

Pb et As dans des eaux alcalines minières : contamination, comportement et risques (mine abandonnée de Zeïda, Maroc)
Pb and As in mining alkaline waters: Contamination, compartment and risks (the Zeïda abandoned mine, Morocco)

M.L. El Hachimi, L. El Founti, A. Bouabdli, N. Saïdi, M. Fekhoui et N. Tassé

Volume 20, numéro 1, 2007

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/014903ar>
DOI : <https://doi.org/10.7202/014903ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

El Hachimi, M., El Founti, L., Bouabdli, A., Saïdi, N., Fekhoui, M. & Tassé, N. (2007). Pb et As dans des eaux alcalines minières : contamination, comportement et risques (mine abandonnée de Zeïda, Maroc). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 20(1), 1–13.
<https://doi.org/10.7202/014903ar>

Résumé de l'article

Des échantillons d'eau et de matière en suspension ont été prélevés le long de l'oued Moulouya et dans des lacs de carrière au niveau de l'ancien centre minier de Zeïda (Haute Moulouya, Maroc) en vue d'en évaluer la salubrité. Il est en effet important d'établir le degré et les causes éventuelles de dégradation de la qualité de ces eaux, compte tenu de leur usage à des fins tant domestiques qu'agricoles. Des résidus de traitement ont également été échantillonnés dans les haldes abandonnées.

L'analyse des distributions et des variations spatio-temporelles des concentrations de Pb et As a permis de mettre en évidence que le centre minier a véritablement un impact sur la qualité des eaux de surface environnantes, malgré le caractère neutre à alcalin du drainage. Aucune ne rejoint les critères de l'Organisation mondiale de la santé en matière de Pb et As dans l'eau potable (10 µg/L), mais près de la moitié souscrit aux normes marocaines (50 µg/L). L'importance de la dégradation varie selon la saison et la localité, et le contraste entre sites *a priori* non dégradés et sites dégradés n'est pas toujours très prononcé. On observe même des variations à l'inverse des tendances attendues. Les résultats peuvent cependant être réconciliés en tenant compte de l'importance du transport particulaire par rapport au transport dissous au moment et au lieu de l'échantillonnage.

Il appert que les minéralisations et les résidus miniers restés sur place peuvent constituer la principale source de pollution des eaux de surface de la région de Zeïda.

Pb ET As DANS DES EAUX ALCALINES MINIÈRES : CONTAMINATION, COMPORTEMENT ET RISQUES (MINE ABANDONNÉE DE ZEÏDA, MAROC)

*Pb and As in mining alkaline waters:
Contamination, comportment and risks (the Zeïda abandoned mine, Morocco)*

M.L. El Hachimi^{1*}, L. El Founti¹, A. Bouabdli¹, N. Saïdi¹, M. Fekbour² et N. Tassé³

¹Université Ibn Tofail, Faculté des sciences, UFR Géoresources et environnement, B.P. 133, 14000, Kenitra, Maroc

²Institut Scientifique, B.P. 703, Rabat, Maroc

³INRS-Eau, Terre et Environnement, 490, de la Couronne, Québec (Québec), Canada

Reçu le 18 février 2004, accepté le 1 décembre 2005

RÉSUMÉ

Des échantillons d'eau et de matière en suspension ont été prélevés le long de l'oued Moulouya et dans des lacs de carrière au niveau de l'ancien centre minier de Zeïda (Haute Moulouya, Maroc) en vue d'en évaluer la salubrité. Il est en effet important d'établir le degré et les causes éventuelles de dégradation de la qualité de ces eaux, compte tenu de leur usage à des fins tant domestiques qu'agricoles. Des résidus de traitement ont également été échantillonnés dans les haldes abandonnées.

L'analyse des distributions et des variations spatio-temporelles des concentrations de Pb et As a permis de mettre en évidence que le centre minier a véritablement un impact sur la qualité des eaux de surface environnantes, malgré le caractère neutre à alcalin du drainage. Aucune ne rejoint les critères de l'Organisation mondiale de la santé en matière de Pb et As dans l'eau potable (10 µg/L), mais près de la moitié souscrit aux normes marocaines (50 µg/L). L'importance de la dégradation varie selon la saison et la localité, et le contraste entre sites *a priori* non dégradés et sites dégradés n'est pas

toujours très prononcé. On observe même des variations à l'inverse des tendances attendues. Les résultats peuvent cependant être réconciliés en tenant compte de l'importance du transport particulaire par rapport au transport dissous au moment et au lieu de l'échantillonnage.

Il appert que les minéralisations et les résidus miniers restés sur place peuvent constituer la principale source de pollution des eaux de surface de la région de Zeïda.

Mots-clés : Mine Zeïda, Moulouya, Pb et As, pollution, eau, résidus miniers.

SUMMARY

The Upper Moulouya Basin was the location of extensive lead mining between 1930 and 1985, with three major operations near Aouli, Mibladen and Zeïda. The Moulouya drains about 7.5% of the Moroccan territory and provides drinking and irrigation water to many communities over its

*Auteur pour correspondance :
Télécopieur: 212 037372770
Courriel : elhachimi3@yahoo.fr

more than 500 km path. It is thus important to determine the impact of past mining activities on its water quality, since the mining sites were abandoned with little or no rehabilitation. This paper focuses on the Zeïda area, the uppermost of these mining centres on the Moulouya.

About 630,172 t of lead concentrates (40-70% Pb) were produced between 1972 and 1985 at Zeïda. Lead was mined from carbonate and sulphide mineral deposits (cerussite, 70%; galena, 30%) mixed with barite in stratiform ore bodies hosted by Permo-Triassic arkoses. Mining left 12 Mt and 70 Mt of tailings and wastes in fully exposed piles on each side of the Moulouya, as well as a dozen water-filled open-stopes. Mine drainage is of neutral pH, thanks to the low content of residual sulphide minerals and the availability of carbonate in the tailings and host rock. The river and some quarry-lakes are tapped to fulfill domestic, agricultural and stock-breeding needs. One lake is used to directly feed Zeïda's water network (pop. 3,000), without any water treatment.

The Moulouya, upstream and downstream of Zeïda, and four lakes were sampled twice in 2002 (dry period: February; wet period: April). Temperature, electric conductivity (EC), Eh and pH were measured in the field. Samples were filtered through 0.45 µm membranes. The filtrates were preserved with 4% HNO₃ and kept at 4°C until analysis. The filters and their particulate fraction, as well as a composite sample of the tailings, were dried and kept dry until dissolution and analysis. All measurements were performed by ICP-MS and capillary electrophoresis analyses.

Lead and arsenic are well above « normal » concentrations in the tailings, at 5,547 g/t and 192 g/t, respectively. These elements are clear threats to population health, since dust from unstabilized tailings can be dispersed by wind and rain waters, contaminating agricultural soils and surface waters, and eventually leading to cases of saturnism or arsenical intoxication in the population. All Pb and As concentrations measured in the waters sampled are above the World Health Organisation criteria for drinking water (10 µg/L for Pb and As). Nevertheless, about half of these measurements meet the Moroccan criteria (50 µg/L). All samples show near neutral or slightly basic pH values (7.2-8.9). EC is also high (> 1,000 µS/cm).

As and Pb are largely associated with the particulate fraction (> 80% of total As and Pb), except for As in two lakes (< 40%). Overall, their concentrations are higher in the Zeïda area than upstream in the Moulouya. However, this is a tendency rather than a rule, because the differences are often small (< 50%) and suffer exceptions. For instance, Pb concentrations are 60% lower than the so-called uncontaminated reference station, in two quarry-lakes sampled during the wet period. The occasional lack of significant and consistent contrast between an obviously

degraded environment and a pristine site was unexpected. The results were therefore further investigated, in order to identify possible explanations for the apparent discrepancies.

Coherency in the data set emerges when one considers the relative importance of dissolved and particulate transport in the various types of environments sampled. Using this interpretation scheme, EC is considered as an indicator of solute transportation, since EC is a function of dissolved ionic components. Total Pb is regarded as an indicator of particulate transportation, since Pb is strongly adsorbed to particulate substrates at the pH observed. Following these assumptions, particulate transport appears to dominate over dissolved transportation in the Moulouya. Total Pb increases by factors of 3.4 and 9.8 from dry to wet periods, whereas EC decreases by 0.7-0.8, as a result of rain dilution. In two of the four lakes, dissolved transport is comparatively more important, since EC does not change significantly and total Pb shows only a small increase from the dry to the wet period. In these lakes, the dissolved input during the rainy period appears to be large enough to keep EC at its previous value, without significant dilution, as opposed to what is going on in the Moulouya. In the two other lakes, both EC and total Pb decrease from the dry to the wet period, pointing to dilution effects greater than either dissolved or particulate mobilization.

Apparent discrepancies in the intensity and direction of variations are explained when prevailing modes of dispersion are taken into account. For instance, the enrichment factor of total Pb in the Moulouya, downstream of Zeïda, jumps from 1.1 (dry) to 3.2 (wet), with respect to the reference station. Meanwhile, EC increases only from 1.2 (dry) to 1.5 (wet). The greater increase of total Pb over EC is explained by prevalent particulate transport. In another case, the enrichment of EC with respect to the reference station, in two lakes, increases from 14.2 and 20.4 (dry) to 20.1 and 27.9 (wet) while total Pb enrichment decreases from 2.0 and 2.0 (dry) to 1.6 and 1.3 (wet). Here, the prevalence of dissolved transport in these two lakes, combined with particulate transport at the reference station, allow for a strong increase in the EC parameter, concurrent with a weak increase in total Pb. Finally, in the lakes where both dissolved and particulate transport are presumably minor, total Pb undergoes enrichment with respect to the reference station, in the dry period (by 3.4 and 1.8), whereas depletion characterizes the wet period (0.6 in both lakes). In this case, enrichment is likely the result of evaporation during the dry season, and depletion the result of dilution by rain during the wet period. These two types of lake behave differently because they are located next to residual mineral deposits (likely with more soluble phases), have short travel distances and thus fewer contacts with adsorbing substrates, which is not the case for the other two lakes.

Key words: *Zeïda Mine, Moulouya, Pb and As, pollution, water, mine tailings.*

1. INTRODUCTION

L'activité minière a été de longue date l'un des piliers fondamentaux de l'économie du Maroc. Le secteur des métaux a connu un développement progressif depuis 1919 jusqu'à l'année 1982. Les mesures réglementaires associées à ce développement visaient l'intensification de la production des métaux, sans prendre en compte la dimension environnementale. Le code minier marocain a en effet été élaboré à un moment où la protection de l'environnement n'était pas une préoccupation prioritaire.

La région de Zeïda, dans la Haute Moulouya, est l'une des régions marocaines qui a connu une exploitation intense du minerai de plomb. Actuellement, le centre minier de Zeïda est abandonné sans réhabilitation : carrières à ciel ouvert non remblayées remplies d'eau, stocks de résidus miniers non végétalisés (verses à résidus de traitement, terrils de résidus d'exploitation et de stériles de découverte), installations de surface abandonnées (atelier, laverie), le tout dans un paysage fortement dégradé. Ce site peut constituer un risque pour l'environnement de la région et en particulier pour les riverains

qui utilisent les eaux des lacs de carrière et de l'oued Moulouya sans les traiter.

Dans le but d'évaluer la contamination par Pb et As des eaux de surface du centre minier de Zeïda et discuter de l'impact de ce dernier sur la qualité des eaux de surface, la salubrité des eaux en ce qui a trait au district minier a été évaluée. Les variations de concentration de Pb et As et le transport dissous et/ou particulaires de ces contaminants dans les eaux ont été discutés. Pour cela, des résidus de traitement et des échantillons d'eau ont été prélevés dans l'oued Moulouya et dans des lacs de carrière au niveau du centre minier. Ces échantillons ont fait l'objet d'analyses physico-chimiques et d'éléments traces.

2. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Situé dans la région Nord orientale du Maroc (Figure 1), le bassin versant de la Moulouya s'étend sur une superficie de 54 000 km², soit 7,5 % de la surface du pays.

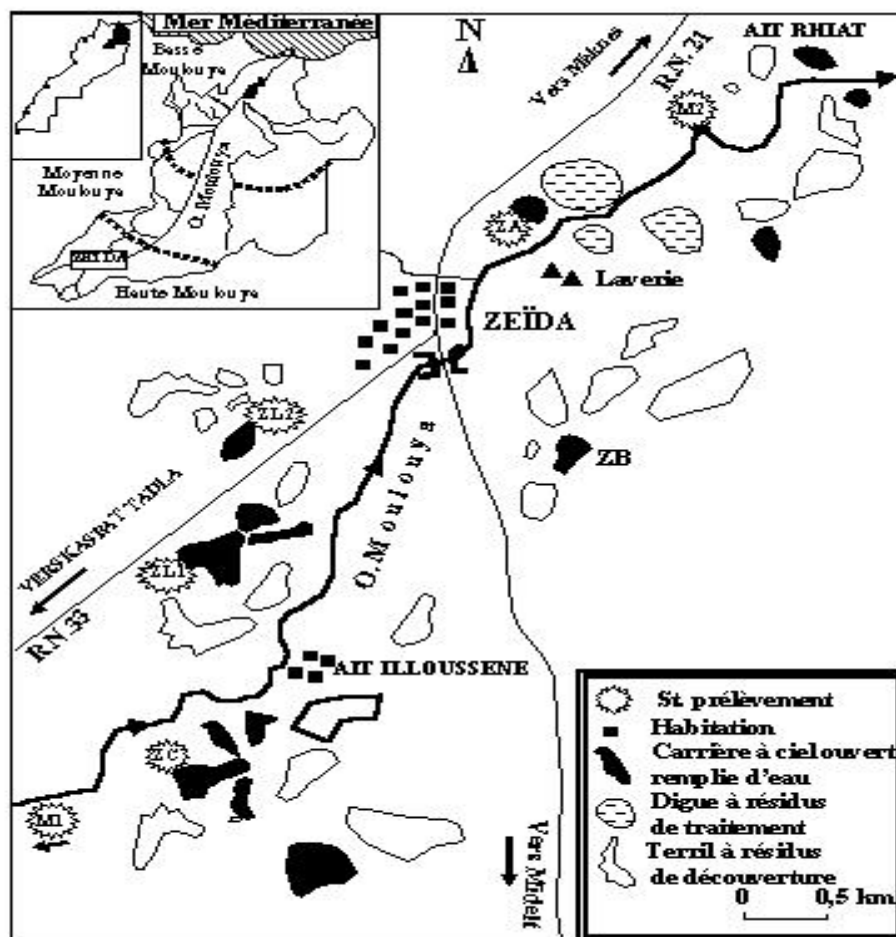


Figure 1. Carte de situation des points de prélèvements dans la zone de Zeïda.
Localization of the sampling points in the Zeïda zone.

L'oued Moulouya, principal cours d'eau de la région, prend sa source à la jonction du Haut et du Moyen Atlas. Il draine le bassin sur plus de 500 km pour se jeter en Méditerranée. Il assure l'alimentation en eau potable des centres urbains riverains et l'irrigation, mais est sujet à d'importants risques de dégradation. En effet, la Haute Moulouya, domaine autrefois à vocation minière (1930/1985), renfermait les plus importants gisements de plomb du Maroc, avec trois gisements (Aouli, Mibladen et Zeïda) formant une entité métallogénique du nom de district plombifère de la Haute Moulouya (EMBERGER, 1965a).

La Haute Moulouya est caractérisée par un climat semi-aride mésothermique sec à tendance montagnarde marquée (COMBE et SIMONOT, 1971). La région est affectée par des conditions climatiques rigoureuses, une rareté des ressources en eau et des successions d'années de sécheresse, auxquelles s'ajoutent les menaces des centres miniers en état d'abandon.

D'une superficie de plus de 300 km², le centre minier de Zeïda (Figure 1) est situé au carrefour de la route principale N° 21 (Meknès-Errachidia) et de la route principale N° 33 qui conduit à Kasba Tadla. Ce gisement, situé sur le parcours même et sur les berges de l'oued Moulouya, à une vingtaine de kilomètres en amont des gîtes d'Aouli et de Mibladen, a été de 1972 à 1985 le siège d'une exploitation intense de minerai de plomb. Le centre minier est actuellement en état d'abandon sans aménagement de fermeture. Les gîtes étaient stratiformes, dans des arkoses du Permo-Trias (AMADE, 1965; EL JAOUANI, 2001; EMBERGER, 1965b). La minéralisation, dont la teneur en Pb était supérieure à 2 %, était formée de carbonate de plomb (cérusite) à 70 % et de sulfure de plomb (galène) à 30 %, associés à de la barytine rose très abondante et à des oxydes de Pb (SCHMITT, 1976). La chalcoppyrite était présente en faible proportion. Quant à la pyrite, elle n'a été identifiée qu'à l'état de cristaux isolés (AMADE, 1965). La minéralisation se situait sous des couches de stériles de 20 à 50 m (marnes, argilites rouges, grès argileux, grès arkosique), et se répartissait dans des panneaux en bancs superposés de 5 à 7 m (SCHMITT, 1976).

L'exploitation était en carrières à ciel ouvert. L'usine de traitement (laverie) de Zeïda, d'une capacité de 1 400 000 t/an, assurait la valorisation et l'enrichissement du minerai par concassage, broyage, flottation et filtration. L'eau utilisée pour le traitement du minerai était pompée de l'oued Moulouya. Ce dernier est actuellement d'un débit moyen mensuel de 12 m³/s et 2 m³/s respectivement en période pluvieuse et en période sèche.

Suite à 14 ans d'exploitation, le bilan à Zeïda s'établit comme suit :

- production de 630 172 t de concentré de plomb à une teneur de 40 à 70 %;
- production d'environ 12 millions de tonnes de résidus de traitement; ces résidus de laverie, stockés dans des haldes, sont situés sur les berges de l'oued Moulouya en aval de l'usine de traitement, et occupent une superficie de plus de 50 hectares (D.M.R., 1990);
- production d'environ 70 millions de tonnes de stériles de découverte; les terrils sont également situés sur les berges de l'oued Moulouya, en amont et en aval de la laverie;
- une dizaine de carrières à ciel ouvert actuellement remplies d'eau, d'un volume estimé à plusieurs millions de m³; il s'agit d'eau de la nappe et de ruissellement; ces carrières forment des lacs, en particulier ZL1 (2 Mm³), ZL2 (0,5 Mm³), ZA (1 Mm³), ZB (0,01 Mm³) et ZC (3 Mm³); ces lacs sont pour la plupart pérennes, sauf ZB, qui s'assèche en été.
- présence de minéralisations résiduelles, en particulier à proximité des lacs ZL1 et ZL2.

Les eaux des lacs et de l'oued Moulouya sont utilisées pour consommation domestique, irrigation et abreuvement du cheptel. Les eaux du lac de la carrière ZC, plus spécifiquement, sont distribuées sans traitement préalable dans le réseau du village de Zeïda (5 000 habitants).

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Des échantillons d'eau et de matière en suspension ont été prélevés au niveau du centre minier de Zeïda, d'une part dans l'oued Moulouya (M1 : à 30 km en amont de la mine; M2 : à 500 m en aval des haldes de résidus de traitement), et d'autre part dans des lacs de carrières (ZL1, ZL2, ZA, ZC) (Figure 1). Les missions d'échantillonnage ont été réalisées en période sèche (février 2002) et en période de pluie (avril 2002). Les paramètres physico-chimiques de l'eau ont été mesurés sur le terrain. Les échantillons ont été immédiatement filtrés sur des filtres de 0,45 µm propres montés sur un appareil à filtrer Nalgène^R. Les filtrats, répartis dans des flacons en polyéthylène destinés aux différentes analyses, ont été préservés avec HNO₃ 4 % et conservés à 4 °C. Les filtres supportant la charge particulaire ont été séchés au laboratoire en salle blanche à la température ambiante et conservés dans un endroit sec jusqu'au moment de la minéralisation.

Un échantillon composite de résidus de traitement a été préparé à partir de cinq sous-échantillons prélevés à environ 40 cm, à différents emplacements en surface et au sommet aplani de la grande halde de résidus de traitement. Ces résidus ont été broyés et conservés jusqu'au moment de la minéralisation.

Les analyses ont été effectuées au laboratoire Hydrosiences de l'Université de Montpellier II (France). Les éléments traces métalliques (ETM) de l'eau filtrée et des phases particulières des filtres et des résidus de traitement ont été déterminés par ICP-MS. Les éléments majeurs de l'eau brute l'ont été par électrophorèse capillaire.

L'analyse par ICP-MS a été effectuée sur des fractions aliquotes de 10 mL des échantillons prélevés, avec ajout de standards internes (indium, bismuth), HNO₃ 15N et H₂O milli-Q. Pour les matières en suspension et les résidus miniers, une attaque d'une semaine sur 0,1 g à 1 g de chaque échantillon prélevé a été effectuée avec 20 mL de HNO₃ concentré ultra-pur dans des flacons en polyéthylène. Pour l'analyse, un volume de 10 mL d'échantillon liquide est préparé en fonction de la dilution choisie. Un blanc et des SPEX (solutions synthétiques multi-élémentaires de concentrations connues) sont utilisés lors de chaque série d'analyses. La concentration des métaux traces dans les solides est déterminée par calcul à partir des résultats bruts de l'ICP-MS, en tenant compte des attaques et des dilutions réalisées (volume HNO₃ et masse attaquée de l'échantillon).

4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Pb et As des résidus de traitement

Les parcs à résidus de traitement, situés à quelques mètres des berges et sur le parcours de l'oued Moulouya, sont formés d'environ 12 millions de tonnes de résidus en verses non végétalisées. Ces résidus de traitement, sablonneux (87 % des grains sont de tailles comprises entre 62,5 µm et 2 mm), avec un pH eau de 8,4, contiennent un pourcentage très faible de matière organique (0,07 %). Les analyses ont révélé des teneurs moyennes en ETM excessivement élevées dans les résidus comparées aux teneurs moyennes normales dans la croûte terrestre (clarke) (FOUCAULT, 1995) (Figure 2), en particulier pour Pb et pour As. Elles sont respectivement de 5 547 g/t et 192 g/t, soit un tonnage total de 66 564 t de plomb et 2 304 t d'arsenic pour l'ensemble des verses à résidus. En plus de ces éléments, des quantités résiduelles significatives de réactifs chimiques et de leurs produits de dégradation pourraient aussi se trouver dans les résidus (sulfhydrate de sodium, amyloxanthate, silicate de sodium et huile de pin) (PELLET, 1963).

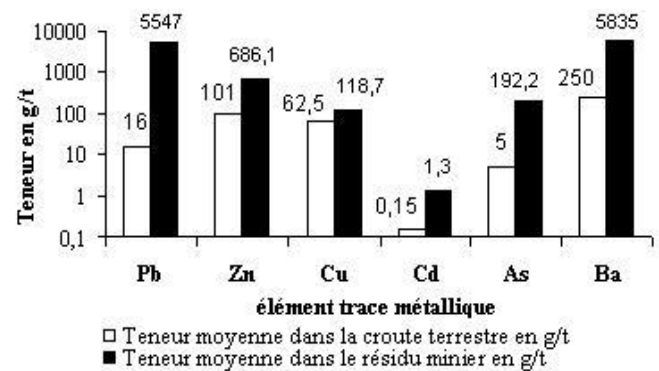


Figure 2. Teneurs moyennes des éléments traces des résidus miniers de Zeïda comparées au clarke (g/t).

Averages of trace element contents in the Zeïda mining residues compared with the clarke (g/t).

Les particules constituant un résidu minier peuvent être déplacées dans l'environnement suite à une érosion par les eaux de ruissellement ou en tant que poussière portée par le vent. La quantité de matériel déplacée et la vitesse d'érosion dépendent à la fois des caractéristiques du résidu (taille des particules, degré d'humidité, etc.), du lieu de stockage (forme, positionnement dans le bassin versant) et de l'intensité des facteurs climatiques (pluies, vents, régimes des températures) (B.R.G.M., 1999). La finesse et l'homogénéité de la taille des résidus les rendent particulièrement susceptibles à une dispersion dans l'environnement, dans le cas d'un lieu de stockage mal conçu et non réaménagé (B.R.G.M., 1999).

Dans le cas de Zeïda, les verses à résidus sont situées sur un terrain plat et découvert, près des ressources en eau de surface. Formées de particules de taille fine, elles sont non végétalisées et de stabilité physique faible. Elles subissent les effets d'une intense érosion hydrique et éolienne permettant le transfert des ETM en phases dissoute et particulaire vers l'environnement avoisinant. Le lessivage a lieu lors de fortes pluies instantanées et orageuses, fréquentes dans la région. Le transport éolien dû au vannage des résidus est actif en période sèche. La région connaît des vents violents, que ce soit en hiver ou en été (NGADI, 1995). En effet, en cette région où les températures moyennes varient entre 7,2 °C et 26 °C (température moyenne du mois le plus froid – janvier, et température moyenne du mois le plus chaud – juillet) et où la moyenne pluviométrique annuelle atteint 178 mm, les vents fréquents (80 %) atteignent une vitesse maximale au sol de 20 à 50 m/s. Ces vents actifs dominants sont de deux directions : des vents ENE chauds et secs (chergui) et des vents WSW froids. Des matières en suspension et des poussières toxiques volantes peuvent donc atteindre les cours d'eau et les sols agricoles avoisinants, entraînant ainsi une dégradation de la qualité des eaux de surface et des sols. Les poussières, surtout les plus fines, constituent une source de nuisance pour les habitants. Elles peuvent être directement inhalées ou ingérées avec les

récoltes sur lesquelles elles se sont déposées, constituant ainsi une source potentielle d'intoxication en ETM, en particulier au plomb et à l'arsenic chez les riverains. L'intoxication saturnine chez l'adulte se caractérise par des douleurs abdominales, des céphalées, l'hypertension, l'anémie, la néphropathie, la perte de mémoire et la perturbation du système nerveux et des reins. L'intoxication arsenicale se caractérise par des troubles digestifs, des troubles neurologiques, des anomalies hématologiques, une atteinte de la peau, des laryngites, trachéites et bronchites, ainsi que des cancers pulmonaires (WILSON *et al.*, 1993).

4.2 Physico-chimie et salubrité de l'eau

Les mesures et les analyses réalisées révèlent que la minéralisation des eaux est élevée pour toutes les stations et le pH varie de 7,2 à 8,9 (Tableau 1). Il s'agit d'eaux alcalines pour l'ensemble des stations. D'après le diagramme de Piper (Figure 3), les faciès hydro-géochimiques diffèrent d'une station à l'autre et entre les stations de l'oued et les stations des lacs de carrières. Le faciès est bicarbonaté calcique pour les eaux de l'oued Moulouya (M1; M2), bicarbonaté calcique et/ou magnésien pour les eaux du lac ZC, chloruré sodique pour les eaux du lac ZA, chloruré sodique ou sulfaté sodique pour les eaux du lac ZL1, et hyper-chloruré sodique pour les eaux du lac ZL2.

Les pH sont légèrement basiques pour les eaux de l'oued Moulouya et un peu plus alcalins pour les eaux des lacs de carrières, que ce soit en période de pluie ou en période sèche. Le pH neutre est le résultat d'une relative pauvreté de sulfures résiduels et d'une relative abondance de carbonates dans les rejets miniers et l'encaissant (CABOI *et al.*, 1999; SCHINDLER, 1986). En effet, les eaux de surface qui s'écoulent vers l'oued Moulouya et vers les lacs de carrières ruissellent et s'infiltrant dans la couverture marno-dolomitique et calcaire non végétalisée, ainsi que dans les résidus de traitement nus riches en minéraux carbonatés déposés aux abords. Ceci permet de tamponner l'eau qui aurait pu être acidifiée par l'oxydation des sulfures. L'exportation des éléments traces métalliques vers les eaux sous forme dissoute à partir des résidus miniers est par conséquent limitée.

Les valeurs de la conductivité électrique (CE) sont en général élevées (conductivité >1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), plus en période sèche qu'en période de pluie.

Les valeurs du potentiel d'oxydoréduction (Eh) varient avec les types de station et la période d'échantillonnage. Les conditions sont toujours plus oxydantes pour les eaux courantes de l'oued Moulouya que pour les eaux stagnantes des lacs de carrières, avec des conditions dans l'ensemble plus réductrices en période de pluie, autant pour les eaux de l'oued Moulouya que pour les eaux des lacs. La baisse va de pair avec une forte

turbidité de l'eau en période de pluie.

La qualité physico-chimique des eaux superficielles de la région Zeïda est dégradée, en particulier celle des eaux des lacs ZL2, ZL1 et ZA. Non généralement acceptables en période sèche, les eaux de la Moulouya au niveau de Zeïda s'avèrent franchement polluées en période de pluie. La concentration en Pb dans l'eau à la station M2 (130 $\mu\text{g}/\text{L}$) dépasse largement les normes de potabilité (norme de l'OMS : 10 $\mu\text{g}/\text{L}$, WHO, 2004; norme marocaine : 50 $\mu\text{g}/\text{L}$, N.M., 2002) et nécessitent un traitement. Il en est de même pour les eaux des lacs de carrières ZL1 et ZL2 en période de pluie. Néanmoins, et selon la norme marocaine, toutes ces eaux sont compatibles avec l'irrigation ($[\text{Pb}] < 5\,000\ \mu\text{g}/\text{L}$). La concentration en As des eaux de l'oued à M2 dépasse également les normes de potabilité (norme de l'OMS : 10 $\mu\text{g}/\text{L}$, WHO, 2004; norme marocaine : 50 $\mu\text{g}/\text{L}$, N.M., 2002). Elles nécessitent donc un traitement pour la production d'eau potable, mais restent utilisables pour l'irrigation selon la norme marocaine ($[\text{As}] < 100\ \mu\text{g}/\text{L}$). Il en est de même pour les eaux des lacs de carrières ZA et ZC, mais pas pour les lacs ZL1 et ZL2, à la fois non potables et inaptes à l'irrigation ($[\text{As}] > 100\ \mu\text{g}/\text{L}$).

4.3 Plomb et arsenic dans l'eau

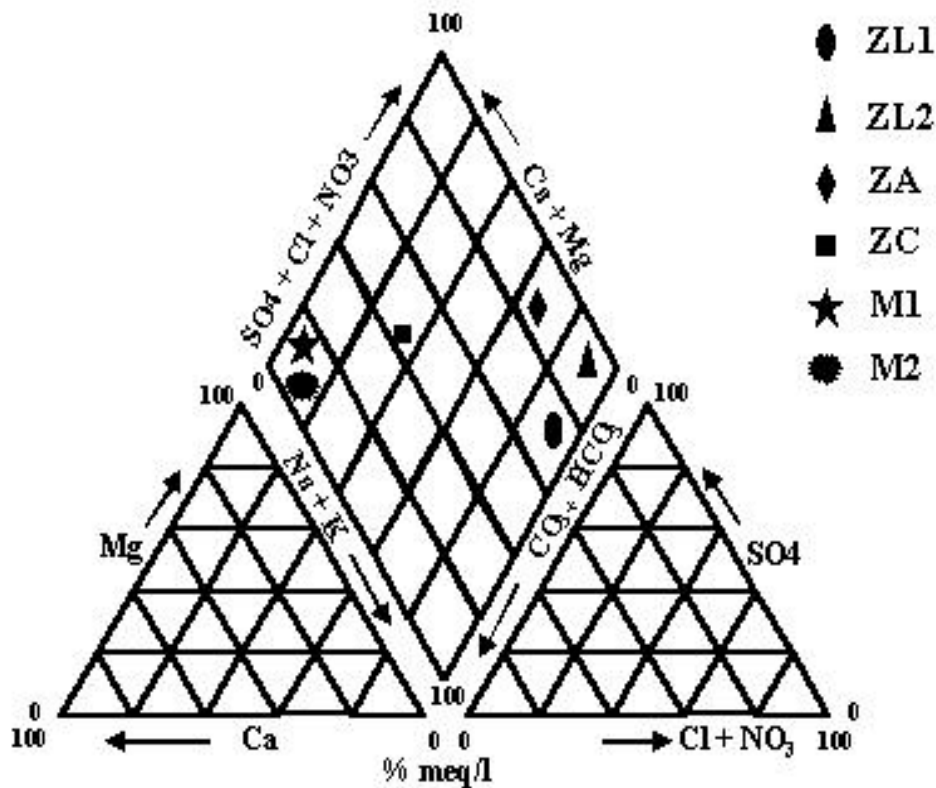
Le contenu en Pb et As des eaux de surface au niveau de la mine de Zeïda est extrêmement variable (Tableau 1; Figures 4 et 6). Les concentrations d'arsenic sont généralement supérieures à celles du plomb, en réponse à la solubilité réduite de Pb aux pH neutres ou basiques (EARLY, 1999). Ces éléments sont systématiquement associés à la fraction particulaire (Figures 5 et 7), sauf l'arsenic des lacs ZL1 et ZL2. La forme particulaire n'y compte en effet que pour 34 % en moyenne, par rapport à 85 % dans le contexte analogue des lacs ZA et ZC, à 93 % dans les stations de l'oued, et à 89 % pour l'ensemble des données du plomb. Les totaux « dissous + particulaires » sont en général supérieurs aux concentrations mesurées à la station M1 (station de référence) située sur l'oued Moulouya à 30 km en amont du centre minier. Il s'agit toutefois plus d'une tendance que d'une règle, puisque les valeurs de Pb observées dans les lacs ZA et ZC sont sans équivoque inférieures à celles de M1 en période de pluie par environ 60 %. De plus, l'augmentation de Pb et As par rapport à la station de référence ne varie qu'entre 11 et 49 % pour 8 des 18 autres résultats recueillis, ce qui est peu pour des eaux d'un milieu dégradé, par rapport à celles d'une station que l'on présume non contaminée. Pour cette raison, il convient d'examiner plus en détail la nature des variations observées, compte tenu de ces exceptions répétées et de ces tendances mal affirmées.

Les résultats concernant le plomb et l'arsenic (Figures 4 à 7) sont présentés en compagnie des données de conductivité

Tableau 1. Résultats des paramètres hydrochimiques mesurés dans les échantillons d'eau en période sèche et en période pluvieuse.*Table 1. Results of hydrochemical measurements on water samples collected during the dry and wet periods.*

Échantillons de la période sèche										Échantillons de la période de pluie								
Station	T °C	pH	CE	Eh	MES	Pb	%Pb	As	%As	T °C	pH	CE	Eh	MES	Pb	%Pb	As	%As
			µS/cm	mV	mg/L	Total* µg/L	Part.	Total* µg/L	Part.			µS/cm	mV	mg/L	Total* µg/L	Part.	Total* µg/L	Part.
M1	11,5	7,7	860	50	12,8	12	97	38,9	97	21	7,8	573	-22	361	41,1	97	46	95
M2	12,2	7,2	1 050	40	16,8	13,3	98	53,5	89	18,1	8,1	880	-57	1 657	130	98	67,5	93
ZL1	12,9	8,6	12 200	-6	1,6	23,6	78	130,9	40	21,1	8,7	11 620	-108	37	64,1	88	179,6	37
ZL2	13	8,7	17 530	-10	30	24,3	85	138	34	18,5	8,8	15 980	-135	8,4	51,3	71	199,6	25
ZA	14	8,8	2 400	-20	7,2	40,8	92	50	85	20,9	8,9	1 750	-177	1,6	25,7	89	68,3	78
ZC	12,8	7,9	1 061	-4	1,6	21,3	97	52,4	91	18,4	8,1	920	-56	0,8	24,1	84	64,6	86

* Total = dissous + matière particulaire.

**Figure 3. Diagramme de Piper montrant les faciès hydrogéochimiques des lacs de carrière et de l'oued Moulouya au niveau de la mine de Zeïda.***Piper Diagram showing the water classes of the quarry lakes and the Moulouya River at the level of Zeïda mining centre.*

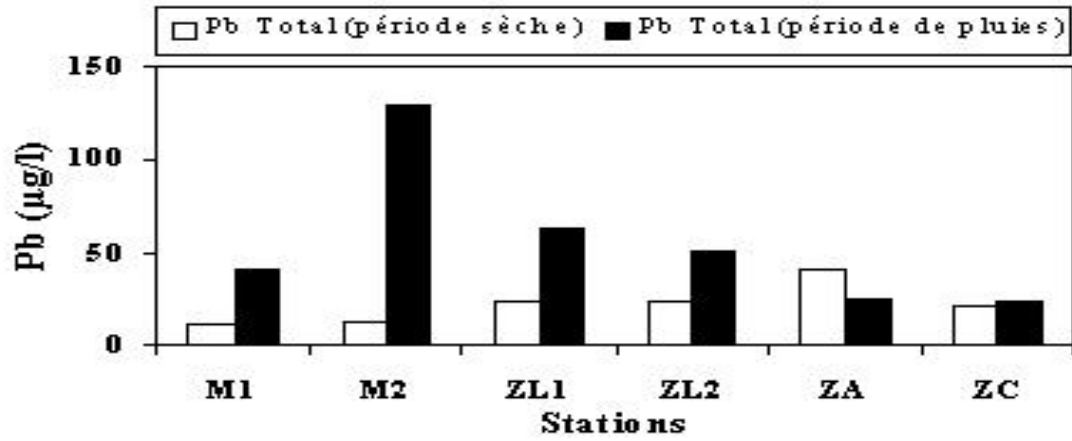


Figure 4. Variation spatio-temporelle des concentrations en Pb total de l'eau.
Spatio-temporal variation of total Pb concentrations in water.

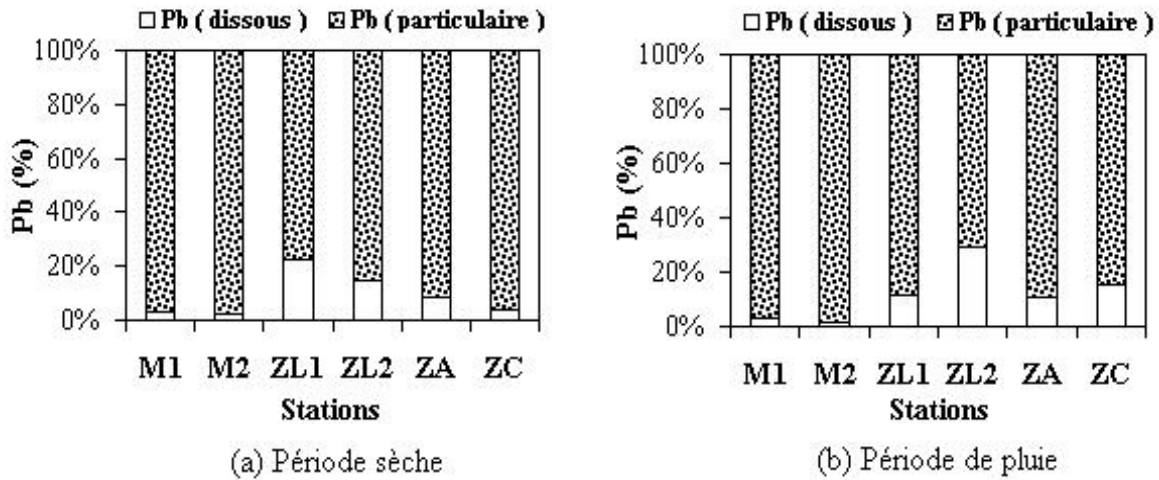


Figure 5. Variation spatiale du pourcentage de Pb dissous et particulaire; a) période sèche; b) période de pluie.
Spatial variation of the percentage of dissolved and particulate Pb; a) dry period; b) wet period.

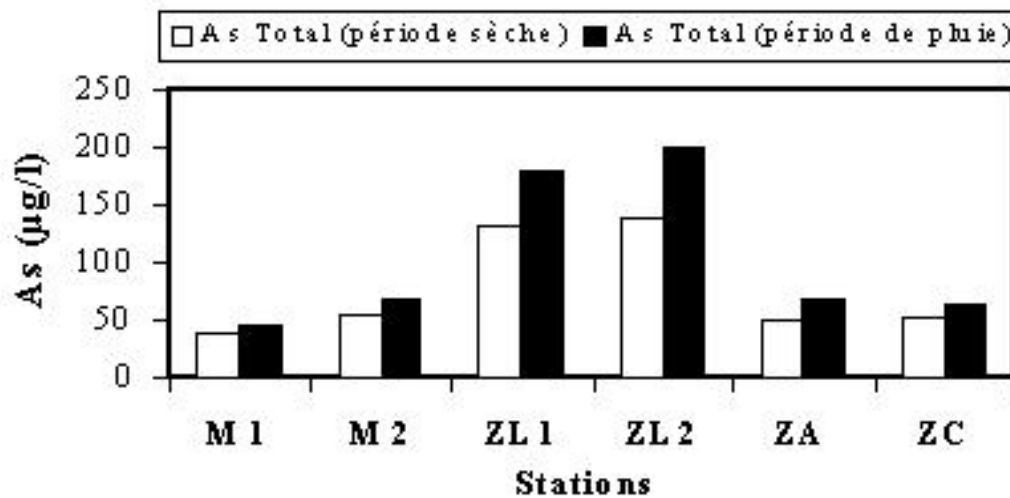


Figure 6. Variation spatio-temporelle des concentrations en As total de l'eau.
Spatio-temporal variation of total As concentrations in water.

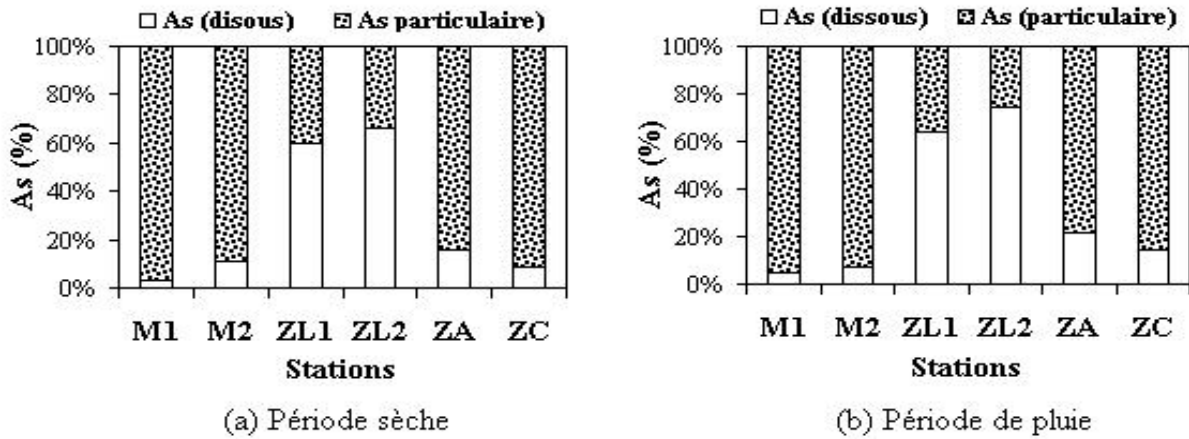


Figure 7. Variation spatiale du pourcentage de As dissous et particulaire; a) période sèche; b) période de pluie.
Spatial variation of the percentage of dissolved and particulate As; a) in the dry period; b) in the wet period.

électrique au tableau 2. Ces résultats sont regroupés par paires, l'environnement d'échantillonnage des stations M1 et M2, *i.e.* l'oued, se distinguant de l'environnement lacustre des autres stations, et la composition des lacs ZL1 et ZL2 se distinguant de celle des lacs ZA et ZC par une haute conductivité électrique, des concentrations d'As élevées, et d'As sous forme dissoute plutôt que particulaire. Ces paires appartiennent également à des faciès hydrogéochimiques différents (Figure 3). Pour faire progresser la discussion au-delà de ces regroupements « naturels » et faire ressortir les effets de la saison d'échantillonnage et du milieu échantillonné, toutes les stations sont comparées à elles-mêmes et à la station de référence M1. Ainsi, le tableau 2 présente pour chaque station le rapport des résultats obtenus en période de pluie sur ceux obtenus en période sèche (colonnes *Pluie/sec*) ainsi que le rapport des résultats de chacune des stations du centre minier sur ceux de la station M1, tant en période sèche qu'en période de pluie (colonnes *x ou y / M1*).

Dans l'ensemble, Pb total et As total augmentent entre données de période de pluie et données de période sèche, alors que CE diminue, avec quelques exceptions. L'importance des changements *Pluie/sec* est en effet très variable, avec des hausses par des facteurs allant de 1,1 à 9,8, et des baisses allant jusqu'à 0,6, selon le paramètre et la station échantillonnée. Le fait que le même élément, Pb, montre l'augmentation la plus forte (9,8 à M2) et la diminution la plus importante (0,6 à ZA) suggère que les variations de concentrations entre période sèche et période de pluie sont également assujetties à des contrôles s'exprimant de façons différentes suivant le type d'environnement échantillonné (oued M1-M2, lacs ZL1-ZL2 ou lacs ZA-ZC). En ce qui concerne les proportions de Pb et As particulaires, celles-ci varient de façon moins importante que les concentrations totales entre période de pluie et période sèche. Les proportions restent les mêmes ou ne diminuent que légèrement (au plus par un facteur de 0,8), y compris dans les lacs ZL1-ZL2 où la proportion d'As particulaire était

particulièrement basse.

L'effet saisonnier se manifeste de façon différente dans l'oued et dans les lacs. De période sèche à période de pluie, Pb total montre dans ZL1 et ZL2 des augmentations marquées par rapport à ZA et ZC (2,7 et 2,1 *vs.* 0,6 et 1,1), mais celles-ci ne sont pas aussi importantes que pour M1 et M2 (3,4 et 9,8). Par ailleurs, ZL1 et ZL2 se démarquent marginalement des autres stations par une plus grande augmentation de As total ($\geq 1,4$ *vs.* $\leq 1,4$) et une moins grande diminution de CE ($\geq 0,9$ *vs.* $\leq 0,9$).

Par rapport à la station de référence M1, ZL1 et ZL2 sont les stations les plus enrichies en As total ($\geq 3,4$ *vs.* $\leq 1,5$), les plus élevées en CE ($\geq 14,2$ *vs.* $\leq 3,1$) et, comme déjà noté, les plus pauvres en As particulaire ($\leq 0,4$ *vs.* $\geq 0,8$). L'enrichissement/appauvrissement de ces paramètres aux autres stations (M2, ZA, ZC) par rapport à M1 est beaucoup moins marqué que pour ZL1 et ZL2 et se compare en fait entre elles. Dans ces comparaisons relatives à M1, Pb total montre des variations à première vue paradoxales, puisqu'en sens opposé dans l'oued et dans les lacs. Ainsi, l'oued à M2 montre la plus faible augmentation de concentration de plomb de toutes les stations en période sèche (1,1 *vs.* 1,8 et plus), mais la plus forte en période de pluie (3,2 *vs.* 1,6 et moins). À l'opposé de l'oued, les stations des lacs ZA et ZC montrent les plus fortes augmentations de Pb total en période sèche (3,4 et 1,8) plutôt qu'en période de pluie. En période de pluie, on ne parle pas d'une augmentation faible, mais carrément d'une diminution importante (0,6 et 0,6).

Il découle de ce qui précède que le type d'environnement et les propriétés géochimiques générales permettent de distinguer assez facilement l'oued (M1-M2), les lacs ZL1-ZL2 et les lacs ZA-ZC. Il reste toutefois à déterminer pourquoi les lacs ZL1-ZL2 sont si différents des lacs ZA-ZC, pourquoi les variations de Pb, As et CE de période sèche à période humide ne s'expriment

le démontrer en admettant que, parmi les paramètres mesurés, CE reflète le mieux le transport en solution, car la conductivité électrique dépend essentiellement du contenu en ions dissous. De façon similaire, on suppose que Pb total reflète le mieux le transport particulaire, le cation Pb^{2+} se prêtant à une forte adsorption à pH neutre ou alcalin.

Suivant ces indicateurs, la prédominance du transport particulaire sur le transport dissous est bien démontrée par les stations M1 et M2 de l'oued. Le Pb total transporté augmente en effet par des facteurs de 3,4 et 9,8 de période sèche à période de pluie, alors que la charge dissoute dans l'eau de l'oued, dépeinte par CE, subit une dilution à 0,7-0,8 (Tableau 2). À l'opposé, la prédominance du transport dissous sur le transport particulaire est illustrée par les stations ZL1 et ZL2. La CE, déjà élevée, ne montre pratiquement pas d'effet de dilution malgré la pluie, les différences entre période sèche et période de pluie impliquant des facteurs de 1,0 et 0,9. Ceci suggère que les concentrations dans les apports de période de pluie sont comparables à celles prévalant déjà dans les lacs. Le transport dissous n'exclut pas le transport particulaire. Pour cette raison, les quantités de Pb total et As total augmentent, un peu plus pour Pb (2,7 et 2,1) que pour As (1,4 et 1,5). Pour leur part, les stations ZA et ZC sont caractérisées par des transports dissous et particuliers dans les deux cas relativement faibles. En effet, Pb total diminue (0,6) ou n'augmente que légèrement (1,1) en période de pluie, alors que CE diminue (0,7-0,9). Dans les deux cas, les effets de la dilution ont été plus forts que ceux du transport. On aura donc, qualitativement, pour M1-M2 : transport particulaire important, transport dissous réduit; pour ZL1 et ZL2 : transport dissous important, transport particulaire réduit; pour ZA et ZC : transport dissous réduit et transport particulaire réduit.

Il ressort donc que l'importance relative du transport dissous et du transport particulaire peut expliquer pourquoi les changements de Pb, As ou CE sont aussi variables par rapport à la station de référence M1. Ainsi, l'enrichissement de Pb total à la station M2, par rapport à la station M1 (*i.e.* M2/M1), bondit d'un facteur de 1,1 à un facteur de 3,2 de la période sèche à la période de pluie, alors que la CE n'augmente que de 1,2 à 1,5. Ceci est cohérent avec le fait que dans l'oued, le transport se fait surtout sous forme particulaire, comme le montraient les comparaisons pluie/sec en M2-M1, d'où augmentation de Pb total importante, par rapport à ce que peut connaître CE. Dans le même sens, on note qu'aux stations ZL1 et ZL2, CE augmente par des facteurs de 14,2 à 20,1 et de 20,4 à 27,9 par rapport à M1, de période sèche à période humide, alors que Pb total perd de l'importance, passant de 2,0 à 1,6 et de 2,0 à 1,3. Dans les lacs ZL1-ZL2, l'absence apparente de dilution dans les comparaisons pluie/sec suggérerait un transport surtout sous forme dissoute, d'où le bilan extrêmement favorable pour CE lorsque comparé

à la station M1, où le transport est plutôt particulaire. Enfin, dans le cas des lacs ZA et ZC, où le transport autant particulaire que dissous est mineur, il y a enrichissement en Pb total par rapport à M1 en période sèche (par 3,4 et 1,8) et appauvrissement en période humide (par 0,6 et 0,6). On peut spéculer que l'enrichissement est associé à une évaporation par la sécheresse, alors que l'appauvrissement résulte d'une dilution par les précipitations.

Le transport particulaire dominant dans l'oued est conciliable avec les manifestations météorologiques des périodes de pluie. La région de Zeïda connaît en effet des pluies orageuses et du ruissellement en nappes (NGADI, 1995). Dans la région immédiate des minéralisations et en particulier de ZL1 et ZL2, l'infiltration et la recharge des lacs sont accompagnées d'un transport dissous. La faible proportion d'As particulaire s'expliquerait par l'absence relative de substrat d'adsorption abondant et adéquat au cours d'un trajet plutôt court entre source et destination, comparée aux contextes de ZA-ZC.

5. CONCLUSION

Les résultats de cette étude de diagnostic sur la physico-chimie et sur la variation spatiale des concentrations et le transport dissous et/ou particulaire des éléments traces métalliques (Pb et As) dans les eaux de surface de la Haute Moulouya au niveau du centre minier Zeïda ont permis de faire une première évaluation de la salubrité des eaux de surface. L'étude a permis de mettre en relief une dégradation de la qualité physico-chimique des eaux superficielles et l'existence de stations extrêmement polluées par le plomb et l'arsenic. Il s'agit en particulier de l'oued Moulouya à la station M2 et des lacs des carrières ZL2, ZL1 et ZA. Le centre minier abandonné de Zeïda a donc un effet non seulement sur la qualité esthétique de l'environnement de la région, mais aussi sur la qualité des eaux de surface. Les apports en Pb et As dans les eaux de surface sont d'origine minière. En effet, les rejets miniers abandonnés sans végétalisation (halles et terrils) et les minéralisations dégagées et restées sur place subissent l'effet de l'érosion chimique et physique. Le lessivage et le transport des éléments traces sous forme dissoute et particulaire s'effectue d'une part vers le réseau hydrographique et l'oued Moulouya, qui se trouve ainsi dégradé, et d'autre part vers les lacs de carrières. Le cumul des polluants constitue un danger pour les riverains qui ne cessent d'utiliser l'eau des carrières pour différents usages : irrigation, consommation domestique, abreuvement du cheptel.

Des mesures doivent être prises pour protéger les riverains et l'environnement des nuisances du centre minier de Zeïda, au-delà d'une réhabilitation paysagère. La pollution émanant du centre minier constitue un risque pour les ressources hydriques du bassin de la Moulouya, dont l'épuisement des réserves avec la succession des années de sécheresse aggrave la situation. Les prévisions des ressources en eau pour l'an 2020, à l'échelle du bassin, font ressortir un déficit total de l'ordre de 267 millions de m³/an. La pollution émanant du district minier risque d'aggraver ce déficit par la réduction des quantités d'eau disponibles.

REMERCIEMENTS ET HOMMAGES

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'action intégrée N°188/STU/99 avec le laboratoire Hydrosociences de l'Université de Montpellier II, intitulée : « Le flux métallique entre la province Pb-Zn du Maroc oriental et la Méditerranée - Incidence sur la qualité des eaux de surface ». Nous tenons à remercier M. Marc Leblanc, directeur de l'équipe de géochimie du laboratoire Hydrosociences, CNRS de l'Université de Montpellier II, pour sa collaboration et pour nous avoir accueillis pour réaliser les analyses. Nous tenons également à rendre un grand hommage au professeur feu Mohamed El Hanbali directeur du laboratoire Ressources Minérales et Environnement, qui a initié cette recherche et qui n'a ménagé aucun effort pour son aboutissement, décédé en janvier 2005 suite à un accident survenu lors d'une sortie sur le terrain dans la zone même de l'étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGGETT J. et G.A. O'BRIEN (1985). Detailed model for the mobility of arsenic in lacustrine sediments based on measurements in Lake Ohakuri. *Environ. Sci. Technol.*, 19, 231-238.
- AMADE E. (1965). Les gisements de plomb de Zeïda et de Boumia. Notes et Mémoires, *Ser. Géol., Maroc*, Rabat, Maroc, 181, 175-184.
- AZCUE J.M., J.O. NRIAGU et S. SCHIFF (1994). Role of sediment porewater in the cycling of arsenic in a mine-polluted lake. *Environ. Int.*, 20, 517-527.
- BRANNON J.M. et Jr. W.H. PATRICK (1987). Fixation, transformation, and mobilization of arsenic in sediments. *Environ. Sci. Technol.*, 21, 450-459.
- B.R.G.M. (1999). Les résidus miniers français : typologie et principaux impacts environnementaux potentiels. *Tech. Ind. Min.*, 3, 3^e trim., 77-110.
- CABOI R., R. CIDU, L. FANFANI, P. LATTANZI et P. ZUDDAS (1999). Environmental mineralogy and geochemistry of the abandoned Pb-Zn Montevecchio-Ingurtosu mining district, Sardinia, Italy. *Chron. Rech. Min.*, 534, 21-28.
- COMBE. M. et M. SIMONOT (1971). Ressources en eaux du Maroc : La Haute Moulouya, le Sillon d'Itzer – Enjil et le massif de BouMia – Aouli. Notes et Mémoires, *Ser. Géol. Maroc*, Rabat, Maroc, 231, 193-201.
- D.M.R. (1990). Direction des mines Rabat Maroc. Gisement de plomb de Zeïda. Panorama de l'industrie minière. Tome 2, 24-236.
- EARY L.E. (1999). Geochemical and equilibrium trends in mine pit lakes. *Appl. Geochem.*, 14, 963-987.
- ELBAZ-POULICHET F., A. NAGY et T. CSERNY (1997). The distribution of redox sensitive elements (U, As, Sb, V and Mo) along a river-wetland-lake system (Balaton region, Hungary). *Aqua. Geochem.*, 3, 267-282.
- EL JAOUANI L. (2001). Étude géologique et géochimique des gisements plombifères de la boutonnière d'Aouli (Aouli, Zeïda, Mibladen) Haute Moulouya (Maroc). Thèse de Doctorat, Univ. Mohamed V - Agdal, Rabat, Maroc, 221 p.
- EMBERGER A. (1965a). Introduction à l'étude des minéralisations plombifères de la Haute Moulouya, Maroc. Notes et Mémoires, *Ser. Géol. Maroc*, 181, 167-171.
- EMBERGER A. (1965b). Éléments pour une synthèse métallogénique du district plombifère de la Haute Moulouya. Notes et Mémoires, *Ser. Géol. Maroc*, 181, 205-244.
- FOUCAULT A. (1995). Dictionnaire de géologie. 4^e éd., Masson, Paris, 324 p.
- NGADI M. (1995). Précipitations et écoulements dans le bassin versant de la Moulouya (Maroc). Thèse de Doctorat, Univ. Montpellier III, France, 333 p.
- N.M. (2002). Norme marocaine de qualité des eaux. *Bulletin officiel*, N° 5062.

PELLET R. (1963). La laverie-pilote de flottation de « Plomb Moulouya ». *Mines et Géol.*, 21-22, 135-143.

SAVAGE K.S., T.N. TINGLE, P.A. O'DAY, G.A. WAYCHUNAS et D.K. BIRD (2000). Arsenic speciation in pyrite and secondary weathering phases, Mother Lode Gold District, Tuolumne County, California. *Appl. Geochem.*, 15, 1219-1244.

SCHINDLER D.W. (1986). The significance of in-lake production of alkalinity. *Water Air Soil Pollut.* 30, 931-944.

SCHMITT J.M. (1976). Sédimentation, paléo altération, géochimie et minéralisation en plomb de la série Triasique de Zeïda. Thèse de Doctorat, École nationale supérieure des mines, Paris, 110 p.

SMEDLEY P.L. et D.G. KINNIBURGH (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl. Geochem.*, 17, 517-568.

WHO (2004). World Health Organisation. Guidelines for drinking water quality. 3e édition, Volume 1, Recommendations, Annexe 4 : Chemical summary tables, 488-493.

WILSON J.D., E. BRAUNWALD, K.J. ISSELBACHER, R.G. PETERSDORF, J.B. MARTIN, A. FAUCI et R. K. ROOT (1993). Principes de médecine interne. HARRISON FLAMMARION MÉDECINE SCIENCES, PARIS (Éditeur), 12^e édition, Tome 2, 2182-2185.