

Eaux souterraines arsenicales: une catastrophe pour le Bangladesh

Le Bangladesh est confronté à l'intoxication généralisée la plus grave que l'humanité ait jamais connue. En effet, près d'un tiers des 125 millions d'habitants que compte ce pays sont en train d'être insidieusement empoisonnés par l'eau arsenicale qu'ils consomment. Les conséquences d'une intoxication à l'arsenic sont diverses: altération de la pigmentation épidermique, ulcères, voire cancer de la peau, des poumons et de l'intestin. Des dizaines de milliers d'habitants ont déjà été atteints. Les experts du Bangladesh et de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) supposent que près de 20 millions d'habitants ont déjà été intoxiqués plus ou moins gravement. Si on n'arrive pas à fournir rapidement de l'eau potable exempt d'arsenic, cette intoxication pourrait devenir à brève échéance la première cause de mortalité au Bangladesh. Les scientifiques de l'EAWAG sont en train de développer un procédé d'épuration simple, faisant appel aux rayons solaires et permettant d'éliminer l'arsenic présent dans l'eau potable (SORAS).

Au Bangladesh, 90 pour cent de la population consomment de l'eau potable provenant des nappes phréatiques. Auparavant, l'eau potable était captée dans les divers cours d'eau du pays, ce qui provoquait de manière itérative de graves épidémies de dysenterie et de choléra. Depuis trente ans environ, le Bangladesh recourt de manière de plus en plus généralisée aux ressources d'eau souterraine pour couvrir ses besoins en eau potable. Il suffit en fait d'une journée et de quelques travailleurs pour enfoncer à la main un tuyau d'acier à travers la couche sédimentaire, relativement tendre et peu épaisse (5 à 50 mètres selon les cas), et d'équiper les puits ainsi construits de pompes manuelles. Dans le cadre de la «Décennie internationale de l'eau potable» (1980–1990), programme soutenu par l'OMS et l'UNICEF, près de trois millions de captages d'eau souterraine ont été forcés dans tout le Bangladesh. En conséquence, les épidémies de dysenterie et de choléra sont devenues beaucoup moins fréquentes. Ce succès est toutefois annihilé par le problème de l'arsenic. Les premiers cas d'empoisonnement ont été constatés en 1987–1992 déjà, au nord-ouest du pays. Il a fallu toutefois attendre jusqu'en 1998 pour que le problème de l'arsenic soit officiellement reconnu, sous la pression de diverses

organisations et après une conférence internationale à Dhaka.

L'arsenic, un problème mondial

Nombreuses sont les régions dont les eaux souterraines et, partant, l'eau potable sont polluées par l'arsenic à dose élevée (cf. fig. 1). Dans certains cas, cette pollution résulte d'activités humaines (mines, fongi-

cides, pesticides, produits xyloprotecteurs, etc.). Mais en général, elle est due à l'arsenic géogène. A la faveur de divers processus biogéochimiques, celui-ci peut se dissoudre dans l'eau sédimentaire et parvient ainsi dans les aquifères, les sources et les cours d'eau. Dans le Pacifique, la teneur en arsenic atteint 1,5 µg/l. Dans les lacs et les cours d'eau, la concentration d'arsenic peut varier entre moins de 1 µg/l et plusieurs milliers de µg/l. Pour l'être humain, la dose d'arsénite est mortelle à partir de 150–300 milligrammes. Il est plus difficile de définir la toxicité chronique en cas d'ingestion quotidienne par l'alimentation et l'eau. Cette toxicité dépend de nombreux facteurs, dont le régime alimentaire, l'état de la santé publique, l'âge, le sexe et le bagage génétique.

Dans la plupart des pays, dont la Suisse, la valeur limite actuellement admise pour l'arsenic dans l'eau potable a été fixée à 50 µg/l. Cette valeur est toutefois dépassée dans de nombreuses régions du monde. Se fondant sur de nouvelles études épidémiologiques, l'OMS recommande de réduire la valeur guide à 10 µg/l. En consé-

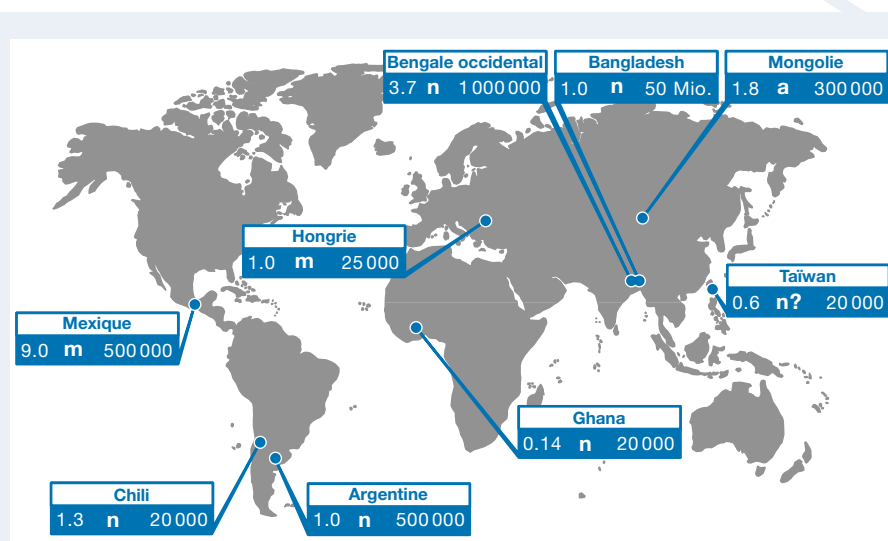


Fig. 1
Le problème de l'arsenic dans le monde.
Dans la fenêtre de chaque région, on lit de gauche à droite: la concentration maximale d'arsenic mesurée en mg/l, la source d'arsenic (n = naturel, m = exploitation des minerais, a = agriculture), le nombre d'habitants concernés.

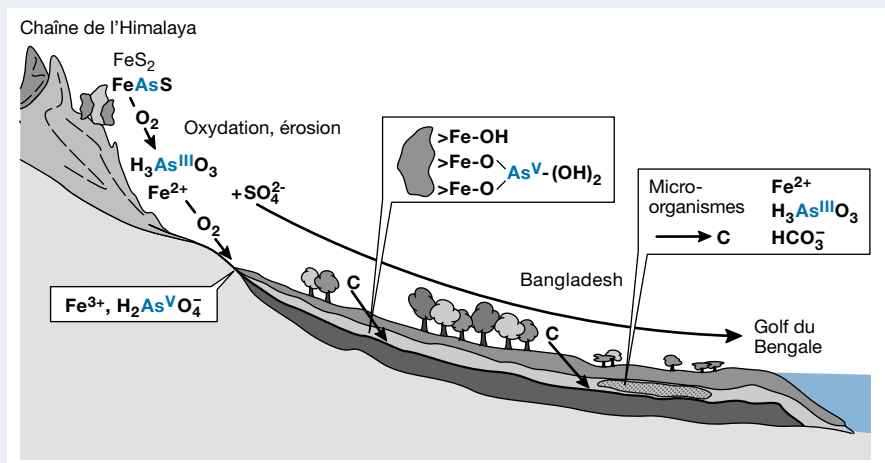


Fig. 2 Représentation schématique des sources d'arsenic naturelles et de la répartition de l'arsenic au Bangladesh.

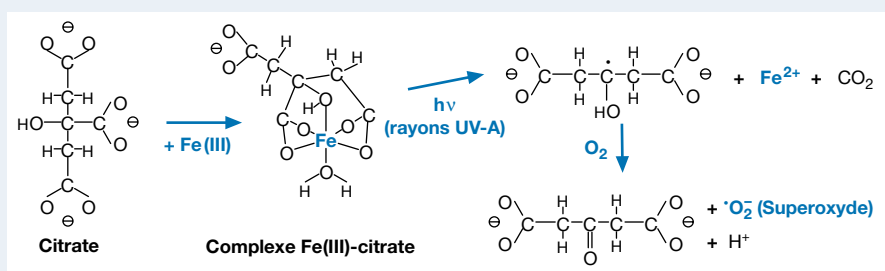


Fig. 3 Production photochimique des espèces oxydantes (superoxyde) avec absorption des rayons UV-A par les complexes de Fe(III).

quence, de nombreuses régions doivent être considérées comme problématiques. En Suisse, p. ex. à Astano (TI), en Alsace et dans bien d'autres régions d'Europe, les concentrations d'arsenic atteignent entre 10 et 50 µg/l. En l'état des connaissances actuelles, l'arsenic doit être considéré comme l'une des contaminations les plus problématiques de l'eau potable.

En milieu aquatique, l'arsenic présente deux stades d'oxydation:

- As(III), principalement sous forme d'arsénite (H_3AsO_3 jusqu'à pH 7)
- As(V), sous forme d'arséniate ($H_2AsO_4^-/HAsO_4^{2-}$ à pH 7).

Outre ces deux stades d'oxydation, il existe toute une série de composés arsenicaux qui se forment sous l'effet des activités microbiennes, ainsi que dans le métabolisme humain et animal.

Les réactions chimiques et les propriétés qui caractérisent les divers composés arsenicaux déterminent aussi bien le transport et la distribution de l'arsenic dans l'environnement que les mesures visant à réduire la teneur en arsenic dans l'eau potable. La fig. 2 illustre l'hypothèse aujourd'hui généralement admise concernant les processus de transport et d'érosion qui, depuis la dernière glaciation, ont entraîné l'arsenic dans les eaux souterraines du Bangladesh.

Les minerais arsenicaux tels que l'arsenico-pyrite ($FeAsS$) de l'Himalaya sont la première source d'arsenic. Ils s'oxydent au contact de l'air ou d'eau oxygénée et libèrent As(III), Fe(II) et du sulfate. En présence d'oxygène et d'un pH neutre, Fe(II) est oxydé en Fe(III) et est précipité sous forme d'oxyde et d'hydroxyde de fer(III). En quelques jours, As(III) est oxydé en As(V). $H_2AsO_4^-/HAsO_4^{2-}$ est ensuite adsorbé par les oxydes et hydroxydes de fer(III) et est stocké dans les sédiments, tandis que le sulfate est lessivé. L'As(V) lié aux oxydes et hydroxydes de fer est pratiquement insoluble et ne représente aucun risque pour l'eau. Par ailleurs, de grandes quantités de matières organiques se sont accumulées dans la plaine alluviale du Bangladesh et servent de nutriment aux microorganismes. Après consommation de l'oxygène, les microorganismes réduisent les oxydes et hydroxydes de fer(III), libérant ainsi Fe(II) et l'As(V) lié, ce dernier étant à son tour réduit en As(III). Ces processus permettent d'expliquer la composition chimique des eaux souterraines: en milieu anoxygène, 200–400 mg/l HCO_3^- , 0–20 mg/l Fe(II), 0–2000 µg/l As(III) et As(V), moins de 3 mg/l de sulfate. Dans la plupart des cas, il existe une corrélation entre la teneur en fer et la teneur en arsenic.

Élimination de l'arsenic

Pour éliminer l'arsenic, il faut en quelque sorte inverser le processus de dégradation des oxydes et hydroxydes de fer. Dans les installations techniques, As(III) est oxydé en As(V) par réaction avec le chlore, l'hypochlorite, l'ozone ou autre agent oxydant. Des sels de Fe(II), Fe(III) ou Al(III) sont en outre ajoutés comme floculants. As(V) est adsorbé par les hydroxydes de Fe(III) ou d'Al(III) en cours de leur formation avec lesquels, après précipitation, il est éliminé.

Dans les pays industrialisés, il est possible de réduire ainsi la teneur en arsenic à 10 µg/l et d'exclure de ce fait tout risque pour la santé. Pour des raisons à la fois financières et structurelles (distribution d'eau totalement décentralisée), il n'est pas possible d'envisager la construction d'installations industrielles au Bangladesh. Ce qu'il faut ici, ce sont des technologies permettant aux petites communautés et aux villages de se tirer d'affaire par eux-mêmes, en investissant le moins possible.

La plupart des puits contaminés par l'arsenic ont une teneur suffisante en fer pour permettre l'oxydation quasi complète de As(III), suivie d'une floculation des oxydes et hydroxydes de fer auxquels l'arsenic est adsorbé, et d'une filtration ou d'une décantation éliminant définitivement l'arsenic de l'eau potable.

L'action purifiante des rayons solaires

Il y a quelques années, un groupe de chercheurs australiens a breveté un procédé d'oxydation photochimique de As(III) pour remédier au problème des eaux usées extrêmement acides résultant de l'extraction des minerais. Ce procédé n'est toutefois pas adapté à la situation du Bangladesh, dont les eaux souterraines ont un pH 7. Mais on sait qu'il existe des ligands organiques, avant tout des acides polycarboxyliques, qui forment des complexes photoactifs avec Fe(III). Dans le cadre d'une étude précédente de l'EAWAG, consacrée à la réduction photochimique du chrome(VI), très toxique, en Cr(III), beaucoup moins toxique, le citrate, qui se trouve à l'état naturel dans bon nombre de fruits, s'est révélé très actif même en présence d'un pH 7. La formation des complexes Fe(III)-citrate et la production photochimique d'oxydants très actifs tels que le superoxyde (O_2^-) sont représentées à la fig. 3.

Voici une année, un petit groupe de chimistes et d'ingénieurs de l'EAWAG a commencé de développer une méthode qui permet d'éliminer l'arsenic dissous dans l'eau potable tout en étant adaptée à la situation

du Bangladesh. Leur réflexion s'est largement inspirée du procédé SODIS, servant à la désinfection de l'eau et dont le succès s'est déjà confirmé.

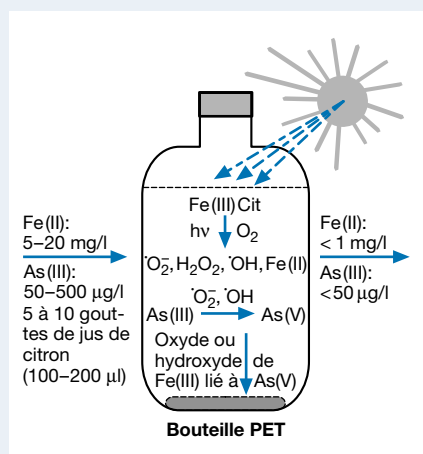


Fig. 4 Photooxydation et élimination de l'arsenic dans des bouteilles PET.

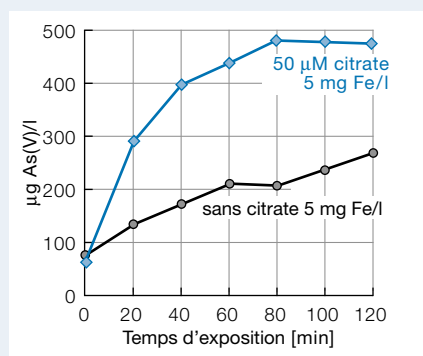


Fig. 5 Accélération de l'oxydation de As(III) par adjonction de citrate, à pH 7.

Dans ce nouveau procédé dit SORAS (Solar Oxidation and Removal of Arsenic) (cf. fig. 4), l'eau est additionnée de citrate ou de jus de citron, puis enfermée dans des bouteilles PET et exposée pendant quelques heures au soleil. Ensuite, les bouteilles sont posées verticalement, par exemple pendant la nuit, afin de permettre la décantation des oxydes et hydroxydes de fer et leur filtration à travers des textiles le jour suivant.

Afin de simuler les conditions prévalant au Bangladesh, nous avons préparé de l'eau souterraine en laboratoire, avec des concentrations connues de Ca, Mg, HCO₃, As, Fe et d'autres substances comme le silicate, le phosphate et le carbone organique dissous. 500 µg/l As(III) et 5 mg/l Fe(II) sont encore ajoutés à cette eau saturée en air pour obtenir une situation similaire aux eaux souterraines anoxiques qui sont saturées en air dès qu'on les secoue pendant une à deux minutes. Après adjonction de 50 µM de citrate ou 3 à 6 gouttes de jus de citron/l, l'eau est enfermée dans des bouteilles PET exposées au rayonnement de lampes UV-A (env. 80 mW/m²). En présence de citrate, on observe que As(III) est rapidement oxydé en As(V) (cf. fig. 5). L'adjonction de citrate a pour autre avantage que Fe(III) flocule rapidement et se décante ainsi plus facilement.

Essai sur le terrain: optimisation nécessaire

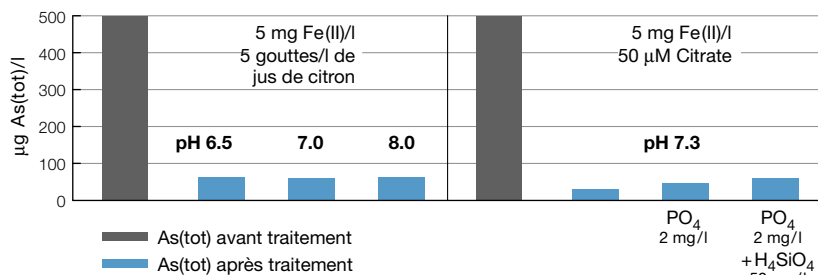
La comparaison entre les essais de laboratoire et les essais pratiques au Bangladesh (fig. 6) met en évidence une très grande dispersion des résultats. Lorsque le pH se

situe entre 6,5 et 8,0, on arrive à éliminer 80 à 90% de l'arsenic en laboratoire. Les résultats obtenus sur le terrain varient considérablement. L'hypothèse selon laquelle le phosphate (0-2 mg/l) et le silicate (jusqu'à 50 mg/l) présents dans les eaux souterraines du Bangladesh pourraient modifier l'élimination de l'arsenic ne s'est pas confirmée en laboratoire. Ni le phosphate, ni le silicate n'ont influencé de manière déterminante la photooxydation. Bien que ces ions soient en concurrence avec l'arséniate pour l'adsorption par les oxydes et hydroxydes de Fe(III), l'élimination de As(V) n'a été que légèrement influencée en présence de 5 mg/l Fe.

Les possibilités d'amélioration du procédé SORAS sont donc les suivantes: adjonction de citrate à un autre moment, obscurcissement avant exposition à la lumière, durée d'exposition, adjonction répétée de citrate, etc. Le nombre élevé de possibilités provient du fait que l'aération et la photoexposition de l'eau souterraine déclenchent de nombreuses réactions tant parallèles que séquentielles. Même sans lumière, Fe(II) met 10 à 60 minutes pour être oxydé en différentes formes de Fe(III) lorsque le pH se situe entre 6,8 et 7,5. Cette réaction se traduit par le brunissement et la turbidification de l'eau (du fait de la formation des oxydes et hydroxydes de fer). La composition de l'eau se modifie continuellement. Autant dans l'obscurité qu'en pleine lumière, les possibilités de réactions d'oxydoréduction sont nombreuses. Si on disposait d'une liste complète des réactions possibles, on pourrait modéliser le système et l'optimiser

suite à la page 25

Élimination de l'arsenic selon le procédé SORAS, test de laboratoire avec de l'eau souterraine de synthèse



Élimination de l'arsenic à l'aide de SORAS au Bangladesh

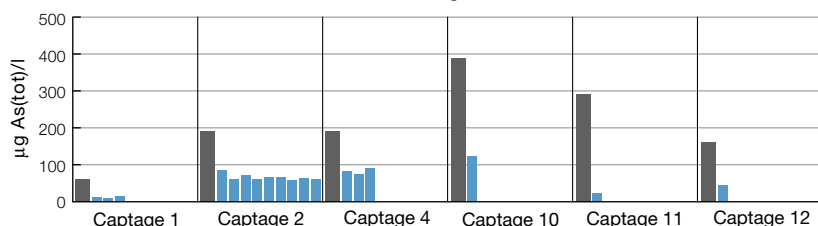


Fig. 6 Taux d'élimination de l'arsenic dans les essais de laboratoire et les essais in situ.



Stephan Hug
Chimiste, depuis 1992 à l'EAWAG, étudie l'influence des processus géochimiques sur la qualité des ressources d'eau.

Coauteurs: Martin Wegelin, Daniel Gechter, Laura Canonica

Pour tout renseignement concernant le problème de l'arsenic au Bangladesh: <http://bicn.com/acic> (West Bengal and Bangladesh arsenic crisis information centre).

- [1] Nickson, R., McArthur, J. Burgess, W., Ahmed, K.M., Ravenscroft, P. and Rahman M. (1998): Arsenic poisoning of Bangladesh ground water, *Nature* 395, 338.
- [2] Hug, S.J., James B.R., and Laubscher H.U. (1997): Iron(III) Catalyzed Photochemical Reduction of Cr(VI) by Oxalate and Citrate in Aqueous Solutions, *Environmental Science and Technology* 31, 160-170.
- [3] Wegelin, M. and Sommer, B. (1998): Solar Water Disinfection (SODIS) - Destined for worldwide use?, *Waterlines* 16, 30-32.

Le «Swiss Transdisciplinary Award» honore une équipe de l'EAWAG

Dirigée par *Bernhard Truffer*, l'équipe du projet «Ecocourant» a reçu le premier «Swiss Transdisciplinary Award». D'un montant total de Fr. 50 000.–, les prix ont été décernés dans le cadre de la Conférence internationale pour la transdisciplinarité à l'EPFZ.

Le jury, mené par la présidente du Conseil de la recherche du Fonds national suisse de la recherche scientifique, l'éminente professeur *Heidi Diggelmann*, a primé des projets illustrant particulièrement bien un aspect de recherche transdisciplinaire. Le projet de l'EAWAG consacré à l'élaboration de critères pour l'écocourant a reçu le prix de Fr. 15 000.– dans la catégorie «Importance sociale». Par ailleurs, tous les membres (actuels et anciens) du groupe Ecocourant ont reçu un diplôme pour leur contribution exceptionnelle à la recherche transdisciplinaire. Deux autres projets d'Allemagne et d'Autriche ont également été primés. Les prix ont été mis à disposition par la Fondation Gerbert Ruef.



suite de la page 20

Eaux souterraines arsenicales: une catastrophe pour le Bangladesh

à l'aide de l'ordinateur. Toutefois, il y a encore trop d'inconnues au niveau des constantes de réaction de sorte que la pertinence de la modélisation demeure limitée pour l'heure.

Technologie adaptée aux circonstances: un potentiel de recherche à exploiter!

Les réactions d'oxydoréduction du fer et du manganèse modifient considérablement la répartition des polluants et, partant, la qualité de l'eau souterraine. Si on connaît les réactions déterminantes, on peut améliorer

la qualité de l'eau en prenant des mesures adéquates avant et après le captage de l'eau potable. En oxygénant les sédiments entourant les puits de captage, on pourrait par exemple réduire la teneur en fer et en manganèse, voire même la teneur en arsenic dans l'eau captée. Les procédés de traitement photochimiques offrent également des perspectives intéressantes pour l'élimination des polluants tant organiques qu'inorganiques et la désinfection de l'eau potable. Le développement de technologies adaptées aux circonstances présuppose une connaissance aussi détaillée des réactions

fondamentales que pour les procédés techniques plus complexes. Alors qu'il faut développer des technologies simples en collaboration avec les pays en voie de développement, l'acquisition des connaissances fondamentales ne va pas sans les laboratoires bien équipés des pays industrialisés. Quoi qu'il en soit, les pays en voie de développement devront tôt ou tard se doter d'installations performantes pour le traitement de l'eau, du moins dans les régions urbaines à forte densité, ce qui n'ira pas sans transfert des connaissances ni sans collaboration avec les pays industrialisés.