

L'IWMF (International Water Management Forum) est une nouvelle manifestation créée par l'Eawag sous la forme d'une plateforme de rencontre à l'intention des décideurs de tous les domaines touchant à la gestion de l'eau. Elle vise à favoriser les échanges entre participants et le transfert des connaissances tout en mettant l'accent sur l'élaboration d'une base constructive pour la planification stratégique et la

gestion du risque. Ce forum est l'occasion d'analyser les influences et les points de décision intervenant dans les processus décisionnels et d'évaluer différentes options envisageables. Un premier IWMF pilote a eu lieu en 2006. L'édition 2007 se tiendra du 4 au 6 septembre et sera consacrée à la prise de décision et au suivi dans les projets de revitalisation des cours d'eau. www.iwmf.eawag.ch ○ ○ ○

Appréciation des cours d'eau



Eva Schager, Eawag

160 spécialistes des eaux se sont retrouvés le 25 janvier à Berne pour discuter et s'informer de l'état d'avancement du Système modulaire gradué d'appréciation des cours d'eau. Le symposium était organisé par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), l'Eawag et la Conférence des chefs des services de protection de l'environnement (CCE/KVU). Le Système modulaire gradué prévoit l'élaboration de méthodes standardisées dans les domaines de l'hydromorphologie, de la biologie,

Agenda

Peak: cours pour la pratique

12/13 Mars

Eawag Dübendorf

Das Integrative Flussrevitalisierungsmodell IFRM – ein neues Werkzeug für die Praxis der Fließgewässer-Revitalisierung

14–16 Mars

Eawag Dübendorf

Ökotoxikologiekurs Hauptmodul R: Risiko-Abschätzung

28–30 Mars

Fische in Schweizer Gewässern

25–27 Avril

Cemagref Lyon

Cours d'écotoxicologie Module E: Evaluation des polluants

18–21 Septembre

Household centred concepts and technologies for water and environmental sanitation in developing countries

23/24 Octobre

Eawag Dübendorf

Der Einfluss des Materials und der Konstruktion von Dächern und Fassaden auf die Wasserqualität

Congrès

16 Mars

Eawag Dübendorf

Development of a European research area: promoting collaboration with the European Commission's Joint Research Centre and Switzerland

Conférences

23 Mars – 29 Juin, chaque vendredi à 11 heures

Eawag Dübendorf

Linking science and water management

Voir: www.eawag.ch/veranstaltungen

de la chimie et de l'écotoxicologie pour une évaluation intégrale de l'état des cours d'eau. Le colloque visait également à favoriser les échanges d'expérience. Le projet s'achèvera fin 2008. D'ici là, il importe non seulement de parfaire les développements méthodologiques mais aussi et surtout d'unifier les modes d'application des méthodes et de coordonner à l'échelle nationale le traitement et l'exploitation des données recueillies.

www.modul-stufen-konzept.ch ○ ○ ○