

Impact d'un site minier abandonné sur l'environnement : cas de la mine de Zeïda (Haute Moulouya, Maroc)

Moulay Laârabî EL HACHIMI¹, Mohamed EL HANBALI², Mohamed FEKHAOUI³,
Abdelhak BOUABDLI¹, Laïla EL FOUNTI¹ & Nadia SAÏDI¹

1. Université Ibn Tofail, Faculté des Sciences, Laboratoire de Géosciences appliquées, UFR « Géoressources et Environnement », B.P.133, 14000 Kénitra, Maroc. e-mail : elhachimi3@yahoo.fr

2. Université Ibn Tofail, Faculté des Sciences, UFR « Géosciences de l'environnement », Kenitra.

3. Université Mohammed V – Agdal, Institut Scientifique, Département de Zoologie et Ecologie animale, B.P. 703 Agdal, Rabat.

Résumé. Le diagnostic de l'état actuel de l'environnement a été réalisé à proximité du district minier de Zeïda, abandonné sans réhabilitation dans la Haute Moulouya (Maroc). La contamination des eaux de surface, des sédiments et des résidus miniers par les éléments traces métalliques a été étudiée au voisinage du centre minier abandonné. Des échantillons d'eau et de sédiments ont été prélevés le long de l'oued Moulouya qui draine ce district minier et à partir de lacs de carrières. Des échantillons de résidus miniers de traitement ont été également prélevés. Les analyses ont permis de mettre en relief le degré élevé de pollution par Pb et As avec des valeurs maximales respectives de 5547 g/t et 192,2 g/t pour les résidus miniers, 2277,4 mg/kg et 34,01 mg/kg pour les sédiments, et 130 µg/l et 199,6 µg/l pour les eaux de surface. Les concentrations dans les eaux dépassent largement dans certaines stations les normes de potabilité (norme de l'OMS, norme marocaine), alors que dans les sédiments, les teneurs en Pb dépassent celle considérée comme naturelle, et les teneurs en As dépassent la moyenne mondiale des sédiments des rivières. Les résultats montrent la dégradation de l'environnement au voisinage du centre minier abandonné. Les résidus de traitement constituent la principale source de pollution et les sédiments constituent une réserve potentielle de polluants.

Mots clés : Maroc, mine de Zeïda, environnement, éléments traces métalliques, résidus miniers, eaux de surface.

Impact of an abandoned mining site on the environment: case of the Zeïda mine (High Moulouya area, Morocco).

Abstract. The diagnosis of the state of the environment has been studied in the vicinity of the Zeïda mining district, abandoned without rehabilitation in the High Moulouya area (Morocco). The metallic trace elements contamination of surface waters, sediments and mining residues were evaluated in the vicinity of the abandoned mining center. Samples of water and sediments were collected along the Moulouya river that drains this mining district, and also from quarry lakes. Samples of mining residues of treatment were also collected. Analyses show a high degree of pollution by Pb and As in the mining residues, in the sediments and waters with maximal values of respectively 5547 g/t and 192.2 g/t for the mining residues, 2277.4 mg/kg and 34.01 mg/kg for the sediments and 130 µg/l and 199.6 µg/l for surface waters. Concentrations in waters in some stations largely exceed the norms of potability (W.H.O. norm, Moroccan norm) whereas in the sediments the contents of Pb exceed the content considered as natural in sediments; the contents in As exceed the world average for fluvial sediments. The mining residues constitute the main source of pollution and the sediments constitute a potential reserve of pollutants.

Key-words: Morocco, Zeïda mine, environment, metallic trace elements, mining residues, surface waters.

INTRODUCTION

L'activité minière a été de longue date l'un des piliers fondamentaux de l'économie marocaine, et le secteur des métaux a connu un développement substantiel depuis 1919 jusqu'en 1982. La production marocaine de plomb avait dépassé en 1980 les 170 000 t de concentré, représentant 3,5 % de la production mondiale (Wadjinni 1998). Les mines de la Haute Moulouya (districts Aouli – Mibladen – Zeïda) ont largement contribué à la production nationale.

Situé sur les berges de l'oued Moulouya, le district minier de Zeïda (Fig. 1), d'une superficie de plus de 600 km², a été de 1972 à 1985 le siège d'une exploitation intense à ciel ouvert de minerai de plomb.

La mine de Zeïda est située dans une vaste plaine de 1300 m d'altitude. La région, à climat aride froid à tendance montagnarde (précipitations moyennes annuelles de 300 mm), est caractérisée par de fortes pluies pendant les mois d'avril et de mai. L'oued Moulouya à Zeïda, d'un débit moyen annuel de 5,5 m³/s, draine des terrains de pente faible (0,7 %) (Ngadi 1995). À Zeïda, la minéralisation de

plomb se situait sous des couches de stériles de 20 à 50 m, et se répartissait dans des panneaux en bancs superposés de 5 à 7 m d'épaisseur (Schmitt 1976). Les gîtes stratiformes sont situés dans des arkoses du Permo-Trias (Emberger 1965, Amade 1965, El Jaouani 2001). La minéralisation, dont la teneur en Pb est supérieure à 3 %, est sous la forme de cérusite à 70 % et de galène à 30%, associées à la barytine rose très abondante, et à d'autres minéraux d'oxydes de Pb (D.M.R. 1990). Les arkoses constituent le type lithologique auquel appartient la totalité du minerai économiquement exploitable (Schmitt 1976). Au démarrage de l'exploitation, les réserves en minerai ont été estimées à 10 Mt à 3,2 % Pb à exploiter à ciel ouvert (Pellet 1963). La laverie de Zeïda, d'une capacité de 1,4 Mt/an, assurait le traitement du minerai par concassage (à 250 mm), broyage (à 0,3 mm), flottation et filtration. Le sulfhydrate de sodium, l'amylxanthate, le silicate de sodium et l'huile de pin ont été utilisés comme réactifs chimiques pour le traitement. Après 14 années d'exploitation, la production a atteint 630 172 t de concentré de plomb de 40 à 70%.

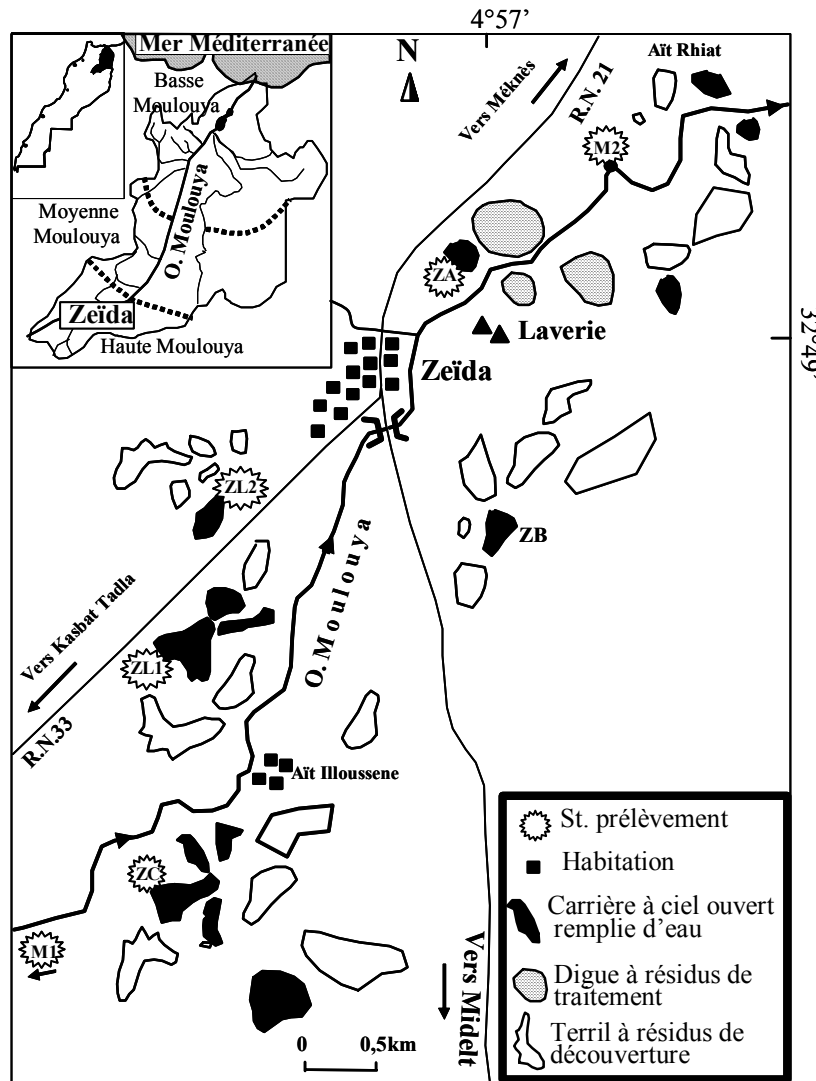


Figure 1. Carte de situation des points de prélèvement dans la zone de Zeïda. M1, station de référence dans l'oued Moulouya située à 30 km de la mine ; M2, station dans l'oued Moulouya au niveau de la mine non loin des digues ; ZL1, ZL2, ZA, ZB, ZC, stations dans des lacs de carrière.

Comme toute industrie extractive, l'exploitation des ressources minérales (extraction et valorisation) dans la région de Zeïda, a probablement généré à tous les stades un certain nombre d'impacts environnementaux et a porté atteinte aux différents éléments de l'environnement par ses effets directs et indirects. En effet, la protection de l'environnement n'était pas une préoccupation prioritaire au cours de l'activité de la mine, et même après l'arrêt du centre minier, le district minier a été abandonné sans être réhabilité. D'ailleurs, dans le code minier marocain, il n'y a pas de dispositions obligeant tout titulaire d'actes miniers de prendre des mesures nécessaires pour parer aux conséquences pouvant découler de son activité. La contamination des eaux de surface, des sédiments, des sols et des plantes par l'activité minière passée a été démontrée au voisinage du centre minier d'Aouli, abandonné aussi dans la Haute Moulouya (Saïdi *et al.* 2002, Bouabdli *et al.* 2004).

Notre étude, qui avait pour objectif d'étudier l'incidence du centre minier abandonné de Zeïda sur l'environnement, a porté, d'une part, sur le diagnostic de l'état actuel de

surface et des nuisances majeures causées par l'exploitation minière et par l'abandon sans réhabilitation du centre minier, et d'autre part, sur l'évaluation du niveau de contamination par les éléments traces métalliques (ETM) toxiques des eaux de surface, des sédiments et des résidus de traitement au voisinage du centre minier. Nous présentons dans cet article les résultats des analyses du plomb et de l'arsenic en particulier.

MATERIELS ET METHODES

Stations d'échantillonnage. Des échantillons d'eau, de matière en suspension et de sédiments ont été prélevés au niveau du centre minier de Zeïda dans l'oued Moulouya (Fig. 1 ; M1, station de référence située à 30 km en amont de la mine, et M2 au niveau de la mine non loin des digues) et dans des lacs de carrières (ZL1, ZL2, ZA, ZB, ZC). Les missions d'échantillonnage ont été réalisées au cours de l'année 2002 en période sèche (février) et en période de pluie (avril). Des résidus de traitement ont été prélevés au sommet de la grande digue.

Concentration des ETM dans l'eau. Dans chaque station, les échantillons d'eau prélevés ont été immédiatement filtrés sur des filtres 0,45 µm propres montés sur un appareil Nalgène_R. Les filtrats ont été répartis dans des flacons en polyéthylène destinés aux différentes analyses et conservés dans HNO₃ 4 % à 4 °C. Les paramètres pH, T, C.E., Eh, des eaux ont été mesurés lors des prélèvements.

Concentration des ETM dans la phase particulaire. Les filtres avec la charge particulaire ont été séchés au laboratoire en salle blanche à température ambiante et conservés dans un endroit sec jusqu'au moment de la minéralisation.

Concentration des ETM dans les sédiments. Dans chaque station, des échantillons de sédiment ont été prélevés à l'aide d'une benne à main à environ 10 cm de l'interface eau / sédiment, sur les berges de l'oued Moulouya et dans les lacs de carrière. Au laboratoire en salle blanche, les échantillons ont été séchés à l'air, broyés et tamisés à 0,5 mm puis attaqués à froid pendant 168 h par l'acide nitrique ultra-pur (HNO₃).

Concentration des ETM dans les résidus des digues. Les résidus de traitement ont été prélevés dans des sacs en plastique propres au sommet de la grande digue à résidus à environ 40 cm de la surface puis broyés et conservés jusqu'au moment de la minéralisation qui est réalisée de la même façon que pour les sédiments.

Les analyses des éléments traces ont été effectuées sur l'eau filtrée, sur la phase particulaire des filtres, sur les sédiments et sur les résidus de traitement, par ICP-MS au Laboratoire d'hydrosciences de l'Université de Montpellier II (France).

RESULTATS ET DISCUSSION

Etat actuel de l'environnement au voisinage du centre minier de Zeïda

Au voisinage du centre minier de Zeïda, la perturbation du milieu suite aux modifications topographiques est visible. En effet, le paysage est encombré par les éléments suivants (Fig. 1) :

– Des résidus de traitements en digues sans végétation, d'un volume total d'environ 12 Mt, et dont la hauteur dépasse 10 m pour chaque digue ; ils présentent des teneurs très élevées en éléments traces métalliques. De granulométrie sableuse et non stabilisés, ils peuvent constituer une source de nuisances pour les habitants une fois sous forme de retombées aériennes après transport par le vent. A Zeïda, les résidus de traitement surmontent un substrat marnodolomitique imperméable. En été, les circulations d'eau

dans ces résidus sont essentiellement de subsurface, alors qu'en hiver ou après de fortes précipitations, le ruissellement de surface domine. Les pluies qui s'abattent sur ces résidus et sur le substrat nu s'écoulent immédiatement et sont collectées par l'oued Moulouya et les lacs de carrières.

– Une dizaine de terrils de forme conique et dépassant 20 m de hauteur chacun, éparpillés, sans couvert végétal, et d'un volume estimé à 70 Mt pour l'ensemble. Il s'agit de francs de découverte stériles faiblement minéralisés (marnes, argilites rouges, grès argileux rouges, grès arkosique rouge, grès fins clairs), physiquement stables, mais affectés par de profondes ravines créées par des écoulements d'eaux superficielles. Ces terrils sont de grand volume et de couleur rouge ; ils nuisent à l'esthétique du paysage.

– Une dizaine de carrières profondes ; il s'agit d'excavations d'une superficie de 1 ha à 10 ha chacune, remplies d'eau de la nappe et de ruissellement d'un volume estimé à plusieurs Mm³. Ces carrières forment ainsi des lacs (Fig. 1) : ZL1 (2 Mm³), ZL2 (0,5 Mm³), ZA (1 Mm³), ZB (10 000 m³) et ZC (3 Mm³). Ces lacs sont pour la plupart pérennes, sauf pour ZB qui s'assèche en été. Chaque lac minier se situe au pied d'une digue ou d'un terril. Les mesures et les analyses réalisées révèlent des eaux de faciès chloruré sodique pour ZL1 et ZA, hyperchloruré sodique pour ZL2, et bicarbonaté calcique pour ZB et ZC et à la station M2 sur l'oued Moulouya. Les carrières très profondes restées sans remblayage peuvent constituer un risque pour les riverains et une nuisance pour l'esthétique du milieu. Les eaux des lacs de carrières ainsi que celles de l'oued Moulouya sont utilisées par les riverains pour la boisson, l'irrigation et l'abreuvement du cheptel. Celles du lac de carrière ZC sont distribuées sans traitement préalable dans le réseau du village de Zeïda (3 000 habitants).

– Des installations de surface : ateliers, laveries, matériel abandonné. L'ensemble constitue un risque pour les riverains.

Contamination des résidus de traitements par les éléments traces métalliques

Les analyses des résidus de traitement formant les digues de la région de Zeïda ont révélé des teneurs moyennes en ETM (Pb, Zn, Cu, Cd, Ba, As) excessivement élevées par comparaison avec les teneurs moyennes normales dans la croûte terrestre (Foucault 1995) (Tab. I). Ces fortes teneurs, résultat des processus de concentration dans les filières de traitement et d'enrichissement des minerais exploités (galène et cérusite) et des minerais associés (barytine, chalcocite, malachite, chalcopyrite.....), déterminent la

Tableau I. Teneurs moyennes des éléments traces des résidus miniers de Zeïda comparées au Clarke.

Élément trace métallique	Pb	Zn	Cu	Cd	As	Ba
Teneur moyenne dans la croûte terrestre (g/t)	16	101	62,5	0,15	5	250
Teneur moyenne dans le résidu minier (g/t)	5547	686	119	1,3	192,2	5835

Tableau II. Concentrations de Pb et As dans les eaux en période sèche (février) et en période pluvieuse (avril)

Station	Echantillons de la saison sèche					Echantillons de la saison de pluie				
	pH	Pb (Total) µg/l	As (Total) µg/l	% Pb particulaire	% As	pH	Pb (Total) µg/l	As (Total) µg/l	% Pb particulaire	% As
M1	8	12,01	50,08	97	96	7,7	20,1	58,03	97	96
M2	8,2	13,3	53,55	98	95	7,8	130	67,56	98	96
ZL1	8,7	23,56	164,93	78	34	8,7	64,1	179,59	88	39
ZL2	8,9	24,28	197,68	85	26	9,1	51,2	199,6	71	27
ZA	9,2	40,81	72,58	92	85	9,4	25,7	68,32	89	84
ZB	8,5	46	60,74	49	89	8,6	58	66,63	99	93
ZC	7,9	21,28	60,08	96	92	8,2	24,1	64,62	84	93

capacité polluante chimique des résidus de traitement de Zeïda. Ceux-ci peuvent ainsi former une source de polluants.

Les digues à résidus de traitement à Zeïda, situées à quelques mètres sur les berges et sur le parcours de l'oued Moulouya et à proximité des lacs de carrières (Fig. 1), sont prédisposées à l'altération et au transport par les eaux météoriques et le vent. La vitesse d'érosion et la quantité de matériel déplacée dépendent à la fois des caractéristiques du résidu (taille des particules, humidité propre,...) et du lieu de stockage (forme, position dans le bassin versant,...), ainsi que de l'intensité des facteurs climatiques auxquels il est soumis (pluies, vents, régime des températures,...) (B.R.G.M. 1999). Constitués de particules de granulométrie sableuse (87,7 %), contenant un pourcentage très faible en matière organique (0,07 %), les résidus de traitement à Zeïda, disposés en tas aplanis en surface et découverts, sont de stabilité physique faible, ce qui en fait des matériaux exposés à l'altération superficielle. Ces résidus nus peuvent subir les effets d'une intense érosion hydrique et/ou éolienne, et peuvent alors être transportés et être dispersés et atteindre les ressources en eaux et les sols avoisinants. En effet, la région de la Haute Moulouya connaît des pluies orageuses et des ruissellements en nappe, ainsi que des vents violents que ce soit en été ou en hiver (Ngadi 1995). L'évacuation des ETM à partir des résidus peut être réalisée en période de pluie comme en période sèche.

En période sèche, la déflation et le transport des particules de résidus peuvent être réalisés par action éolienne. L'envol en l'air de particules fines de minéraux métalliques à partir des résidus nus peut être important. Le transfert d'éléments traces toxiques en phase particulaire vers les points d'eau et les sols avoisinants peut être réalisé.

En période pluvieuse, les fortes pluies instantanées, orageuses et fréquentes que connaît la région donnent un ruissellement en nappes et des crues. Les résidus de traitement au voisinage du centre minier de Zeïda subissent alors le lessivage et peuvent libérer des ETM dans l'eau. Le transport de ces ETM en phase dissoute et particulaire vers les cours d'eau avoisinants est inévitable en raison du substrat marno-dolomitique imperméable que surmontent les résidus miniers.

D'un autre côté, les résidus de traitement renferment des teneurs intéressantes en éléments traces constituant ainsi des réserves importantes justifiant leur revalorisation. En effet, des récupérations peuvent être réalisées, en

particulier pour le plomb métal, le baryum, le cuivre et le zinc dont les tonnages atteignent respectivement 66 564 t, 70 020 t, 1 424 t et 8 233 t.

Pollution par Pb et As des eaux de surface de la région de Zeïda

Les concentrations en éléments traces Pb et As dans les eaux de surface de la région de Zeïda (Tab. II), nettement variables d'une station à l'autre, sont en général supérieures aux concentrations mesurées à la station M1 (station de référence) située à 30 km sur l'oued Moulouya en amont du centre minier (Fig. 1). Les concentrations de l'anion métalloïde As sont en général supérieures aux concentrations du cation métal Pb, que ce soit pour les eaux alcalines de l'oued que pour celles des lacs miniers. Il s'agit de deux éléments qui évoluent différemment en fonction des valeurs du pH. Selon Eary (1999), les cations métalliques (Pb, Zn, Cd, Cu,...) montrent des concentrations élevées dans les lacs miniers acides, alors que les anions métalloïdes (As et Se) sont généralement à des concentrations élevées dans les lacs miniers alcalins.

Pb et As sont en général sous forme particulaire dans l'eau de toutes les stations étudiées (Tab. II), que ce soit en période sèche ou en période de pluie, exception faite pour As dans les lacs ZL1 et ZL2, surtout sous forme dissoute pendant les deux périodes. Selon Eary (1999), dans les lacs miniers à pH alcalin, l'adsorption d'un oxyanion tel que As est minime et la solubilité est élevée ; inversement, pour les cations métalliques tels que Pb et Cd, la solubilité est faible et l'adsorption est élevée. Ces phénomènes s'observent dans les eaux des lacs miniers de Zeïda dont le pH est neutre à légèrement alcalin ($7 < \text{pH} < 8$). Ceci peut être dû à la présence de minéraux alcalins qui permettent de tamponner les eaux (Schindler 1986). En effet, d'une part, le minerai à Zeïda est essentiellement carbonaté constitué de cérusite à 70 % dans des arkoses du Permo-Trias, et d'autre part les eaux de surface ruissellent sur une couverture marno-dolomitique et calcaire et drainent les résidus miniers à pH alcalin (pH eau = 8,4) ; de même, à Zeïda, l'oxydation et la lixiviation des stériles exposés à l'air et aux eaux météoriques ne génèrent pas d'acides. Les phénomènes liés au drainage minier acide n'ont pas été observés. Le minerai primaire à Zeïda contient peu de pyrite et de chalcopryrite (Pellet 1963, Amade 1965), ce qui indique une exportation limitée des éléments traces métalliques en solution à partir des résidus de traitement.

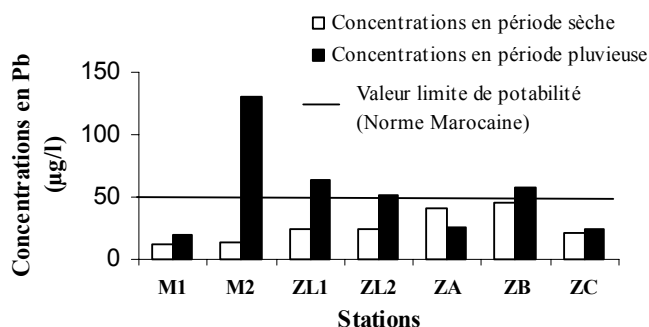


Figure 2. Concentrations de Pb total ($\mu\text{g/l}$) dans les eaux de surface au voisinage de la mine en période sèche et en période pluvieuse comparées à la valeur limite de potabilité de la Norme Marocaine .

Plomb

Dans les stations situées au niveau du centre minier Zeïda, les concentrations en Pb total (dissous et particulaire) dans l'eau (Tab. II ; Fig. 2) sont en général supérieures aux teneurs enregistrées à la station M1 aussi bien en période de pluie qu'en période sèche. Ceci peut être le résultat de l'impact de la mine et des résidus miniers en état d'abandon sur les eaux de surface. En effet, la teneur maximum en Pb a été mesurée en période de pluie à la station M2 (130 $\mu\text{g/l}$) située sur l'oued Moulouya au niveau de la mine. Les concentrations en Pb sont aussi nettement élevées dans les eaux des lacs miniers. Les concentrations en Pb dans l'eau de l'oued Moulouya et des lacs miniers sont élevées en période de pluie et sont supérieures à celles enregistrées en période sèche.

Le plomb dans l'eau est surtout sous forme particulaire pour toutes les stations aussi bien en période de pluie qu'en période sèche (Tab. II) ; en effet, il est presque à 100 % particulaire à la station M2 située sur l'oued, alors que presque 80 % du Pb dans l'eau des lacs de carrières est sous forme particulaire, bien qu'il s'agisse de milieux fermés et non agités. Ces teneurs importantes peuvent être le résultat du lessivage des résidus miniers de traitement abandonnés riches en ETM. En période sèche, les teneurs élevées en Pb particulaire des eaux de surface de la région de Zeïda peuvent résulter du vannage des résidus miniers et du transport éolien des particules des minerais de plomb des résidus vers les cours d'eau. D'autre part, les caractéristiques physiques et chimiques des résidus miniers nus de Zeïda les rendent plus susceptibles de se déplacer dans l'environnement et d'agir comme sources de polluants. En effet, la stabilité d'une digue ou d'un terril, la carence en substances organiques favorisant la colonisation végétale, le contenu en éléments toxiques, rend le résidu susceptible d'agir comme source de contaminants chimiques de la chaîne biologique (B.R.G.M. 1999).

Les eaux de l'oued Moulouya au voisinage du centre minier de Zeïda s'avèrent nettement polluées en période de pluie. Les apports en Pb à partir de la source minière, surtout en périodes de pluie, placent la Moulouya au niveau du centre minier Zeïda parmi les systèmes les plus pollués par Pb : la concentration en Pb dans l'eau à la station M2 (130 $\mu\text{g/l}$) dépasse largement la concentration moyenne des eaux

naturelles douces non contaminées (0,2 $\mu\text{g/l}$) (Trefry & Presley 1976) et dépasse aussi la concentration moyenne des eaux douces naturelles (3 $\mu\text{g/l}$) (Bowen 1979). Du point de vue qualité, les teneurs en Pb des eaux de l'oued Moulouya (station M2) et des lacs de carrières ZL1, ZL2 et ZB au niveau de la mine de Zeïda en période de pluies sont au-delà des normes de potabilité (norme O.M.S. (10 $\mu\text{g/l}$)) (W.H.O. 1998) ; Norme marocaine (50 $\mu\text{g/l}$) (N.M. 2002) (Fig. 2). Selon la Norme marocaine, il s'agit d'eaux de surface de qualité moyenne en période sèche, et mauvaise en période de pluie. Selon la même norme, ces eaux au niveau de la mine de Zeïda nécessitent un traitement physique et chimique et une désinfection pour la production d'eau potable. Néanmoins, selon la même norme et suite à la concentration en Pb, les eaux de surface au niveau de Zeïda peuvent être utilisées pour l'irrigation ($[\text{Pb}] < 5\,000\ \mu\text{g/l}$). Il en est de même pour les eaux des lacs de carrière ZL1, ZL2 et ZB en période de pluie.

Arsenic

Comme pour Pb, les concentrations en As total dans les eaux des stations situées au niveau du centre minier de Zeïda sont en général supérieures aux teneurs enregistrées à la station M1 aussi bien en période de pluie qu'en période sèche (Tab. II, Fig. 3). Ceci est peut être dû à l'impact de la mine et des résidus miniers sur les eaux de surface au voisinage du centre minier. Les concentrations en As dans l'eau en période de pluie sont en général plus importantes qu'en période sèche pour toutes les stations situées au voisinage de la mine, avec un maximum en période de pluie dans les lacs de carrières en ZL2 et ZL1.

L'arsenic est surtout sous forme particulaire aussi bien en période de pluie qu'en période sèche (Tab. II). En effet, il est presque à 100 % particulaire à la station M2 située sur l'oued Moulouya et à plus de 70 % dans les eaux des lacs de carrières ZA et ZC. Pour les eaux des lacs ZL1 et ZL2, qui montrent des teneurs élevées en As, ce dernier est surtout sous forme dissoute (plus de 60 %) que ce soit en période de pluie ou en période sèche. Le comportement de As dans l'eau est contrôlé par le pH et le potentiel rédox (Eh) de l'eau (Vink 1996, Moreno *et al.* 1999).

Les teneurs importantes en As dissous, et surtout particulaire, des eaux de surface au niveau du centre minier en période de pluie peuvent résulter du lessivage des

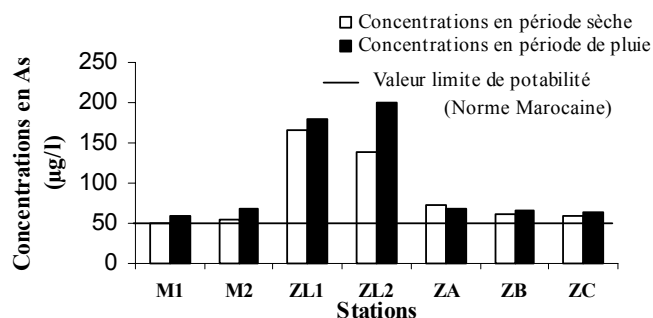


Figure 3. Concentrations de As total dans les eaux de surface au voisinage de la mine en période sèche et en période pluvieuse ($\mu\text{g/l}$) comparées à la valeur limite de potabilité de la norme marocaine.

résidus miniers constitués de sables fins et de poussières, et dont le lieu de stockage est mal conçu et non réaménagé. En étiage, un apport éolien peut résulter des résidus miniers. La granulométrie fine et l'homogénéité de la taille des particules des résidus des digues les rendent plus mobiles, que ce soit sous l'effet des vents violents dans cette région découverte, que sous l'effet des eaux de ruissellement, surtout lors des crues annuelles.

Ainsi, les apports en As à partir de la source minière placent l'oued Moulouya au niveau de Zeïda parmi les cours d'eau les plus pollués. En effet, les eaux de la Moulouya au niveau de la station M2 sont riches en As, et les teneurs enregistrées dans cette station dépassent d'une part la valeur limite dans les eaux douces, estimée à 0,45 µg/l (Casati 1999), et d'autre part la teneur maximale autorisée dans l'eau potable (10 µg/l) (W.H.O. 1998). La concentration en As à la station M2 dépasse la concentration moyenne des eaux des rivières à l'échelle mondiale (1 à 25 µg/l) (Bowen 1979, Ferguson 1991, Baur & Onishi 2001). La concentration en As dans les eaux des lacs de carrières dépasse la concentration moyenne en As des eaux des lacs à l'échelle mondiale (1 à 50 µg/l) (Bowen 1979, Ferguson 1991, Baur & Onishi 2001).

Du point de vue qualité, la comparaison des concentrations en As des eaux de surface au niveau de Zeïda (eaux des carrières et de l'oued Moulouya) avec la Norme marocaine montre qu'il s'agit d'eaux de surface de mauvaise qualité, que ce soit en période sèche ou en période de pluie (Fig. 3). Ces eaux nécessitent un traitement physique, chimique et une désinfection pour la production d'eau potable ([As] > 50 µg/l) (N.M. 2002). Selon la même norme, ces eaux restent favorables à l'irrigation ([As] < 100 µg/l), sauf pour les eaux des lacs ZL1 et ZL2 qui sont non potables et nuisibles à l'irrigation, que se soit en période sèche ou en période de pluie.

Contamination des sédiments par les éléments traces (Pb et As)

Plomb

Les résultats des analyses du métal total dans les sédiments (Tab. III) montrent que les teneurs en Pb dans les sédiments superficiels des différentes stations situées au niveau du district minier Zeïda sont élevées en période de pluie et en période sèche, aussi bien pour les stations des lacs de

carrières que pour la station M2 située sur l'oued Moulouya. Ces teneurs en Pb sont supérieures à celles enregistrées dans les sédiments de la station M1 située en amont du centre minier. D'autre part, les teneurs en Pb des sédiments des lacs de carrières sont nettement supérieures aux teneurs en Pb enregistrées à la station M2 en période sèche et aussi en période de pluie. Ces teneurs atteignent leur maximum au niveau du lac de carrière ZA en période sèche et en période de pluie, soit respectivement 1814,92 µg/g et 2277,4 µg/g.

Les teneurs en Pb dans les sédiments des stations situées au niveau du centre minier Zeïda, et en particulier celles enregistrées dans les sédiments des lacs de carrières, sont en général supérieures aux teneurs considérées comme naturelles dans les sédiments qui sont de 19 µg/g (Bowen 1979) (Fig. 4). Cette augmentation des teneurs au voisinage de la mine peut être attribuée aux effets des résidus de traitement très riches en Pb, abandonnés sans couvert végétal, qui contribuent probablement de manière directe par érosion à l'augmentation des teneurs en Pb des sédiments des lacs et de l'oued.

Arsenic

L'analyse du métal total montre que les teneurs en As des sédiments superficiels (Tab. III) des différentes stations situées au niveau du centre minier Zeïda sont élevées en période de pluie et en période sèche, aussi bien pour les stations des lacs de carrières que pour la station M2 située sur l'oued Moulouya. Ces teneurs sont supérieures à la teneur en As des sédiments à la station M1. D'autre part, les teneurs en As des sédiments des lacs de carrières sont supérieures aux teneurs en As des sédiments à la station M2 de l'oued en période sèche. Ces teneurs atteignent leur maximum à la station ZL2 en période sèche et en période de pluie avec respectivement 27,14 µg/g et 34,01 µg/g.

Les teneurs en As dans les sédiments des stations situées au niveau du centre minier de Zeïda, en particulier celles enregistrées dans les sédiments des lacs de carrières, sont en général supérieures à la moyenne mondiale des sédiments des rivières, et qui sont de 5 µg/g (Martin & Whitfield 1983) (Fig. 4). Elles sont aussi supérieures à la teneur moyenne de As dans la croûte continentale : 1,7 µg/g (Wedepohl 1995). Ces fortes teneurs peuvent être expliquées par un effet de contamination à partir des résidus miniers riches en As abandonnés sans réhabilitation.

Tableau III. Teneurs en Pb et As (µg/g) dans les sédiments en période sèche (février) et en période pluvieuse (avril).

Station	Echantillons de la saison sèche			Echantillons de la saison de pluie		
	pH	Pb	As	pH	Pb	As
M1	8	4,5	2,3	7,7	3,2	1,7
M2	8,2	20,18	7,54	7,8	18,87	6,95
ZL1	8,7	114,56	14,27	8,7	125,85	15,12
ZL2	8,9	324,69	27,14	9,1	2006,48	34,01
ZA	9,2	1814,92	18,19	9,4	2277,4	20,08
ZB	8,5	376,39	10,8	8,6	149,27	9,39
ZC	7,9	26,84	8,87	8,2	24,76	8,88

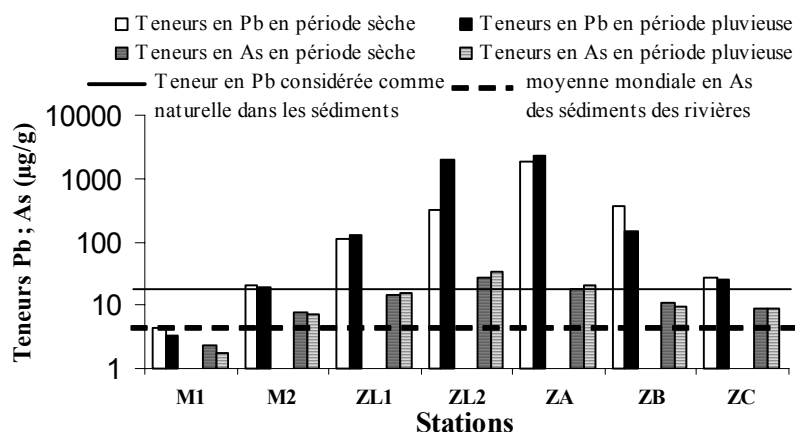


Figure 4. Teneurs en Pb et As ($\mu\text{g/g}$) dans les sédiments au voisinage de la mine en période sèche et en période pluvieuse comparées aux teneurs normales.

La comparaison de la distribution des éléments traces toxiques Pb et As entre l'eau et les sédiments dans les différentes stations étudiées, montre que les concentrations de ces éléments dans les sédiments sont largement supérieures à celles enregistrées dans l'eau. Les sédiments constituent donc un support naturel et une réserve potentielle en ETM Pb et As, et peuvent libérer les éléments traces déposés (Faucon 1987) au moindre changement des conditions du milieu, en particulier le pH.

CONCLUSION

Cette étude a montré que le centre minier de Zeïda, abandonné sans réhabilitation dans la Haute Moulouya (Maroc), possède un haut potentiel de pollution. L'impact environnemental de l'activité minière dans la région est confirmé. L'exploitation minière passée et l'abandon des districts miniers sans réhabilitation constituent une nuisance majeure pour l'environnement de la Haute Moulouya. Le centre minier abandonné a un effet non seulement sur l'esthétique de l'environnement de la région, mais aussi sur les eaux de surface et les sédiments au voisinage de ce dernier, contaminés par les éléments traces métalliques toxiques. Des teneurs élevées des éléments traces Pb et As ont été enregistrées dans les eaux de surface ([Pb] = $130 \mu\text{g/l}$, [As] = $199 \mu\text{g/l}$) et les sédiments ([Pb] = $1814,9 \mu\text{g/g}$, [As] = $2277,4 \mu\text{g/g}$). Les résidus miniers dénudés de Zeïda constituent une source de polluants. Les sédiments dans l'oued Moulouya et dans les lacs de carrières au niveau du district minier Zeïda constituent le réservoir pour ces polluants.

Remerciements et hommages

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet thématique d'appui à la recherche scientifique PROTARS II (P23/39) financé par le Ministère de l'enseignement supérieur. Nous tenons à remercier Mr. Marc Leblanc, directeur de l'équipe de géochimie du laboratoire Hydrosociétés, 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 à la mémoire du 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

l'aboutissement de celle-ci, décédé en Janvier 2005 suite à un accident de la route survenu lors d'une mission de terrain.

Nous tenons à remercier le professeur Mr. Abdellah Guenbour, directeur du laboratoire de chimie physique appliquée de la Faculté des Sciences de Rabat et un reviewer anonyme, qui ont eu l'amabilité d'évaluer ce travail.

Références

- Amade E. 1965. Les gisements de plomb de Zeïda et de Boumia. *Notes & Mém. Serv. géol. Maroc*, 181, 175-184.
- Baur W.H. & Onishi B.M. 1978. Arsenic. In : Courtin-Nomade A. 2001. *Mobilité de l'arsenic, liaisons arsenic-fer et spéciation de l'arsenic dans les haldes d'anciennes mines du Massif central français*. Thèse de Doctorat, Univ. Limoges, France, 370 p.
- Bouabdli A., Saïdi N., El Founti L. & Leblanc M. 2004. Impact de la mine d'Aouli sur les eaux et les sédiments de l'oued Moulouya (Maroc). *Bull. Soc. Hist. nat. Toulouse*, 140, 27-33.
- Bowen H.J.M. 1979. *Environmental chemistry of the elements*. Academic Press, New York, 49-62.
- B.R.G.M. 1999. Les résidus miniers français : typologie et principaux impacts environnementaux potentiels. *Tech. Ind. Min.*, 3, 3^{ème} Trim., 77-110.
- Casiot C. 1999. *Développement de techniques analytiques couplées (HPLC-ICP-MS et EC-ICP-MS) pour la spéciation de métalloïdes (Arsenic, Sélénium, Antimoine et Tellure)*. Thèse, Univ. Pau, France, 185 p.
- D.M.R. 1990. 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.
- El Jaouani L. 2001. *Etude géologique et géologique des gisements plombifères de la boutonnière d'Aouli (Aouli, Zeïda, Mibladen) Haute Moulouya (Maroc)*. Thèse, Univ. Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, 221 p.
- Emberger A. 1965. Eléments pour une synthèse métallogénique du district plombifère de la Haute Moulouya. *Notes & Mém. Serv. géol. Maroc*, 181, 205-244.
- Faucon N. 1987. *Fixation des métaux lourds (Plomb et Cadmium) sur deux sédiments côtiers: estuaire de la Canche, port de Dunkerque. Influence du pH et du potentiel d'oxydo-reduction*. Thèse, Univ. Sci. Tech. Languedoc, Montpellier, France. 219 p.

- Ferguson J.F. 1991. *The heavy elements: chemistry, environmental impacts and health effects*. Pergamon Press, Oxford, 614 p.
- Foucault A. 1995. *Dictionnaire de géologie*, 4^{ème} édition, Masson, Paris, 324 p.
- Martin J.M. & Whitfield M. 1983. The significance of the river input of chemical elements to the ocean. *In*: Smedley P.L. & Kinniburgh D.G. (eds.) – A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl. Geochem.* 17, 517-568.
- Moreno F., Ferreira Da Silva E., Cândida Gil M., Cardoso Fonseca E. 1999. Evolution des teneurs en As dans un drainage à l'aval d'une ancienne exploitation minière (mine du Pintor, Portugal). *Chron. Rech. Min.* 534, 47-51.
- Ngadi M. 1995. *Précipitations et écoulements dans le bassin versant de la Moulouya (Maroc)*. Thèse, Univ. Montpellier III, France, 333 p.
- N.M. 2002. Norme Marocaine de qualité des eaux. *Bull. Off.* n° 5062.
- Pellet R. 1963. La laverie-pilote de flottation de Plomb Moulouya. *Mines et géologie*, Rabat, 21-22, 135-143.
- Saidi N., Brhada F., Zaïd A., Bouabdli A. & Escarré J. 2002. Impact de la mine d'Aouli sur l'écosystème au niveau de la Haute Moulouya (Maroc). *Bull. Soc. Hist. nat. Toulouse*, 138, 21-27.
- Schmitt J..M. 1976. *Sédimentation, paléo-altération, géochimie et minéralisation en plomb de la série triasique de Zeïda (Haute Moulouya, Maroc)*. Thèse, Ecole sup. Mines Paris, 104 p.
- Schindler D.W. 1986. The significance of in-lake production of alkalinity. *Water, Air and Soil Pollution*, 30, 931-944.
- Trefry J.H. & Presley B.J. 1976. Heavy metals in sediments from San Antonio Bay and the northwest Gulf of Mexico. *Environ. Geol.*, 1, 283-294.
- Vink B.W. 1996. Stability relations of antimony and arsenic compounds in the light of revised and extended Eh-pH diagrams. *J. Chem. Geol.* 130, 21-30.
- Wadjinni A. 1998. Le plomb au Maroc : cas des districts de Touissit et de Jbel Aouam. *Chron. Rech. Min.*, 531-532, 9-28.
- Wedepohl K.H. 1995. The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 1217-1232.
- W.H.O. 1998. Guideline for drinking water quality, 2nd ed., vol. 2, health criteria and other supporting information. World Health Organisation, Geneva.

Manuscrit déposé le 12 juillet 2005
Version modifiée acceptée le 26 décembre 2005