

PRÉSENCE DU BORE DANS L'EAU

Le bore (B) n'existe pas dans la nature à l'état élémentaire, mais sous différentes formes dans les dépôts minéraux et les eaux naturelles (borate de calcium, acide borique ou hydrures de bore). Les apports de bore par les rejets urbains et industriels sont faibles, comparés aux apports naturels par érosion et solubilisation des roches, puisqu'ils sont estimés généralement à un quart des apports totaux. L'apport de bore par les rejets provient principalement de l'utilisation des détergents. L'industrie nucléaire, qui utilise le bore comme absorbant de neutrons, et les industries métallurgiques, rejettent également du bore, mais dans une proportion moindre par rapport aux apports dus aux détergents.

EFFETS ET NUISANCES

La toxicité des dérivés borés est éminemment variable : les hydrures de bore sont très toxiques par voies digestive, respiratoire ou cutanée. Cependant, les formes de bore naturellement présentes dans l'eau de boisson ne sont pas considérées comme nocives pour la santé, aux concentrations naturelles (0,1 à 0,3 mg/l en moyenne mondiale). L'OMS préconise une quantité journalière admissible d'environ 0,4 mg par kg de poids corporel ; cette préconisation prend en compte les effets physiologiquement bénéfiques pour l'homme. La source la plus importante d'exposition pour l'homme est son régime alimentaire, spécialement par ingestion de fruits et de légumes.

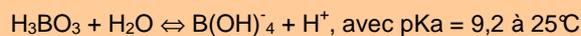
Il est à signaler qu'en agriculture, le bore présent dans les eaux d'irrigation est responsable de l'apparition de tâches sur les fruits et légumes, ce qui altère leur qualité commerciale. Pour cette application il est recommandé une concentration maximum de 1 mg/l.

RÉGLEMENTATION

La directive européenne 98/83/CE du 3 novembre 1998, et sa transposition en droit français par le décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001, codifié en 2003 dans le code de la santé publique (voir Memotec n°12), fixent comme limite de qualité une concentration en bore de 1mg/l dans les eaux destinées à la consommation humaine. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) indique, comme valeur-guide, une concentration en bore égale à 0,5 mg/L, mais signale que cette valeur n'est que provisoire, car il est difficile, dans les régions où la concentration en bore est importante, d'obtenir cette valeur avec les traitements disponibles d'élimination du bore.

PROCÉDÉS D'ÉLIMINATION ENVISAGEABLES

L'acide borique se comporte comme un acide faible selon l'équilibre suivant :



L'acide borique et sa base conjuguée sont les formes prédominantes dans les eaux naturelles. Les méthodes d'élimination de ces composés sont :

- l'adsorption et la précipitation par des composés minéraux ;
- l'adsorption et la complexation par des composés organiques ;
- les techniques membranaires, et en particulier l'osmose inverse.

Adsorption et précipitation par des composés minéraux : de nombreuses contraintes

L'adsorption est relativement difficile à mettre en œuvre dans la mesure où la complexation est dépendante du pH, de la température, de la concentration en bore et du minéral adsorbant (hydroxydes métalliques, argiles...). De plus, cette technique n'est utilisable que dans les cas d'eaux faiblement minéralisées et à forte concentration en bore, ceci afin d'éviter la compétition entre les différents minéraux adsorbables. Il est à signaler que des abattements de 90 % ont été réalisés avec de l'oxyde de magnésium (rapport optimal de MgO/B = 20), mais deux inconvénients majeurs en empêchent son utilisation : une cinétique de réaction beaucoup trop lente, et le coût de la régénération de l'oxyde de magnésium.

Les précipitations chimiques classiques sont très peu efficaces :

- un traitement à la chaux (décarbonatation) pour des concentrations initiales de 1,75 à 10 mg/l d'acide borique permet d'atteindre des abattements de 15 à 25 % ;
- les coagulants classiques, tels les sels de fer ou d'aluminium employés seuls, sont totalement inefficaces.

Adsorption et complexation par des composés organiques : une sélectivité très variable

Se comportant comme un acide, le bore est susceptible d'être complexé par tous les composés comportant une fonction basique, qu'ils soient synthétiques (résines), ou d'origine naturelle (cellulose ou charbon actif).

L'efficacité d'adsorption du charbon actif reste étroitement liée au pH (optimal entre 8 et 9), et des taux d'abattement de l'ordre de 60 % ont été atteints pour une concentration initiale de 5 mg/l. Cependant, ce taux dépend de la présence d'ions concomitants tels les sulfates, le calcium, le magnésium ou les silicates ; l'utilisation de ce procédé reste fortement influencé par les concentrations de ces ions dans l'eau à traiter.

La cellulose a montré des capacités de rétention allant de 0,34 à 0,54 mg de bore par g de cellulose. Bien que la régénération du matériau soit aisée, ce procédé n'est pas utilisable dans la mesure où il est apparu une mauvaise stabilité de la cellulose (avec tendance à la dissolution), ainsi qu'une mauvaise sélectivité par rapport au bore (compétition avec d'autres ions divalents, tels Mg^{2+} ou Ba^{2+} notamment).

Les résines échangeuses d'ions présentent une bonne efficacité d'élimination du bore, même en très faible concentration, mais elles sont plus ou moins sélectives en fonction de leur provenance. Rohm et Haas commercialise une résine complexante très sélective du bore, l'Amberlité IRA 743, qui permet donc de ne pas modifier la minéralisation de l'eau. Cette résine est agréée par la Direction Générale de la Santé pour la production d'eau destinée à la consommation humaine. La teneur résiduelle en bore obtenue est très faible, de l'ordre de 0,02 mg/l, ce qui autorise de ne traiter qu'une partie du débit, puis de la mitiger avec de l'eau non traitée. La résine est régénérée en deux étapes :

- la première à l'aide d'acide sulfurique qui libère l'acide borique ;
- la deuxième à l'aide de soude pour la remettre sous forme basique.

Les techniques membranaires : seule l'osmose inverse est utilisable

L'électrodialyse n'est efficace que pour les formes ionisées du bore ; ainsi l'acide borique voit sa migration à travers les membranes limitée par celles des espèces ionisées. La nanofiltration n'étant pas efficace vis-à-vis du bore, l'osmose inverse reste donc la seule technique membranaire envisageable pour diminuer la concentration en sels dissous totaux et le bore. L'eau de mer présentant une concentration en bore de 5 mg/l environ, c'est dans le cadre du dessalement que l'osmose inverse trouve son application principale au regard de la réduction du bore. Le rendement d'élimination des membranes dépend de plusieurs facteurs :

- du pH. L'élimination du bore est d'autant meilleure que le pH est élevé, car l'acide borique est alors dissocié sous forme ionique, seule forme retenue par les membranes (*figure 1*). Le pH optimum de l'eau d'alimentation doit se situer entre 9 et 10, ce qui nécessite donc un ajustement, le pH de l'eau de mer étant de 8 environ ;
- de la concentration en bore, qui peut varier de 4,5 à plus de 5 mg/l ;
- de la température de l'eau de mer. Plus la température est élevée, plus la viscosité diminue, ce qui augmente le passage en sels dissous ;
- de la nature de la membrane. Il existe des membranes spécifiques présentant des taux de rejet du bore pouvant être supérieurs à 90 %.

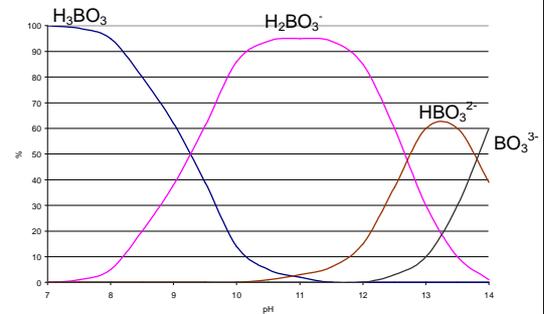


Figure 1

Pour des eaux très chaudes et très salines, présentant une teneur en bore supérieure à 5 mg/l, une seule passe sur les membranes peut ne pas suffire pour respecter la concentration de 0,5 mg/l dans le perméat.

Deux solutions sont alors envisageables :

- traiter le perméat par un passage sur des membranes basse-pression, après avoir ajusté le pH (*figure 2*). Les membranes de la deuxième passe sont arrangées en deux étages afin de limiter le débit de concentrat, et donc la production de la première passe ;

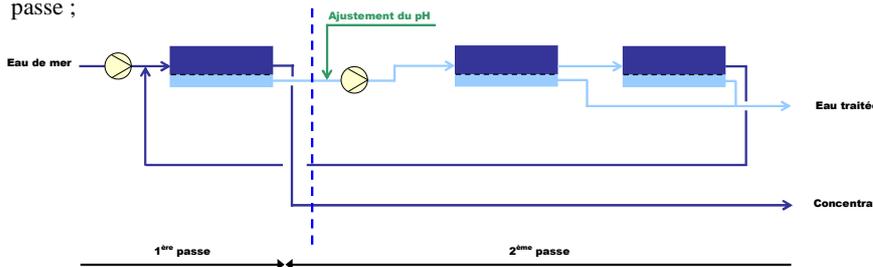


Figure 2

- fixer le bore du perméat sur un échangeur d'ions spécifique (*figure 3*).

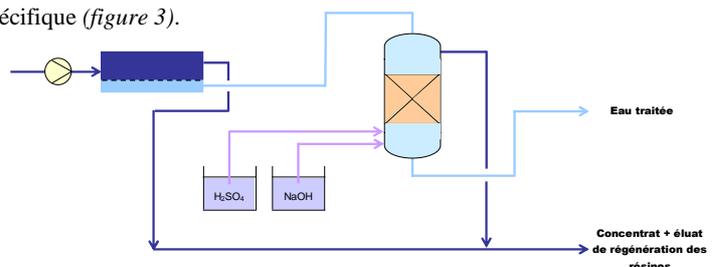


Figure 3

CONCLUSION

Il a été mis en évidence les difficultés d'élimination du bore par les filières classiques d'adsorption sur média minéraux, ou de précipitation. Seul l'échange d'ions sur résine spécifique et l'osmose inverse dans le seul domaine du dessalement de l'eau de mer, ou dans certains cas d'eaux saumâtres, sont des techniques parfaitement maîtrisées. L'adsorption sur charbon actif en grains (CAG) nécessite des essais pour déterminer le type du CAG permettant d'obtenir des cycles les plus longs possibles entre deux régénérations.