

Contamination des eaux souterraines par les éléments traces métalliques dans la région d'Azzaba en Algérie

Évaluation du risque santé sur la population

MOUSSA BENHAMZA

MOUNIRA TOUATI

MARWA AISSAOUI

ABDELAZIZ LARABA

Laboratoire de géodynamique et ressources naturelles
Université d'Annaba
Département de géologie
B.P 12 Annaba
Algérie

<moussa.benhamza@univ-annaba.org>

<touati.mounira24@gmail.com>

<marwaaiissaoui8@gmail.com>

<abdlaraba@yahoo.fr>

Tirés à part :

M. Benhamza

Résumé. La géologie de la région montre que les différents indices minéralisés qui affleurent sont classés en polymétalliques (plomb [Pb], zinc [Zn], cuivre [Cu]) et mercuro-polymétalliques (mercure [Hg], Pb, Zn, Cu). Les gisements de mercure de la zone d'étude sont situés sur le flanc nord de la chaîne calcaire, au sud de la ville d'Azzaba, en Algérie. L'usine de mercure implantée dans la région représente la source potentielle de pollution en mercure pour l'environnement.

Les résultats d'analyses sur neuf forages et deux sources montrent que les eaux souterraines de la région d'étude présentent des valeurs élevées en éléments traces métalliques, à savoir le Hg, le Pb et l'arsenic [As]. Pour le Hg, les valeurs sont excessivement élevées de l'ordre de 80 µg/l. Il en est de même pour le Pb et l'As qui présentent des valeurs dépassant les normes établies par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). L'analyse en composante principale a permis de définir des zones de contamination homogènes.

L'estimation du risque santé sur la population de la région d'étude, par le biais du logiciel RISC version 4, révèle un indice de risque acceptable pour le Pb, alors qu'il est inacceptable pour le Hg et l'As, aussi bien pour les enfants que pour les adultes. Le risque cancérigène de l'As est inacceptable pour les enfants et d'une façon moindre pour les adultes de la région d'étude.

Mots clés : eau ; micropolluant métallique ; normes ; contamination.

Abstract

Contamination by selected trace elements in groundwater in Azzaba, in Algeria. Population-based health risk assessment

The various mineral index levels in the area around Azzaba, in northeastern Algeria, are classified as polymetallic (Pb, Zn, Cu) and mercury-polymetallic (Hg, Pb, Zn, Cu). The mercury layers in the area are located on the northern side of the limestone mountain chain south of Azzaba. There is a mercury factory in the area that is a potential source of environmental mercury pollution.

The results of analyses on nine boreholes and two springs show high levels of the selected trace elements, in particular, Hg, Pb, and As, in the area groundwater. The mercury levels are excessively high — about 80 µg.L⁻¹. Lead and arsenic levels also exceed WHO standards. We used principal component analysis (PCA) to define homogeneous zones of contamination.

The health risk assessment for the population living in the study area, according to RISC software, version 4, revealed an acceptable hazard index for Pb, but unacceptable levels for Hg and As, consumed or absorbed by either children and adults. The carcinogenic risk of As is unacceptable for children, but somewhat less dangerous for adults.

Key words: water; micro-pollutant metal; standards; contamination.

Article reçu le 8 janvier 2018,
accepté le 3 avril 2018

Pour citer cet article : Benhamza M, Touati M, Aissaoui M, Laraba A. Contamination des eaux souterraines par les éléments traces métalliques dans la région d'Azzaba en Algérie. Évaluation du risque santé sur la population. *Environ Risque Sante* 2018 ; 17 : 262-268. doi : 10.1684/ers.2018.1156

doi: 10.1684/ers.2018.1156

La région d'étude, Azzaba, est située au nord-est de l'Algérie, à 30 km de Skikda et 60 km d'Annaba. Les différents indices minéralisés qui affleurent dans la région sont classés en polymétalliques (plomb [Pb], zinc [Zn], cuivre [Cu]) et mercuro-polymétalliques (mercure [Hg], Pb, Zn, Cu) [1-3].

La zone d'étude est caractérisée par deux nappes aquifères. La nappe phréatique Oligocène et la nappe profonde Paléocène-Éocène. Les deux nappes sont séparées par les roches imperméables du Paléozoïque et du Lutétien-Priabonien représentant la minéralisation mercurielle de cinabre (HgS) [3].

Dans la région d'étude se localise l'usine qui avait pour activité la production de mercure, utilisait comme matière première du cinabre (HgS) et en consommait 65 000 t/an. Jusqu'à 2008, la production du mercure était de 20 000 potiches/an.

Les études antérieures dans la région d'étude ont montré que les opérations de concassage et de brûlage, rentrant dans le cycle de production de l'usine, ont entraîné la contamination de l'atmosphère, exposant ainsi le personnel de l'usine et toute la population avoisinante à des risques d'intoxication par le Hg [3].

L'analyse en composante principale (ACP) a permis de définir des zones de contamination homogènes. Le logiciel RISC 4 a été utilisé pour estimer le risque santé des polluants sur la population de la région d'étude.

Méthodologie

La campagne de prélèvements et d'analyses a concerné les deux nappes aquifères de la région d'étude. Au total, neuf forages et deux sources ont été analysés pour identifier les éléments majeurs cations et anions (calcium [Ca²⁺], magnésium [Mg²⁺], sodium [Na⁺], potassium [K⁺], bicarbonate [HCO₃⁻], chlorure [Cl⁻], sulfate [SO₄²⁻]) et les éléments traces métalliques sous la forme inorganiques, à savoir le Hg, le Pb et l'arsenic (As) (tableau 1). Les analyses ont été effectuées au niveau du laboratoire du Complexe pétrochimique de Skikda (Algérie) en 2008.

Les chlorures ont été déterminés par la méthode de Mohr [4] et les sulfates par lecture de l'absorbance à $\lambda = 420$ nm pour une suspension obtenue par réaction des sulfates avec le chlorure de baryum. Le sodium et le potassium ont été dosés par photométrie à émission de flamme [5].

La détermination du Hg inorganique s'est effectuée en deux étapes. La première a consisté à oxyder toutes les formes de Hg à l'état bivalent à l'aide d'une digestion acide en Hg élémentaire. Le Hg a été extrait par barbotage d'air sec dans la solution. Le mélange gazeux a ensuite été acheminé vers la cellule du spectrophotomètre d'absorption atomique sans flamme [6]. La concentration de l'échantillon a été déterminée par comparaison entre les

Tableau 1. Résultats des analyses chimiques des éléments traces métalliques (mg/l).

Table 1. Results of the chemical analyses of metal trace elements (mg/l).

Désignation	Hg (mg/l)	Pb (mg/l)	As (mg/l)
90	0,007	0,007	0,003
S.1	0,008	0,008	0,008
350	0,08	0,06	0,02
210	0,08	0,06	0,02
398	0,004	0,004	0,02
S.2	0,08	0,06	0,02
354	0,08	0,08	0,02
194	0,006	0,03	0,02
196	0,006	0,03	0,03
91	0,006	0,02	0,02
93	0,001	0,02	0,02

Hg : mercure ; plomb : Pb ; As : arsenic.

absorbances respectives de l'échantillon et les solutions étalons [6].

Le Pb et l'As ont été déterminés par la spectrophotométrie à absorption atomique [7].

Les points de prélèvements et les résultats des analyses des éléments traces métalliques sont représentés dans la figure 1 et le tableau 1.

Résultats et discussions

Faciès chimiques

La représentation des analyses sur le diagramme de Piper (figure 2) fait ressortir trois faciès chimiques : le

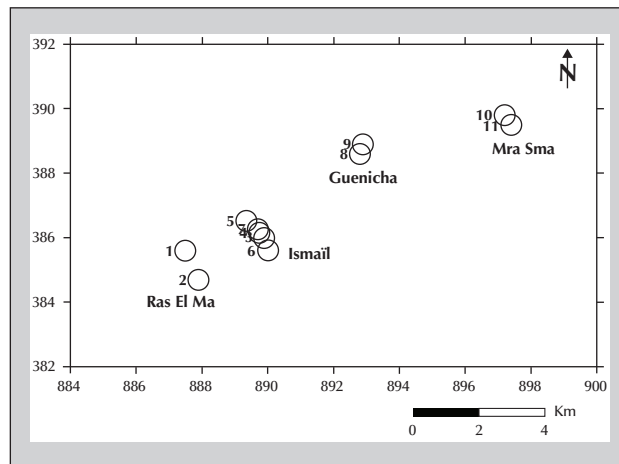


Figure 1. Carte de désignation des points de prélèvements.

Figure 1. Map of the sampling points.

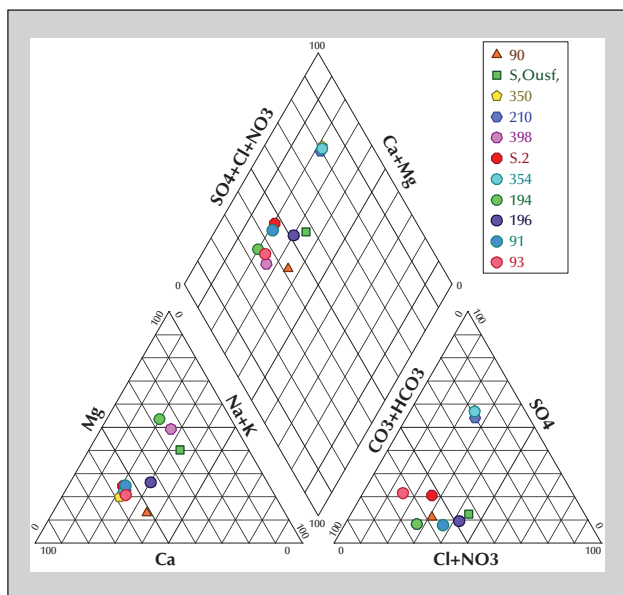


Figure 2. Représentation du diagramme de Piper.

Figure 2. Piper diagram.

bicarbonaté calcique, le sulfaté calcique et le chloruré magnésien [5].

Le faciès chimique dominant, le bicarbonaté calcique, s'explique conformément au réservoir du Paléocène-Éocène constitué de calcaires caverneux et fissurés et de grès calcaires du Paléocène [4].

Éléments traces métalliques

Les résultats des analyses des éléments traces métalliques montrent des valeurs élevées en Hg, Pb et As. Pour le Hg, les valeurs excessivement élevées de l'ordre de 80 µg/l sont localisées dans les forages captant la nappe Oligocène (figure 3). Pour le Pb et le As, les valeurs varient respectivement entre 60 et 80 µg/l, et 3 et 30 µg/l. Ces valeurs sont très élevées conformément aux normes établies par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour le Hg, le Pb et l'As dans les eaux souterraines, qui sont respectivement de 1, 50 et 10 µg/l [8] (figure 4).

Application de l'ACP

L'ACP a concerné 11 puits et sources analysés et 13 variables (pH, résidu sec, titre hydrotimétrique, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, Hg, Pb, et As). Le coefficient de corrélation le plus élevé des éléments traces métalliques est celui du Hg-Pb (0,878).

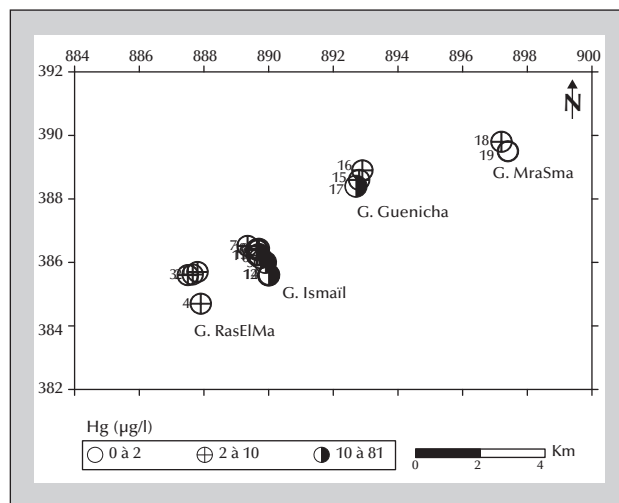


Figure 3. Carte de répartition du mercure (Hg) dans la zone d'étude (µg/l).

Figure 3. Map of Hg distribution in the study area (µg/l).

L'inertie cumulée du cercle de corrélation F1-F2 est de 57,5 % traduisant ainsi le maximum de l'information. L'axe F1 avec une fréquence de 37,70 % regroupe les éléments (variables analysées) responsables des faciès chimiques et met en évidence le Hg et le Pb qui sont bien corrélés ; il est considéré comme un axe de pollution (figure 5) [9, 10]. La projection des individus (forages et sources) dans le

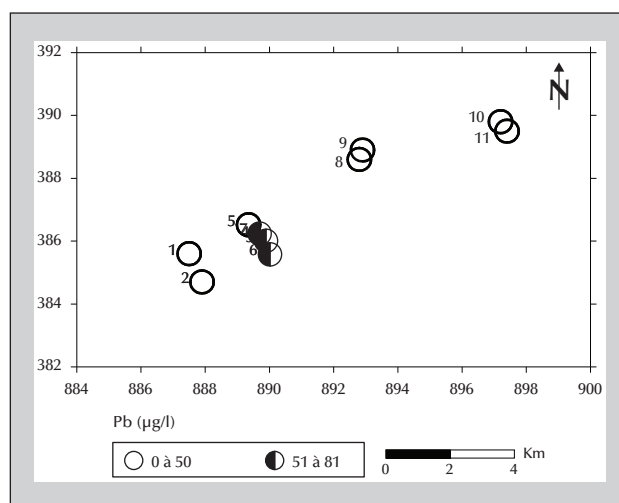


Figure 4. Carte de répartition du plomb (Pb) dans la zone d'étude (µg/l).

Figure 4. Map of lead distribution in the sampling area ((µg/l).

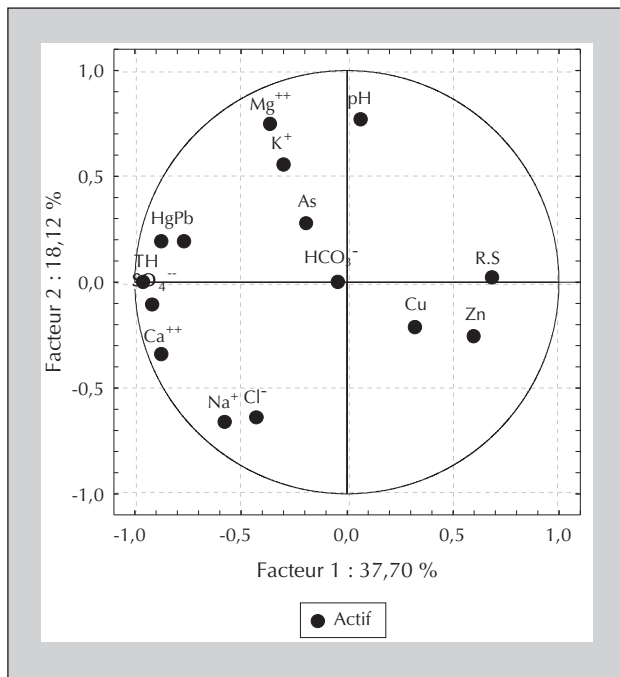


Figure 5. Projection des variables (F1-F2).

Figure 5. Projection of the variables (F1-F2).

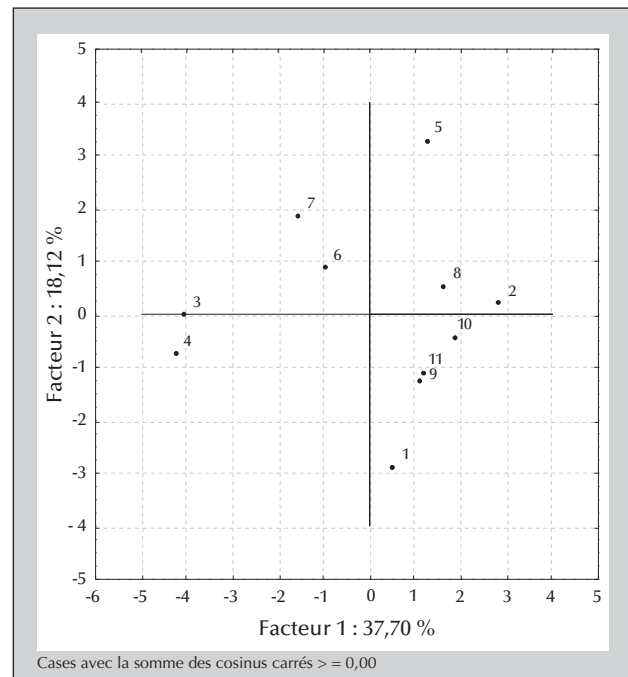


Figure 6. Projection des individus (F1-F2).

Figure 6. Projection of the individuals (F1-F2).

plan F1-F2 montre que l'axe F1 regroupe les éléments présentant le même faciès chimique et regroupe dans un nuage de points les individus présentant les teneurs élevées en Hg et en Pb (figure 6).

Indice de risque

La notion de risque fait appel à celle de nuisance. Une nuisance est tout ce qui fait du tort, qui agresse et qui perturbe. C'est un produit ou un phénomène susceptible d'agresser l'homme et la nature en général (la flore et la faune) et d'altérer leur équilibre.

L'évaluation du risque santé sur la population a été réalisée par le logiciel RISC 4. L'étude des risques est basée sur la définition des risques d'exposition et l'estimation de la dose journalière d'exposition (DJE) [11]. Après l'estimation des concentrations des éléments traces métalliques dans les eaux souterraines, l'analyse des risques s'appuie sur l'estimation des doses d'exposition des individus vis-à-vis de ces métaux lourds. La DJE est la dose de substance reçue par l'organisme rapporté au poids de l'individu et au nombre des jours d'exposition. Elle a pour but de définir une quantité de polluant administrée, exprimée en mg/kg/j [11-13]. Le calcul de la

DJE pour les différents scénarios se déroule toujours en appliquant des équations adaptées pour chacune des voies d'exposition. Les équations se présentent de la manière suivante :

$$DJE = \frac{C \times Q \times Fsp \times De \times Fe}{P \times t}$$

Avec :

DJE : dose journalière d'exposition (mg/kg/j) ; **C** : concentration dans le milieu d'exposition (mg/kg) ; **Q** : quantité ingérée (kg) ; **Fsp** : facteur d'absorption ; **De** : durée d'exposition (années) ; **Fe** : fréquence d'exposition (j/an) ; **P** : poids de l'individu (kg) ; **t** : période de temps sur laquelle l'exposition est moyennée (j) [11-13].

La dose journalière acceptable présente la quantité de substance chimique que peut ingérer un homme par jour au cours de sa vie sans aucun risque appréciable pour sa santé. Le calcul de la DJE pour les différents scénarios se déroule toujours en appliquant des équations adaptées pour chacune des voies d'exposition [11-13].

L'estimation du risque non cancérigène est exprimée par le rapport entre la DJE et la dose journalière acceptable (DJA). Le rapport est appelé indice de risque (IR) :

$$IR = DJE/DJA$$

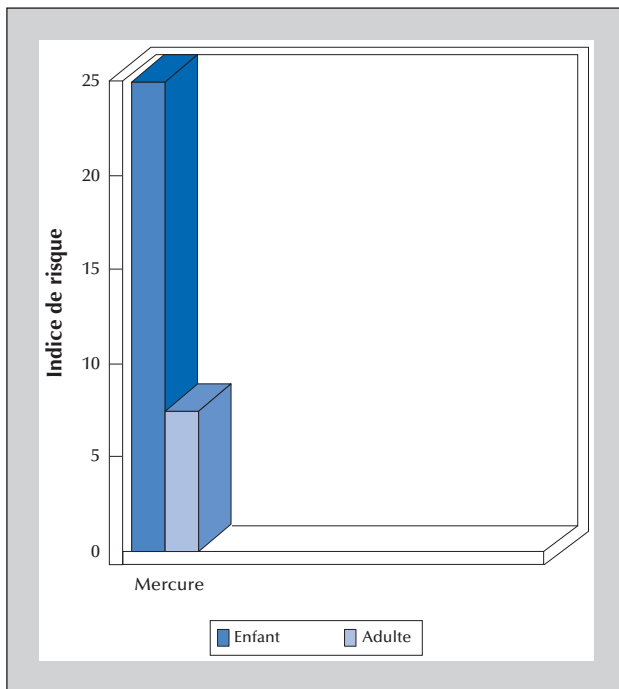


Figure 7. Indice de risque du mercure (Hg).

Figure 7. Hg hazard index.

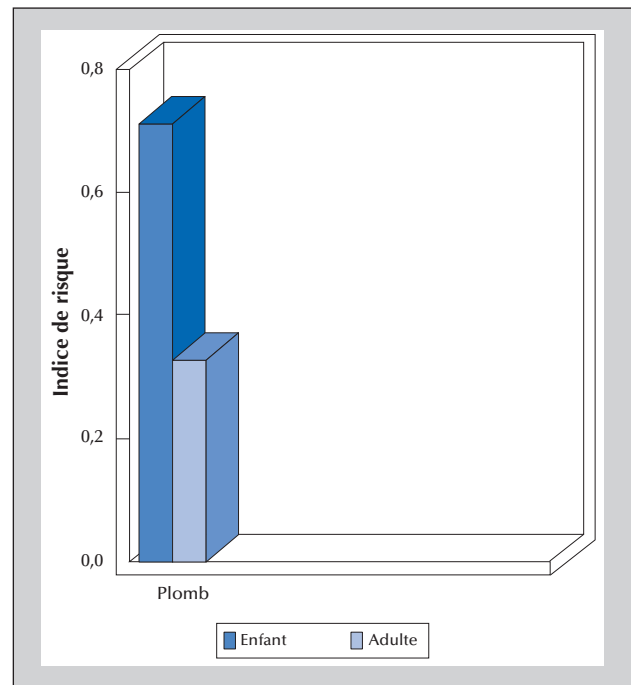


Figure 8. Indice de risque du plomb (Pb).

Figure 8. Pb hazard index.

Si « IR » est inférieur à 1, alors le risque toxique est considéré comme acceptable [12].

Pour le calcul de l'indice de risque, nous avons pris en considération la valeur maximale des éléments traces métalliques analysés dans les eaux souterraines de la région d'étude. Pour la valeur retenue de la DJA, nous avons pris en considération la valeur limite tolérée pour chaque élément.

L'indice de risque pour le Hg est significatif (supérieur à 1), surtout pour les enfants. Le Pb présente un indice de risque acceptable aussi bien pour les enfants que pour les adultes (figures 7 et 8).

L'As présente un indice de risque inacceptable (supérieur à 1), aussi bien pour les adultes que les enfants de la région d'étude (figure 9).

Estimation du risque cancérigène

Le risque cancérigène est estimé par la notion d'excès de risque individuel (ERI) qui est obtenu par la multiplication de la DJE par l'excès de risque unitaire (ERU) ; soit une probabilité d'attraper un cancer de 1 sur 1 million comme niveau de risque certainement acceptable [11]. Si la valeur atteint 10^{-4} , le risque sera considéré

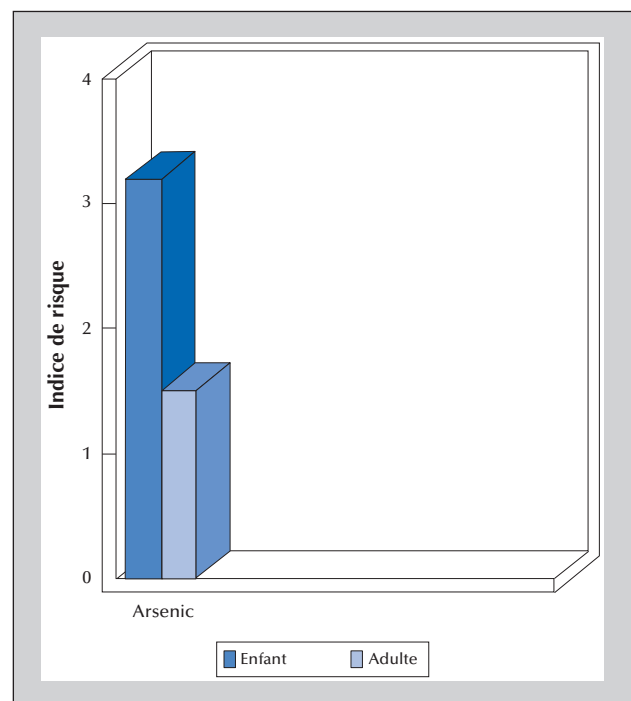


Figure 9. Indice de risque de l'arsenic (As).

Figure 9. Arsenic hazard index.

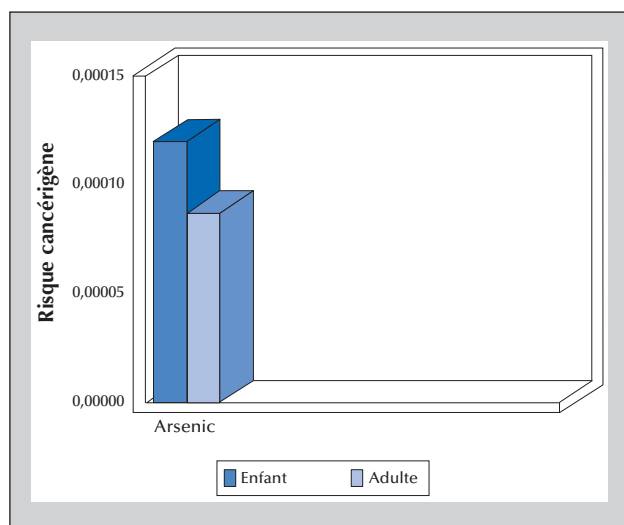


Figure 10. Risque cancérogène de l'arsenic (As).

Figure 10. Carcinogenic risk of arsenic.

comme inacceptable en termes de santé publique [11, 12].

Le risque cancérogène de l'As est inacceptable pour les enfants et d'une façon moindre pour les adultes de la région d'étude (figure 10).

Conclusion

Les valeurs élevées en Hg dans les eaux analysées, jusqu'à 80 µg/l sont retrouvées dans les eaux des puits captant la nappe Oligocène, alors que les eaux de la nappe profonde Paléocène-Éocène présentent des teneurs en Hg

relativement faibles (< 7 µg/l). Les teneurs en Hg retrouvées dans les eaux souterraines de la région sont très élevées et dépassent la norme établie par l'OMS de 1µg/l, témoignant ainsi de la contamination de la nappe phréatique Oligocène. Les valeurs excessives en Hg dans les eaux souterraines sont très probablement le résultat de la contamination par les rejets hydriques de l'usine de mercure [3].

Il est important de souligner qu'en plus de la pollution hydrique générée par le complexe mercuriel, il existe aussi une pollution atmosphérique témoignée par la contamination en mercure des deux points de prélèvements situés en amont de la source de pollution, aussi bien pour les eaux que pour les sédiments [3, 10].

L'étude des risques qui se base sur la définition des risques d'exposition et l'estimation de la DJE, par le biais du logiciel RISC 4, a montré que l'indice de risque du Pb est acceptable. Pour le Hg, l'indice de risque est significatif et inacceptable (supérieur à 1), surtout pour les enfants. L'As présente un indice de risque inacceptable, aussi bien pour les adultes que les enfants de la région d'étude. Le risque cancérogène de l'As est inacceptable pour les enfants de la région d'étude. ■

Remerciements et autres mentions

Nous exprimons nos remerciements aux responsables de l'Office de recherche géologique et minière, Division est Tébessa qui n'ont pas hésité à mettre à notre disposition toutes les données géologiques et hydrogéologiques de la région.

Nos remerciements s'adressent également aux responsables et au personnel du laboratoire du Complexe pétrochimique de Skikda (Algérie) et à la Direction de l'environnement d'Azzaba (Algérie).

Financement : aucun ; **liens d'intérêts** : les auteurs déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt.

Références

1. Bouarroudj MT. *Les minéralisations à Hg, Pb, Zn, Cu, Ba de la zone nord numidique du Nord de l'Algérie orientale – Métallogénie et recherche de guides de prospection*. Thèse de doctorat. France : Université Pierre-et-Marie-Curie, 1986.
2. Mezghache H. *Cartographie automatique et interprétation géostatistique d'une campagne de prospection géochimique sur sol – Application à la zone mercurielle Nord Numidique (Algérie)*. Thèse de doctorat en Géosciences et matières premières. France, 1989.
3. Benhamza M. *Contribution de la géophysique à l'étude hydrogéologique de la zone mercurielle Nord Numidique (Azzaba), Nord-Est Algérie – Conséquences de l'exploitation des gisements mercuriels sur l'environnement*. Thèse de doctorat d'État. Algérie : université d'Annaba, 2007.
4. Rodier J. *Analysis of water; natural water, waste water, sea water*. 7^e ed. Paris : Éditions Dunod, 1984.
5. Schoeller H. *Les eaux souterraines, hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources*. Paris : Éditions Masson et Cie, 1962.
6. Telliard WA. *Method 1631, revision C: mercury in toilets by oxidation, purging and too, and cold vapor atomic spectrometry fluorescence*. Engineering and Analysis Division (4303), U.S. Environmental Agency Protection, 2002.
7. Charlot G. *Dosages absorptiométriques des éléments minéraux*. Paris ; New York ; Barcelone ; Milan : Masson, 1978.
8. OMS. *Exposition aux métaux lourds : limites recommandations d'exposition professionnelle*. OMS, 1980.

9. Benhamza M. Application de l'analyse en composante principale à l'évolution de la pollution mercurielle dans la région d'Azzaba (1999, 2000, 2001). In : *1^{er} Colloque euro-méditerranéen en biologie végétale et environnement*. Algérie : université Badji-Mokhtar-Annaba, 2005.
10. Benhamza M, Hammar Y. Contamination by mercury of groundwater of the North Numidien zone of Azzaba, North East Algeria. Effect of inorganic mercury contamination of population. *Int J Environ Waste Manag* 2012 ; 9 : 347-57.
11. Rapant S, Fajčíková K, Khun M, Cvečková V. Application of health risk assessment method for geological environment at national and regional scales. *Environmental Earth Sciences* 2011 ; 64 : 513-21.
12. US EPA. Risk assessment guidance for superfund. Vol. 1. In : *Human health evaluation manual (EPA/1-89/002)*. Washington, DC : US EPA, 1989.
13. U.S. Environmental Protection Agency. *Exposure factors handbook. Office of Health and Environmental Assessment, vol. I PB 98-124225, vol. II PB98-124233, vol. III PB98-124241. The Set PB98-124217*. U.S. Environmental Protection Agency, 1998. <http://www.epa.gov/ncea/exposfac.htm>