

laquelle ils se trouvent dans l'environnement (voir l'encadré page 81). Par exemple, le riz accumule une grande partie de l'arsenic sous forme organique, beaucoup moins toxique que les formes inorganiques présentes dans l'eau. Selon la forme, la toxicité peut être aiguë ou chronique.

Pourquoi le Bangladesh semble-t-il être l'un des pays les plus touchés ? En raison de la géologie et de la topographie des fleuves et des rivières de la région. Le Bangladesh correspond au bassin sédimentaire de l'Himalaya et forme un large delta, où une cinquantaine de fleuves (dont le Gange et le Brahmapoutre) s'écoulent avant de se jeter dans le golfe du Bengale. Issu de la collision de l'Inde et de l'Asie, l'Himalaya est la chaîne de montagnes la plus importante au monde. Les fleuves prenant leur source dans l'Himalaya participent à l'érosion de la chaîne. Ces phénomènes d'érosion, actifs depuis environ 70 millions d'années, ont accumulé dans les plaines de grandes quantités de sédiments arrachés aux roches himalayennes : une couche sédimentaire épaisse de trois à quatre kilomètres forme le sous-sol du pays. Au cours de ce processus, l'arsenic s'est dissous dans l'eau et concentré dans les nappes phréatiques du delta.

Le cas de l'Himalaya

Les éléments géogéniques, tels l'arsenic, le sélénium et le fluor, entrent dans la composition de nombreux minéraux présents dans la croûte terrestre. Les principaux minerais contenant de l'arsenic sont l'arsénopyrite (FeAsS), l'orpiment (As_2S_3) et le réalgar (AsS), où As est l'arsenic, Fe le fer et S le soufre. Lors de la formation des chaînes de montagnes, ces roches issues des profondeurs de la Terre affleurent à la surface. Elles sont alors soumises à l'érosion par la pluie, les glaciers, les fleuves et les vents.

Les eaux de ruissellement s'enrichissent en ces éléments sous forme de très fines particules, et alimentent les rivières ou s'infiltrent dans le sol jusqu'aux réserves souterraines, les nappes phréatiques. D'autres processus géologiques, tels que les éruptions volcaniques et la circulation d'eau chaude en profondeur, entraînent, à l'échelle des temps géologiques, une remontée de ces éléments naturels en surface. Ils s'accumulent ensuite dans les sédiments et les eaux souterraines (voir la figure 2). Ainsi, ces éléments se retrou-

vent dans les nappes phréatiques situées dans certaines plaines proches des montagnes et dans les sols situés à proximité des volcans, tel l'Etna, en Italie.

La concentration de ces substances potentiellement toxiques dans les eaux souterraines dépend de divers phénomènes géologiques et des conditions physico-chimiques qui règnent dans le sol. L'érosion de l'Himalaya étant plus forte et plus rapide que celle de massifs montagneux plus jeunes, tel la chaîne alpine, la contamination des eaux souterraines par l'arsenic est plus importante – et plus problématique – dans les plaines alimentées par les eaux himalayennes que dans les plaines alpines.

La concentration de l'arsenic dans les eaux souterraines dépend aussi de diverses réactions physico-chimiques que subissent les éléments dissous, telles que l'adsorption sur des particules solides, les produits de solubilité qui imposent le seuil au-dessous duquel le composé reste en solution et au-dessus duquel il précipite, ou encore la présence de certaines

bactéries. Ces processus ont lieu au sein de l'aquifère, le système formé par le terrain perméable et les nappes d'eaux souterraines. Dans un aquifère, la mobilité d'un élément dépend aussi des propriétés physico-chimiques de l'eau (sa température, son acidité, la quantité d'oxygène, par exemple) et des sédiments (leur composition, la présence d'argiles, de matière organique, la taille des particules sédimentaires, etc.). Ces caractéristiques déterminent la biodisponibilité de l'élément, c'est-à-dire sa faculté à être absorbé par un organisme.

La libération de l'arsenic dans les eaux souterraines est un phénomène naturel, mais l'activité humaine l'a renforcé dans certaines parties du monde. Ainsi, les sédiments des aquifères situés dans les deltas des grands fleuves du Sud-Est asiatique présentent des concentrations en arsenic plus élevées que dans d'autres bassins sédimentaires, même si elles restent inférieures à la norme. Et pourtant, l'eau y est parmi les plus contaminées, car les conditions physico-chimiques qui y règnent ont favo-



risé la prolifération de bactéries réductrices, lesquelles favorisent la solubilisation de l'arsenic dans l'eau.

Au Bangladesh, le forage des innombrables puits aurait accentué la libération d'arsenic dans les nappes phréatiques en raison de la présence de telles bactéries. Avant leur mise en place, les aquifères représentaient un milieu anaérobie (privé d'oxygène). Le forage et le pompage de l'eau ont introduit de l'oxygène et des micro-organismes, qui ont modifié l'équilibre chimique (voir la figure 4). Des bactéries aérobies, notamment celles qui ont une activité réductrice, ont trouvé un environnement favorable à leur multiplication. Ces bactéries ont ensuite libéré en masse l'arsenic naturellement présent dans les sédiments.

Un problème mondial

Le Bangladesh n'est pas le seul pays où les concentrations en arsenic dans l'eau sont supérieures aux normes. Les États-Unis, l'Australie, l'Argentine, le Chili, le Mexique, la Hongrie, l'Inde, le Népal, certaines provinces de la Chine sont également

concernés (voir la figure 3). La présence d'arsenic dans l'eau potable constituerait une menace pour plus de 500 millions de personnes dans le monde.

Historiquement, le Bangladesh a été le révélateur des problèmes causés par la contamination par l'arsenic de l'eau de consommation, mais d'autres éléments naturels (sélénium, manganèse, fluor, etc.) toxiques à forte concentration posent les mêmes difficultés. Ces éléments causent des milliers de morts chaque année, et ces chiffres risquent d'augmenter au cours des années à venir, en raison de la demande croissante en eau liée à l'explosion démographique dans certaines régions du monde. De nombreux programmes locaux et internationaux ont été mis en place pour évaluer le risque d'exposition des populations et rechercher des solutions techniques et politiques.

Les zones à risques se situent là où ces polluants naturels se sont accumulés au cours du temps et se sont dissous dans les eaux souterraines. En 2008, Lenny Winkel et ses collègues, de l'Institut suisse de la science et technologie de l'eau, EAWAG,

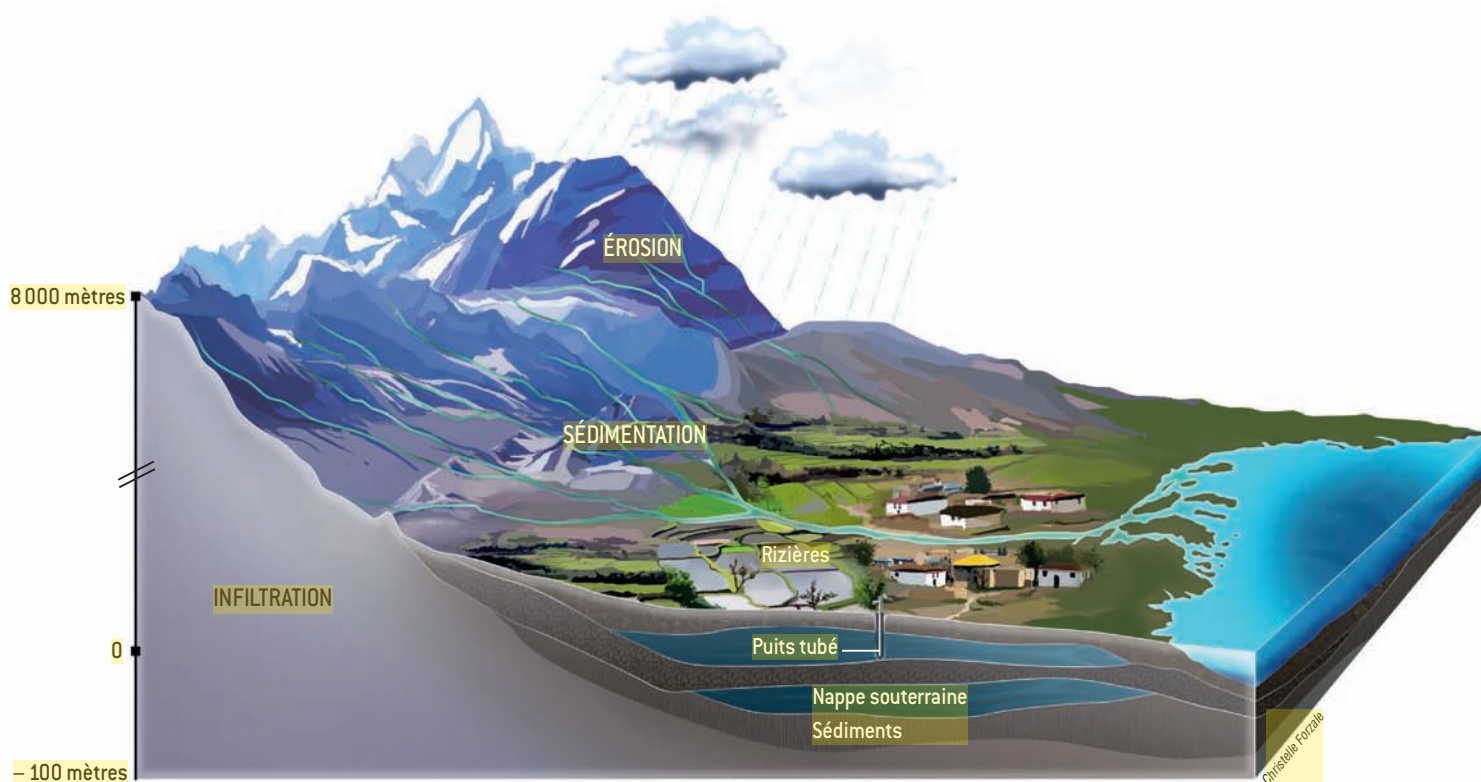
LES AUTEURS



Romain MILLOT est géochimiste au Bureau de recherches géologiques et minières, BRGM, à Orléans.

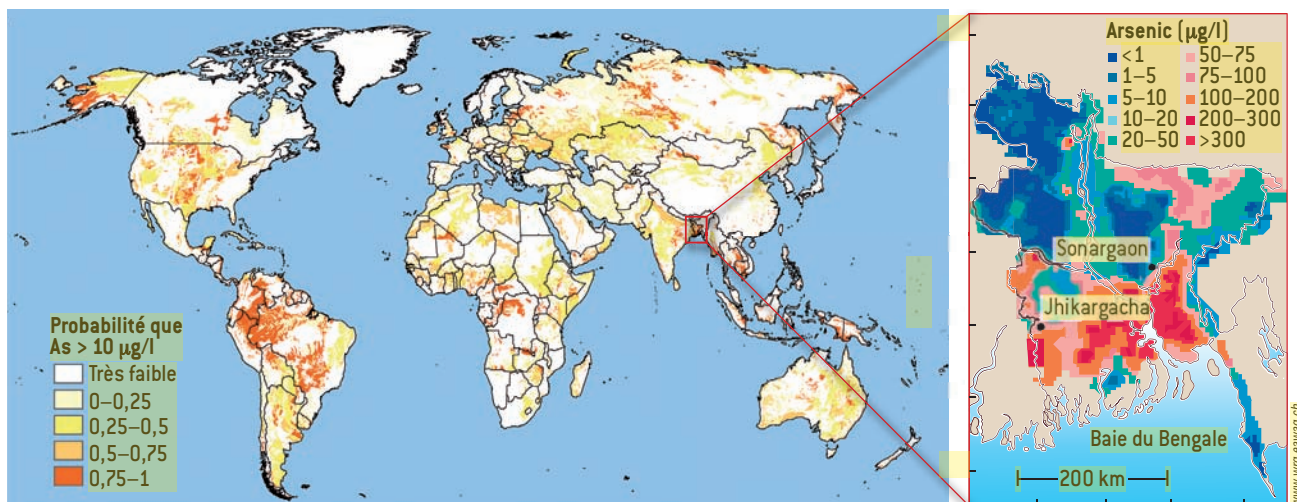
Laurent CHARLET est géochimiste et professeur à l'Université Joseph Fourier, à Grenoble.

David POLYA est géochimiste à l'Université de Manchester, en Grande-Bretagne.



2. L'HIMALAYA, LA PLUS IMPORTANTE CHAÎNE DE MONTAGNES (ci-contre, à gauche), subit une érosion plus forte que les chaînes plus jeunes, les Alpes par exemple. Les sédiments arrachés à la montagne, riches en divers éléments, en arsenic notamment, s'accumulent dans les plaines

situées au pied de la montagne. Les eaux de ruissellement entraînent l'arsenic dans le sol, notamment dans les nappes phréatiques où l'eau est prélevée à plus de dix mètres de profondeur au moyen de puits tubés (ci-dessus). Mais cette eau, trop chargée en arsenic, est impropre à la consommation.



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