

L'objectif de notre étude a été d'étudier les possibilités d'élimination de polluants minéraux des eaux pouvant présenter une toxicité potentielle pour la santé du consommateur tels que le fluor, le cadmium et les phosphates. Les procédés de traitement testés pour l'élimination de chaque élément ont été la précipitation chimique à la chaux, la coagulation floculation au sulfate d'aluminium ainsi que l'adsorption sur la bentonite.

Au cours de la première partie, nous avons réalisé dans un premier temps une synthèse bibliographique sur le fluor concernant sa présence dans l'environnement ainsi que les procédés susceptibles de réduire sa teneur dans les eaux naturelles. Avant de réaliser les essais de défluoruration, nous avons effectué des analyses ponctuelles dans la région de Biskra, donnant une idée éloquente de la présence du fluor associée à une forte minéralisation calcique et magnésienne dans les eaux de forages les plus exploités. Des échantillons de quelques points d'eau ont servi à la réalisation de nos essais de défluoruration

Les premiers essais sur des solutions synthétiques d'eau de Drauh dopées par des teneurs variables en fluorure de sodium ont permis de montrer l'efficacité de la précipitation chimique à la chaux et de la coagulation floculation au sulfate d'aluminium pour l'élimination du fluor à des rendements appréciables mais au prix de doses élevées en réactifs, voisines de 320 à 520 mg/l selon le réactif utilisé et selon la teneur initiale en fluor (3,56 à 6,56 mg/l). Les résultats se sont avérés nettement plus intéressants lorsque les teneurs en fluor ne dépassent pas 5 à 6 mg/l. Ce qui est bien heureusement le cas de la plupart des eaux naturelles destinées à l'AEP dans la région d'étude. Dans le cas de la précipitation chimique à la chaux, les rendements de défluoruration s'améliorent en fonction de teneurs croissantes en magnésium. Le mécanisme prédominant pour la réduction des ions fluor serait l'adsorption sur les sites de  $Mg(OH)_2$  formé. Dans le cas du traitement par le sulfate d'aluminium, le phénomène prédominant est l'adsorption des fluorures sur l'hydroxyde d'aluminium  $Al(OH)_3$  formé lors de l'hydrolyse du coagulant. Ces deux traitements entraînent également une baisse de la dureté et de l'alcalinité (TAC), d'une façon plus marquée dans le cas de la précipitation chimique à la chaux, et une variation du pH, ce qui nécessite une correction avant distribution.

La seconde étape a consisté à étendre les essais de défluoruration à des eaux naturellement fluorées en définissant les quantités d'agents défluorants à mettre en œuvre en fonction des caractéristiques de l'eau brute. En appliquant chacun des deux traitements, nous avons grâce au contrôle de la qualité finale de chaque eau (fluor résiduel, dureté, TAC, pH,...), pu constater également que la défluoruration au sulfate d'aluminium de trois eaux sur les quatre testées aboutissait à de meilleurs résultats que par précipitation chimique à la chaux. Ceci est à rapprocher des différences de la qualité physico-chimique de l'eau brute. Toutefois, le

traitement au sulfate d'aluminium peut mener à une détérioration de la qualité de l'eau après traitement. Ainsi, il se produit une augmentation du taux des sulfates et un risque de présence des ions  $Al^{3+}$  à des teneurs supérieures à 0,2 mg/l.

Au cours de la précipitation chimique à la chaux, l'utilisation du sulfate d'aluminium en tant qu'adjuvant a pu mener à une modeste amélioration des rendements d'élimination des fluorures.

L'application d'une combinaison de deux séquences consécutives de traitement, précipitation chimique à la chaux puis sulfate d'aluminium sur une eau souterraine (eau de Bouchagroune), a permis d'aboutir à des résultats satisfaisants. Ceci, en minimisant les doses de réactifs introduits et les quantités de boues produites. De même, la qualité physico-chimique finale de l'eau traitée est devenue plus conforme aux normes.

Proposées à partir d'essais au laboratoire, la précipitation chimique à la chaux et la combinaison chaux / sulfate d'aluminium, devront à l'avenir être testées en vraie grandeur, à l'échelle d'une petite agglomération, et leurs prix de revient examinés. Concernant l'aspect économique, s'il n'est pas encore possible au stade de notre étude de comparer avec précision le coût des installations, il est néanmoins prévisible que le prix du sulfate d'aluminium sera nettement plus élevé que celui de la chaux, largement disponible en Algérie.

Nos essais ont porté également sur la rétention du fluor par adsorption sur deux types de bentonites algériennes, sodique de Maghnia et calcique de Mostaghanem.

La première étape réalisée en solutions synthétiques d'eau distillée a permis de constater que les rendements de rétention du fluor par bentonite brute ou activée chimiquement s'améliorent avec l'augmentation de la dose de l'argile (2 à 10 g/l). Ce phénomène d'adsorption est irréversible et atteint son équilibre après 3 heures d'agitation. L'étape déterminante dans le processus d'adsorption du fluor sur les bentonites brutes serait l'échange d'ions  $F^-$  avec les ions  $OH^-$  contenus dans la structure de l'argile et une combinaison des  $F^-$  avec le calcium échangeable et précipitation de  $CaF_2$ . Le pH du milieu aqueux joue un rôle primordial dans le processus d'adsorption des ions  $F^-$  sur la bentonite brute, les meilleurs rendements sont obtenus à pH 4. Ce qui a pu justifier notre intérêt pour une activation chimique des bentonites par un acide fort (acide sulfurique). L'étude de l'optimisation des conditions de cette activation nous a permis d'aboutir au fait que les meilleurs rendements sont obtenus pour un rapport massique  $H_2SO_4$  / bentonite égal à 0,2 et pour un temps d'activation de 1 heure pour la bentonite de Maghnia. L'exploitation des résultats par les isothermes de Freundlich et de Langmuir a abouti à des résultats très satisfaisants et a permis de quantifier les capacités maximales d'adsorption pour différentes conditions d'activation. Dans ce cas de traitement,

l'élimination du fluor est assurée aussi bien par la formation de complexes alumino-fluorés et l'attraction des ions  $F^-$  à la surface de l'argile qui devient chargée positivement après traitement acide. Pour des teneurs initiales en fluor variant entre 2 et 10 mg/l, il s'est avéré que le procédé était peu intéressant pour les eaux fortement chargées en fluor (dépassant 5 à 6 mg  $F^-$  / l). La défluoruration des eaux par adsorption sur bentonite activée a été particulièrement adaptée à la qualité des eaux souterraines de la région de Biskra (eaux de forages de Chaiba, de Sidi Khelil et de Jardin London) qui présentent des teneurs en calcium et en magnésium importantes pouvant favoriser la fixation du fluor sur les deux argiles testées. La minéralisation du milieu aqueux semble améliorer la fixation du fluor mais peut conduire à des résultats différents selon la composante minérale de l'eau ( $TH$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , ...) et selon le type de l'argile. Afin de justifier les constatations réalisées, ces essais devront être complétés en considérant un nombre d'échantillons plus important concernant des eaux naturellement fluorées et des caractéristiques physico-chimiques différentes.

D'une façon générale, les essais réalisés ont pu montrer que la bentonite activée de Maghnia était plus performante que la bentonite de Mostaghanem quelle que soit la variation des paramètres réactionnels testés.

La deuxième partie de cette étude a été abordée par une revue sur les propriétés du cadmium ainsi que des phosphates, leurs effets sur la santé de l'homme et sur l'environnement et les procédés de dépollution vis-à-vis de chacun de ces deux éléments.

Concernant les essais de précipitation sur solutions synthétiques d'eau distillée dopées en  $CdCl_2$ , il s'est avéré que l'abattement du cadmium par précipitation chimique à la chaux semble très efficace et aboutit à des teneurs résiduelles en cadmium conformes aux normes. Le phénomène prédominant lors de l'élimination du cadmium par ce traitement est la précipitation du  $Cd(OH)_2$  sous l'effet de l'élévation du pH par ajout de  $Ca(OH)_2$ . La teneur initiale en cadmium influe sur le procédé et augmente la dose optimale de chaux. Contrairement à la précipitation chimique à la chaux, la coagulation floculation au sulfate d'aluminium présente des résultats peu importants, ce qui nécessitera l'optimisation du procédé en prenant en considération les différents paramètres réactionnels qui peuvent avoir un effet sur la réduction du cadmium tel que le pH de traitement et l'utilisation d'adjuvants. L'élimination du cadmium par utilisation du sulfate d'aluminium est associée à l'adsorption sur les hydroxydes d'aluminium formés tels que  $Al(OH)_3$ . La matrice minérale semble avoir une influence sur l'élimination du cadmium par les deux procédés et les doses des réactifs (chaux, sulfate d'aluminium) sont étroitement liées à la minéralisation totale des eaux traitées. La présence de matières organiques, en particulier les substances humiques, contribue à

l'amélioration du rendement d'élimination du cadmium en formant des complexes stables. Cette constatation a été effectuée lors des essais sur solutions synthétiques d'eau distillée et d'eaux de surface.

L'amélioration des rendements d'élimination des phosphates apportés par le biais de la chaux en solutions synthétiques d'eau distillée semble important et s'accroît en fonction de la dose de chaux jusqu'à obtention complète d'un précipité peu soluble qui est l'hydroxyapatite, à un pH supérieur à 10. Ce traitement dépend également de la teneur initiale en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ . En particulier, la présence de calcium en fortes teneurs permet davantage la précipitation de l'hydroxyapatite et améliore notablement le rendement d'élimination des phosphates. L'efficacité de la coagulation floculation au sulfate d'aluminium est fortement liée au pH de traitement. Le procédé présente un intérêt pratique si le pH de traitement est aux alentours de 6. A ce pH, la réaction prédominante de l'élimination des phosphates serait la formation du précipité  $\text{AlPO}_4$  qui est éliminé par adsorption sur l'hydroxyde d'aluminium formé.

L'étude expérimentale de la deuxième partie a consisté en la réalisation d'essais d'élimination du cadmium et des phosphates au moyen de la bentonite de Mostaghanem ainsi que celle de Maghnia. En eau distillée, l'étude des cinétiques d'élimination du cadmium a montré que le phénomène d'adsorption sur les argiles étaient réversible mais la réaction est néanmoins très rapide. Cette réaction mène également à une amélioration des rendements d'élimination du cadmium au fur et à mesure de l'augmentation des doses de bentonite. La rétention du cadmium sur la bentonite semble s'effectuer selon plusieurs mécanismes compétitifs. Le cadmium peut ainsi se comporter comme un cation échangeable, se complexer à des groupements fonctionnels à la surface de l'argile et subir une précipitation sous forme d'hydroxydes par élévation du pH. La présence dans l'eau de fortes teneurs en ions calcium, magnésium ou phosphates peut limiter les rendements de rétention du cadmium par les deux bentonites. En solutions synthétiques d'eaux minéralisées, la fixation du cadmium semble améliorée mais à des résultats différents selon la composante minérale de l'eau et selon le type d'argile. D'une façon générale, les essais réalisés ont pu montrer que la bentonite de Mostaghanem était plus performante que la bentonite de Maghnia quelle que soit la variation des paramètres réactionnels testés.

L'utilisation de la bentonite pour la déphosphatation n'est intéressante que si elle est activée chimiquement. La bentonite de Maghnia activée à un rapport massique  $\text{H}_2\text{SO}_4$  / bentonite égal à 0,2 a permis d'aboutir à des rendements satisfaisants mais pour des temps de contact assez longs (27 heures). En effet, l'échange d'ions et l'affinité de  $\text{PO}_4^{3-}$  pour les ions métalliques de surface jouent un rôle prédominant dans la rétention des phosphates par ces argiles.