

n'a pas reculé. En attendant le déploiement de techniques de dépollution efficaces et applicables à grande échelle, une autre alternative consiste à traiter les eaux de surface qui étaient utilisées avant l'avènement des puits tubés. Ici le traitement est bactériologique, puisque, comme nous l'avons évoqué, ce sont essentiellement les contaminations par des micro-organismes pathogènes qui en empêchent la consommation.

L'agriculture également concernée

Enfin, l'eau de consommation est en cause, mais les pratiques agricoles le sont aussi. Les solutions envisagées visent à réduire l'usage de l'eau souterraine polluée,

notamment grâce à la sélection de variétés cultivées moins consommatrices d'eau. Une étude sur la riziculture au Bangladesh a indiqué que sur les quatre millions d'hectares de terres irriguées, environ 2,4 le sont avec de l'eau des puits tubés. Cette eau est utilisée pour la production de riz Boro durant la saison sèche. Les concentrations en arsenic dans les grains de différentes variétés de riz atteindraient 1,8 ppm (partie par million), alors qu'elle est de 0,1 ppm en Europe ou aux États-Unis. Cette contamination est deux à trois fois plus importante dans les légumes à feuilles, tels les épinards.

En 2001, un rapport de la FAO (*Food and Agriculture Organization*) préconisait plusieurs solutions. La première consiste

à privilégier des cultures exigeant moins d'eau, par exemple à remplacer le riz Boro par du blé ou du maïs (moins consommateurs). Par ailleurs, on peut aussi sélectionner des variétés de riz qui absorbent moins d'arsenic que d'autres.

En outre, il est recommandé de diminuer la culture du riz irrigué au profit du riz cultivé sur sol sec (avec des graines prégermées hors-sol) et de limiter la période d'irrigation, afin de réduire le transfert de l'arsenic, provenant du sol et de l'eau, vers la plante. L'Institut de recherche sur le riz du Bangladesh estime que les agriculteurs pourraient réduire l'eau d'irrigation de 40 pour cent sans perte de rendement. Des tests sont effectués pour connaître la concentration en

LA DOUBLE FACE DE L'ARSENIC ET DU SÉLÉNIUM

Les éléments chimiques présentent souvent un caractère double : à faibles doses, ce sont des oligoéléments nécessaires au bon fonctionnement des organismes. Ils entrent dans la composition de nombreuses protéines et sont indispensables pour qu'elles fonctionnent correctement (par exemple, les protéines dites à doigts de zinc). Ainsi, les carences en oligoéléments, tels le zinc, le sélénium, le fer ou le cuivre, entraînent entre autres des retards de croissance ou une plus grande sensibilité aux infections.

En revanche, beaucoup d'éléments deviennent toxiques à des doses trop élevées. Ainsi, l'homme présente un déficit en sélénium au-dessous de 40 microgrammes par jour, mais sa concentration devient toxique au-delà de 400 microgrammes par jour. Il apparaît alors une sélénose, dont les symptômes sont des troubles gastro-intestinaux, une perte des cheveux, des taches sur les ongles et parfois des atteintes

neurologiques. Les besoins quotidiens de l'homme en arsenic sont compris entre 10 et 20 microgrammes. Au-delà de 100 microgrammes par jour, l'arsenic entraîne des gangrènes des extrémités, des ulcères, des lésions cutanées et des cancers de la peau et des organes.

L'arsenic est toxique à doses élevées, car il entre en compétition dans les réactions biochimiques avec d'autres éléments chimiques, tel le phosphore, dont il prend la place, ce qui perturbe le fonctionnement cellulaire.

La toxicité de l'arsenic dépend également de son degré d'oxydation ; on parle alors de spéciation. À l'état naturel, il se trouve sous forme inorganique (dans les minéraux) ou sous forme organique (dans les organismes vivants). L'arsenic peut adopter quatre degrés d'oxydation : (-3), (0), (+3), (+5), dont les plus fréquents dans l'environnement correspondent à l'arséniate As(V) (degré d'oxydation +5) et à l'arsénite As(III) (degré d'oxyda-



LES TACHES NOIRES sur les mains : un signe d'intoxication à l'arsenic.

tion +3). L'arsenic inorganique réduit As(III) est plus toxique que la forme inorganique oxydée As(V). Les effets diffèrent selon le degré d'oxydation. Par exemple, la forme oxydée As(V) se substitue au phosphore dans le phosphate de l'ATP, l'adénosine triphosphate, l'énergie des cellules. Cela perturbe les réactions de la « respiration cellulaire ». L'arsenic réduit As(III) forme des complexes avec de nombreuses enzymes telle la lipoamide, cofacteur nécessaire à la conversion du pyruvate en acétyl-coenzyme A (voir le tableau ci-contre).

Le sélénium se présente également sous différentes formes et degrés d'oxydation dans l'environnement. Sous forme métallique, il est nécessaire en infime concentration, car il participe au métabolisme du glutathion, le principal anti-

oxydant cellulaire. Ses formes composées, tels la sélénite de sodium (Na_2SeO_3) et le séléniate de sodium ($\text{Na}_2\text{O}_4\text{Se}$), sont plus solubles que la forme métallique et ainsi plus toxiques. Le sélénium interfère avec le métabolisme de certaines enzymes de la respiration cellulaire, ce qui expliquerait sa toxicité.

À mesure que les connaissances sur la toxicité de ces éléments progressent, les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé sont mises à jour, indiquant les doses minimales et maximales à respecter pour la consommation. Toutefois, les directives concernant les apports quotidiens recommandés varient suivant les pays, notamment pour ceux dont les habitants sont naturellement exposés à des concentrations élevées à cause de l'eau qu'ils consomment.

Composé	Formule	Spéciation	Toxicité	Effets
Arsénite	H_3AsO_3 AsO_2^-	Degré d'oxydation III	+++	Inhibition de certaines enzymes
Arséniate	H_3AsO_4 HAsO_4^{2-} H_2AsO_4^- AsO_4^{3-}	Degré d'oxydation V	++	Perturbation de la synthèse de l'ATP Inhibition de la glycolyse

LES TECHNIQUES D'ÉLIMINATION DE L'ARSENIC

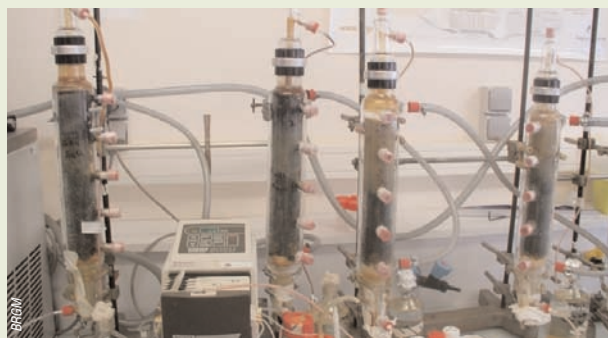
Il existe aujourd'hui une cinquantaine de méthodes pour éliminer l'arsenic de l'eau. Mises au point en laboratoire, certaines sont utilisées par l'industrie. Cependant, la plupart restent inapplicables dans les pays en développement. Les différents procédés sont fondés sur l'inversion des réactions naturelles qui ont entraîné la solubilisation d'un polluant dans les eaux souterraines. Ils reposent sur quatre types de réactions : adsorption, précipitation, floculation (formation de « flocons » accélérant la sédimentation des particules de matière) et oxydo-réduction.

Dans le premier type de réaction, l'arsenic s'adsorbe à la surface du fer et forme un complexe. Dans la réaction de précipitation, l'arsenic est incorporé dans un solide, comme c'est le cas du réalgar As_4S_4 ou certains sulfures et disulfures de fer. C'est également le cas de la floculation, mais les particules solides sont petites. Enfin, les réactions d'oxydation convertissent l'arsenic dont le degré d'oxydation est égal à trois en arsenic dont le degré d'oxydation est égal à cinq, qui s'adsorbe mieux. L'oxydation est soit chimique (par exemple

par le peroxyde d'oxygène ou la limaille de fer), soit photochimique. Dans ce dernier cas, le procédé SORAS (*Solar Oxidation and Removal of Arsenic*) a été développé par des chimistes et ingénieurs de l'Institut EAWAG et testé dans les pays en développement, dont le Bangladesh.

En laboratoire, on ajoute aux eaux à traiter de l'acide citrique (ou jus de citron) et de la limaille de fer, on les place dans des bouteilles en polyéthylène téréphtalate (PET), que l'on expose pendant quelques heures au soleil. L'arsenic dissous se fixe sur des oxydes de fer, qui sont filtrés le jour suivant. Des essais de terrain au Bangladesh sont en cours pour tenter d'adapter le processus aux conditions physico-chimiques de l'eau extraite des puits.

Une autre technique consiste à modifier les conditions physico-chimiques de l'aquifère *in situ* pour oxyder, puis piéger les polluants contenus dans l'eau. Dans ce cas, on injecte de l'oxygène directement dans l'aquifère. Cette méthode est efficace dans la région de Hanoï (au Vietnam), car les eaux souterraines sont riches en fer dissous. Au



EXPÉRIENCES DE BIOREMÉDIATION sur des colonnes de sols dans lesquelles circule une eau polluée en As en présence de particules de Fer et de bactéries qui vont accélérer le processus de dépollution

contact de l'air, le fer s'oxyde en formant des précipités de rouille sur lesquels l'arsenic s'adsorbe. Ces précipités sont ensuite éliminés en surface par un filtre à sable. Des études en laboratoire et sur le terrain ont été réalisées au Bangladesh, au Salvador, en Grèce et en Roumanie pour optimiser le fonctionnement de ces filtres.

Quant aux équipes du projet européen AQUATRAN, elles mettent au point des techniques de dépollution des eaux, testées dans les laboratoires du Bureau de recherches géologiques et minières en France, le BRGM. Parmi elles, des techni-

ques de bioremediation consistant à traiter l'eau polluée par des particules de fer en présence de bactéries réductrices. Ces dernières dégradent les composés arsénisés (voir l'illustration ci-dessus).

Enfin, une technique de piégeage après extraction, qui consiste à faire circuler l'eau dans des colonnes contenant des agrégats nanométriques d'aluminium, ou des oxydes de manganèse pour retenir les polluants, a été récemment mise au point en laboratoire, puis testée sur le terrain en Roumanie et Hongrie. Ce procédé est efficace, mais très coûteux.

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. Fendorf *et al.*, **Spatial and temporal variations of groundwater arsenic in South and Southeast Asia**, *Science*, vol. 328, pp. 1123-1127, 2010.

D. Polya et L. Charlet, **Rising arsenic risk ?**, *Nature Geoscience*, vol. 2, pp. 383-384, 2009.

L. Winkel *et al.*, **Predicting groundwater arsenic contamination in Southeast Asia from surface parameters**, *Nature Geoscience*, vol. 1, pp. 536-542, 2008.

L. Charlet et D. Polya, **Arsenic in shallow, reducing groundwaters in Southern Asia : An environmental health disaster**, *Elements*, vol. 2, pp. 91-96, 2006.

✓ SUR LE WEB

<http://www.eawag.ch/index>

<http://www.aquatrain.eu/>

polluants dans le riz, mais aussi dans les autres céréales et les légumes cultivés dans les pays concernés.

Devant l'ampleur du problème au Bangladesh, le gouvernement a tenté de trouver des solutions. L'OMS, et l'UNICEF ont soutenu un projet de réduction des concentrations d'arsenic dans l'eau et d'approvisionnement en eau potable. Lancé en 1998, ce projet bénéficia d'un prêt de la Banque mondiale de 32,5 millions de dollars. En outre, les organisations non gouvernementales participent à des campagnes de sensibilisation des populations et à des projets pilotes. Ainsi, l'Institut suisse EAWAG commence à développer une méthode d'élimination de l'arsenic adaptée aux conditions physico-chimiques de l'eau au Bangladesh et au Vietnam, et celle plus prometteuse d'élimination de l'arsenic par photo-oxydation. En Europe, des recherches ont débuté avec le projet AQUATRAN, visant notamment à faire un inventaire des

zones polluées en Hongrie et en Roumanie, et à tester sur le terrain des solutions de dépollution adaptées.

Par ces différents projets européens ou mondiaux, les chercheurs s'associent pour mieux caractériser les pollutions des eaux souterraines en fonction de la géologie et des activités humaines locales. Toutefois, près de 20 ans après la révélation de la crise au Bangladesh, aucune solution à la mesure du problème n'a été mise en place. La première difficulté est scientifique, car s'il existe des techniques performantes en laboratoire, rares sont celles qui s'appliquent à grande échelle. S'ajoutent à cela les incontournables verrous financiers. Face à l'urgence, l'une des solutions serait sans doute d'abandonner les puits tubés pour revenir à l'exploitation des eaux de surface, qui nécessiteraient certes d'être traitées, mais avec des méthodes qui ont fait leurs preuves. Il ne resterait plus qu'à trouver les fonds et à convaincre les autorités locales...