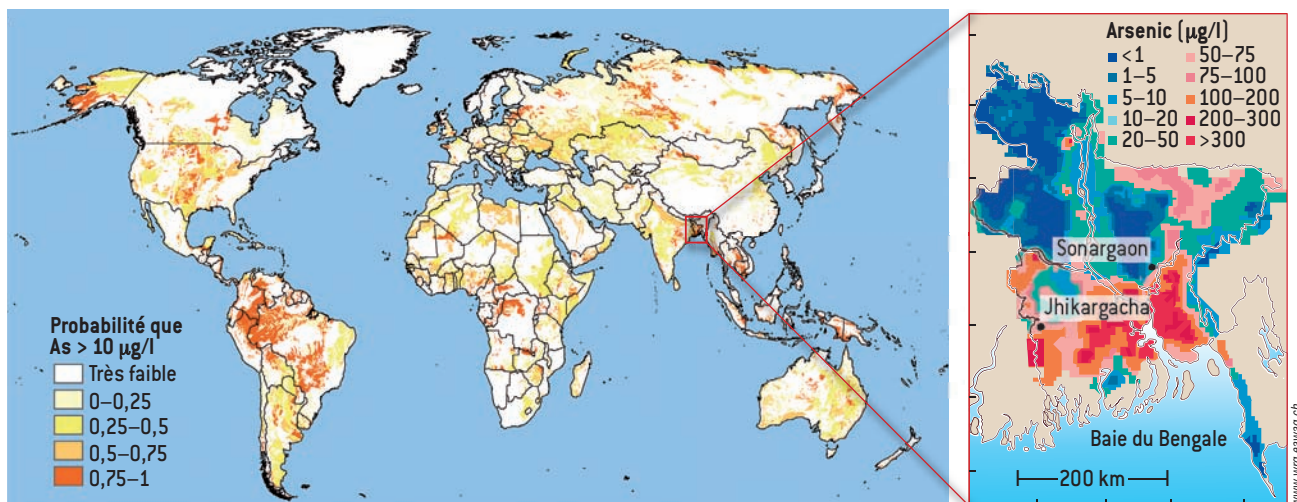




3. SI L'ARSENIC EST TOXIQUE POUR LES POPULATIONS du Bangladesh, c'est aussi le cas dans d'autres régions du monde où l'eau est impropre à la consommation. Au Bangladesh (à droite), la concentration peut atteindre 300 microgrammes par litre. Selon l'Organisation mondiale de

la santé, cette concentration ne devrait pas dépasser dix microgrammes par litre. Les zones les plus menacées sont le Nord de l'Amérique du Sud, certaines régions d'Europe centrale, de Sibérie ou d'Afrique où la concentration peut atteindre 100 microgrammes par litre (à gauche).

à Dübendorff, ont établi des cartes du risque lié à la teneur en arsenic des eaux souterraines, en admettant qu'elle est supérieure à la norme de potabilité au Cambodge, au Bangladesh et au Vietnam. Les modèles de prédiction intègrent la topographie, la nature des sols, la porosité, la teneur en matière organique et le renouvellement de l'eau dans les aquifères.

Les cartes de risques ainsi obtenues indiquent la probabilité que ces éléments (arsenic, fluor, sélénium...) soient présents à des concentrations potentiellement dangereuses pour la santé dans les eaux souterraines de ces différentes régions (voir la figure 3). Toutefois, leur résolution spatiale est limitée et des contrôles de qualité doivent être réalisés dans les zones à risques pour mesurer les concentrations réelles.

En Europe, de 2007 à 2010, des géologues et des géochimistes de 15 universités, instituts et organismes de recherche ont conduit le projet AQUATRIN. Doté d'un budget de plus de trois millions d'euros, ce projet coordonné par l'Université de Manchester, en Grande-Bretagne, visait à élaborer des méthodes d'analyse et de modélisation des polluants naturels, à identifier les zones à risques et à proposer des recommandations aux responsables sanitaires et politiques. Un autre objectif de ce projet consistait à développer des techniques de dépollution (voir l'encadré page 82).

Comment définir une stratégie efficace de dépollution d'un site contaminé ? Il faut tenir compte, d'une part, de l'intensité



4. LES PUIITS DE FORAGE évitent que l'on ne prélève l'eau de surface, souvent contaminée par des bactéries et donc vectrice de maladies infectieuses. Mais les eaux profondes sont particulièrement chargées en arsenic au Bangladesh, où a été prise cette photographie.

de la pollution de la ressource en eau et, d'autre part, de l'état sanitaire et du niveau socio-économique des populations exposées. Au Bangladesh, où la distribution de l'eau n'est pas centralisée, il s'agit de mettre en place des techniques efficaces à court terme, facilement applicables au quotidien par la population. Les techniques actuelles reposent sur des traitements de l'eau contaminée soit en profondeur, soit en surface après pompage de l'eau.

Les techniques de dépollution

Plusieurs de ces techniques de dépollution reposent sur la forte affinité du fer pour l'arsenic. Ainsi, dans l'un des dispositifs portables permettant de filtrer l'eau des puits tubés, l'eau contaminée traverse une couche de copeaux de fer (limaille ou clous) qui piège l'arsenic, puis une couche de charbon et de sable, qui retient les particules de fer ayant réagi avec l'arsenic. Le filtrat est débarrassé des copeaux de fer et de l'arsenic, qui a réagi avec le fer. L'inconvénient de cette technique est qu'elle engendre des déchets arséniés et que les filtres doivent être renouvelés fréquemment. Ces filtres ont été testés dans certains villages au Bangladesh, mais sont insuffisants pour couvrir les besoins de l'ensemble de la population.

Aujourd'hui, malgré les efforts des organisations non gouvernementales locales qui, depuis une dizaine d'années, cherchent à mettre en place des solutions, le problème

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_2AsO_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