

Contamination des eaux souterraines par les métaux lourds d'une mine de fer abandonnée : cas de la région de Bekkaria (Tébessa)

L. Djabri*, L. Ghorreïb*, A. Hani*, Ch. Lamouroux**, J. Mudry***, I. Sharour****

* Université de Annaba, département de Géologie

** Université de Lille 1 - Bât. SN5 - Cité scientifique - 59000 Lille

*** Université de Franche-Comté - Besançon - 25000

**** Ecole polytechnique de Lille - Quatre cantons - 59000 Lille

Pour toute correspondance : djabri_larbi@yahoo.fr

Résumé

Le but recherché par ce travail est la mise en évidence de l'impact d'une mine de fer abandonnée sur la qualité des eaux de la plaine de Bekkaria. La mine de Khanguet présente des minerais polymétalliques ferrifères. L'hétérogénéité de la minéralisation nous a conduit à prendre en considération les éléments traces métalliques (ETM) pouvant être mêlés au fer. L'exploitation de la mine se faisait à ciel ouvert et le minerai extrait était transporté sur plusieurs kilomètres, puis déposé sans précaution avant son transport vers le port de Annaba pour son exportation vers l'étranger. L'exploitation de cette mine s'arrêta en 1966 mais la pollution sévit toujours car les résidus des terrils sont amassés en aval de l'oued Kebir. Ces terrils sont exposés aux aléas climatiques. Les poussières sont transportées par les vents vers d'autres zones ou infiltrées avec les eaux de précipitations. La conséquence est la contamination des eaux des nappes superficielles et des sols séparant ou contenant ces nappes. Pour mettre en évidence cette pollution, des analyses ont été réalisées sur les eaux souterraines et sur les eaux de surface de l'oued Kebir. Les teneurs des métaux dépassent souvent les normes environnementales admises, particulièrement pour le fer, le manganèse, le plomb et le zinc. Le suivi réalisé montre une variation irrégulière des éléments traces dans les eaux de surface. Ainsi le fer et le manganèse évoluent de manière identique lors de la période des basses eaux, l'apport de ces deux éléments étant lié probablement au lessivage des terrils déposés en amont de l'oued et des puits. La concentration en cuivre augmente légèrement en période sèche. Les teneurs en éléments traces diminuent proportionnellement à l'éloignement des terrils. Une modélisation par la méthode des réseaux de neurones confirme les résultats obtenus par l'hydrochimie.

Mots clés : exploitation minière, terrils, pollution des eaux, éléments traces métalliques.

Introduction

La zone étudiée se caractérise par un dépôt de stériles (terrils) provenant d'une mine d'extraction de minerais métallifères abandonnée, située en amont d'une nappe phréatique et d'un oued alimentant la nappe. Une contamination des eaux par des éléments traces métalliques (ETM) résulte de cette situation. Nous avons recherché les indices de pollution sur une surface avoisinant 20 km². Les résultats obtenus nous permettent de caractériser le panache de pollution.

Contexte géographique

Tébessa, ville frontalière avec la Tunisie, est située à l'extrême Nord-Est algérien (fig. 1), aux portes du désert, à environ 230 km au sud de Annaba sur la côte méditerranéenne. La région est limitée au sud par le secteur de Biskra, à l'ouest par celui de Constantine, et à l'est par la frontière tunisienne.

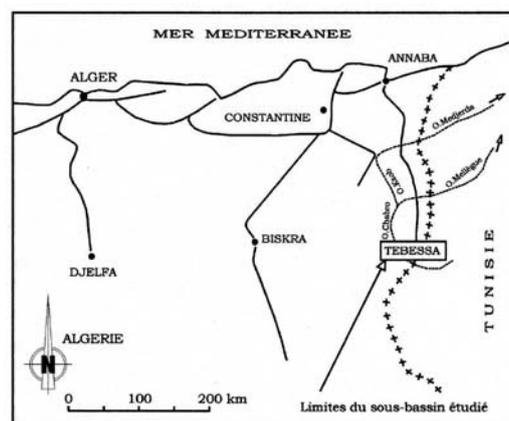


Figure 1 - Situation géographique de la zone étudiée [Djabri, 1996]

Géologie

Dans la zone étudiée, les formations à l'affleurement sont de type sédimentaire, caractérisées par l'apparition de formations triasiques. Ces dernières contiennent souvent des indices de la présence de minerais polymétalliques et ferrifères.

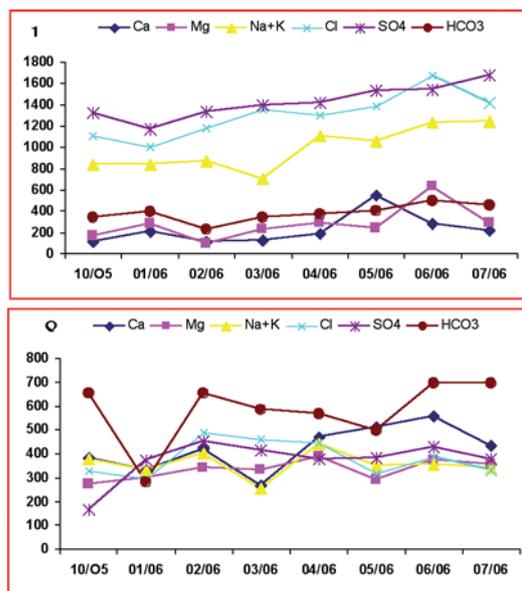


Figure 5 - Evolution des éléments majeurs dans les eaux de surface

mentation en Ca, Mg ainsi que HCO_3^- . Les sulfates et les chlorures subissent une légère baisse, celle-ci s'accompagne d'une augmentation des concentrations des bicarbonates, se produisant en période pluvieuse.

On retrouve la même répartition des concentrations au niveau des puits analysés. On remarque que l'influence des formations gypsifères s'atténue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la mine.

5.1. Evolution des éléments traces dans les eaux de surface de l'oued

La variation des éléments traces dans les eaux de surface est irrégulière. Le fer et le manganèse évoluent ensemble, surtout pendant la période des basses eaux. L'apport en ces deux éléments est dû probablement au lessivage des terrils. Le cuivre présente une légère augmentation, surtout au cours de la période sèche. Le zinc présente une certaine stabilité pour l'ensemble des points analysés. Globalement, on note une diminution des concentrations des éléments traces au fur et mesure qu'on s'éloigne de la mine du point 1 (N-NE de Bekkaria) au point 8 (fig. 6). Cette tendance met en évidence un piégeage probable des éléments traces métalliques (ETM) par le sol.

5.2. Impact de la mine abandonnée sur la qualité des eaux des puits

On remarque que l'influence des formations gypsifères s'atténue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la mine. Au niveau des puits, les concentrations restent faibles et diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la mine. En effet, pour le fer au niveau du puits, les concentrations sont de l'ordre de 0.2 mg/l, indiquant une pollution des eaux, mais sur le puits 8 (cf. fig. 4), les concentrations sont faibles, voire insignifiantes (0.05 mg/l).

Cette interprétation a mis en évidence une double variation des concentrations :

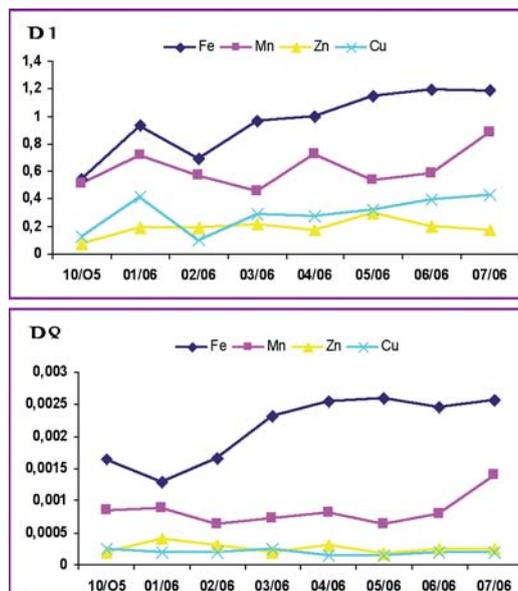


Figure 6 - Evolution des éléments traces dans les eaux de surface

— la première se faisant dans le sens horizontal, indiquant une baisse des concentrations au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la source de pollution (la mine),

— la seconde, verticale, montrant que les eaux des nappes ne sont pas contaminées, ce qui met en évidence un piégeage des métaux par les sédiments.

5.3. Caractérisation du strontium

L'étude du rapport $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ met en évidence l'influence du trias gypso-salifère sur la salinité des eaux. Le strontium est lié aux évaporites. Les fortes teneurs en Sr^{2+} dans les eaux ne s'expliquent que par la dissolution de la célestite (SrSO_4), minéral associé au gypse, il forme ainsi un bon marqueur de la présence des évaporites. La carte établie (fig. 7) montre que le centre de la plaine se caractérise par

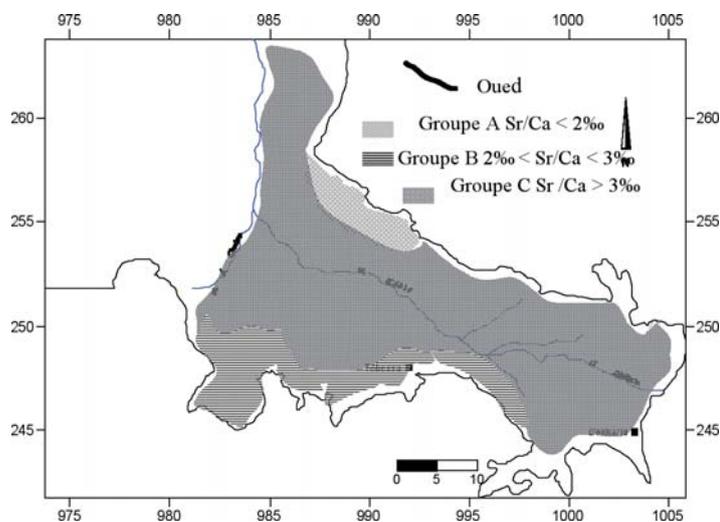


Figure 7 - Carte de répartition des rapports $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$

des eaux dont le rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} est supérieur à 3 ‰, donc lié à l'influence des formations évaporitiques sur la salinité des eaux souterraines. Le rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} inférieur à 3 ‰ caractérise les eaux en provenance des bordures nord et sud et confirme l'alimentation de la nappe par les bordures latérales. Les zones éloignées comme la région de Ain Chabro sont caractérisées par une faible valeur du rapport.

Modélisation

Le recours à la modélisation par la technique des réseaux de neurones peut constituer un outil pour la mise en évidence de l'impact de la mine de fer sur la qualité des eaux.

6.1. Présentation de la méthode

Le réseau de neurones est un modèle empirique non linéaire. R. Hecht Nielsen (1990) donne la définition suivante : un réseau de neurones est un système de calcul composé d'éléments de traitement simples fortement interconnectés qui traitent l'information par leur changement d'état dynamique en réponse à une entrée externe. Les réseaux de neurones (fig.8) sont organisés en couches. Ces couches se composent d'un certain nombre de neurones interconnectés qui contiennent une fonction d'activation.

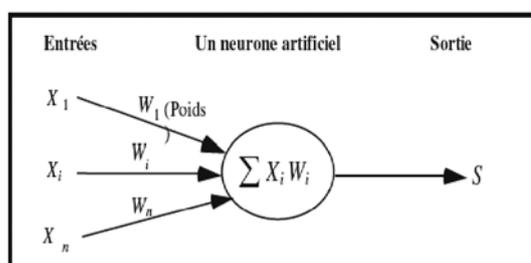


Figure 8 - Schéma fonctionnel des RNA

6.2. Création du modèle

Dans ce travail, un réseau de couches de type « Perceptron Multicouche (MLP) » a été choisi comme modèle du système où le réseau traite un vecteur d'entrée se composant des variables comprenant Ca, Mg, Na, K, Cl, SO_4 , HCO_3 , NO_3 , pH, M, et Sr/Ca. Ce vecteur d'entrée produit un vecteur de rendement (sortie) qui est la conductivité électrique (CE). Le réseau MLP peut être représenté par la forme compacte suivante :

$$\{CE\} = ANN [Ca, Mg, Na, K, Cl, SO_4, HCO_3, NO_3, pH, \text{Minéralisation}, Sr/Ca]$$

Les données des paramètres de qualité des eaux souterraines analysées pour l'an 2006 ont été employées pour créer le modèle en utilisant le logiciel STATISTICA neural network (version 4.0). Les paramètres de qualité de l'eau

incluent : la concentration des ions de calcium (Ca^{2+}), de magnésium (Mg^{2+}), de sodium (Na^+), de potassium (K^+), de chlorure (Cl), de sulfate (SO_4^{2-}), de bicarbonate (HCO_3^-), de nitrate (NO_3^-), d'hydrogène (pH), de minéralisation (M) et du rapport strontium sur calcium (Sr^{2+}/Ca^{2+}). Ces paramètres qui représentent la qualité de l'eau sont considérés comme variables d'entrée, tandis que la variable de rendement de cible (sortie) est la conductivité électrique (CE). Les paramètres statistiques utilisés dans ce travail sont : l'erreur moyenne des carrés RMSE (Root Mean Square Error) et le coefficient de détermination R^2 .

6.3. Résultats et discussion

Les types de réseaux considérés sont : MLP (3 et 4 couches), RBF, GRNN et linéaire. Pour l'analyse, 697 réseaux ont été examinés. Le meilleur modèle trouvé est le MLP (3 couches) avec 6 nœuds cachés.

Erreur (RMS)	Type de réseau
3.312591	GRNN
3.085885	RBF
2.149379	Linear
1.169872	MLP (4 couches)
0.3125517	MLP (3 couches)

Le modèle a une excellente performance, avec un rapport de régression de 0.016661 et un coefficient de corrélation supérieur à 99 % pour l'apprentissage, la vérification et la validation (tableau 1). Un excellent accord entre la conductivité observée et simulée est ainsi obtenu.

Te.CE	Ve.CE	Tr. CE	
2251.111	2511.111	3046.842	Data Mean
612.7896	1712.779	1433.147	Data S.D
24.99978	-5.944085	9.065143	Error Mean
117.1496	28.53741	183.7065	Error S.D
65.60018	18.07498	82.72142	Abs E. Mean
0.1911742	0.01666	0.128184	S.D. Ratio
0.9933773	0.9999169	0.9920684	Correlation

Tableau 1- Paramètres statistiques de régression

L'analyse des corrélations indique que la minéralisation et le rapport strontium sur calcium (Sr^{2+}/Ca^{2+}) sont les facteurs les plus importants influençant la conductivité électrique dans les eaux souterraines.

Conclusion

Cette étude analyse l'impact environnemental des stériles de terrils déposés en amont d'un oued et d'un système aquifère. Les analyses chimiques ont montré que les eaux

des oueds et de l'aquifère superficiel sont chargées en ETM. Les concentrations observées sur les eaux des oueds restent cependant très élevées par rapport aux eaux des puits. Cette répartition serait liée à la rétention des ETM dans les sols séparant les deux niveaux d'eau. Pour confirmer l'origine des ETM, nous avons étudié le rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} qui montre l'influence des formations gypsifères sur la qualité des eaux. Le Djebel Djebissa renferme de nombreuses minéralisations qui, sous l'action de l'eau ou sous l'effet de l'exploitation minière, entraînent une pollution des eaux. Les résultats obtenus par le modèle par réseau de neurones confirment bien cette relation.

Références

L. DJABRI (1987) : Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de la plaine d'effondrement de Tébessa. Essai de modélisation. Thèse de Doc. Ing. Univ. Franche-Comté. Besançon. 176 pages.

L. DJABRI, A. HANI, J. MANIA, J. MUDRY (2001) : Mise en évidence du processus de salinité des superficielles. Vérification par l'ACP dans le secteur de Annaba-Boucheouf et Guelma. Revue Tribune de l'eau. Vol. 54, n° 610, pp. 29-43.

L. GHREIB (2007) : Impact des formations triasiques sur les eaux d'une plaine en zone semi-aride : cas de la plaine de Bekkaria-Tébessa (Extrême Est Algérien). Mémoire de Magister de l'Université de Annaba. 114 pages.

M. C. JUNG (2001) : Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon. Au-Ag mine, Korea. *Appl. Geochem.* 16, 1369–1375.