

RESUME

L'objectif de cette étude est de caractériser les rejets miniers de traitement abandonnés aux centres miniers Zeïda et Mibladen (Haute Moulouya, oriental du Maroc), de mettre en exergue la capacité polluante de ces rejets et déterminer leurs impacts environnementaux tenant compte du climat semi-aride et du contexte géologique dans la région. Les résultats ont révélé que les versants à rejets miniers à Zeïda (RZ) et à Mibladen (RM) sont constituées de particules de taille fine, de stabilité géotechnique faible, très mobiles et présentent des teneurs élevées en éléments traces métalliques toxiques (ETM) (Pb : 5547ppm pour RZ // 10520ppm pour RM). Ces rejets à pH alcalin (8,4) subissent l'effet d'une intense érosion hydrique et en particulier éolienne et créent de multiples impacts environnementaux. En effet, en plus de l'impact paysager négatif qu'ils génèrent, les ETM contenus dans ces rejets sont transportés, disséminés et contaminent les ressources en eaux de surface et les sols aux alentours : (Eaux : Pb : 13-430µg // Sédiments : Pb : 33-2415ppm // Sols : Pb : 71-566 ppm). Toutefois, on note que le risque de contamination lié à l'altération chimique à partir des rejets miniers étudiés est réduit suite d'une part au manque d'humidité en climat semi aride favorisant les réactions chimiques au sein des rejets et d'autre part suite à l'abondance des carbonates et/ou des silicates dans les rejets et dans les terrains géologiques de la région. Les phénomènes du drainage minier acide (DMA), en particulier l'acidification des eaux de surface et des lixiviats, phénomène le plus remarquable du DMA n'ont été décelés nulle part au niveau des districts miniers. Il s'agit du drainage neutre contaminé (DNC) pour les rejets des mines Zeïda et Mibladen de la Haute Moulouya. L'érosion mécanique éolienne est le vecteur principal de la dispersion, à partir des rejets miniers étudiés, de particules en suspension contaminants.

MOTS-CLÉS : rejets miniers, capacité polluante, mine zeïda, mine mibladen, impacts environnementaux

ABSTRACT

The aim of this study is to characterize the wastes of treatment abandoned at the mine sites Zeïda and Mibladen (Upper Moulouya, eastern of Morocco), highlight the polluting capacity of these wastes and determine their environmental impacts taking into account climate semi-arid and geological context carbonate and silicate in the region. The results showed that the mining wastes at Zeïda (RZ) and at Mibladen (RM) consist of fine particle size, have low geotechnical stability, highly mobile and exhibit high levels of toxic trace metals (MTE) (Pb: 5547ppm for RZ // 10520ppm for RM). These wastes with alkaline pH are affected by intense water erosion and in particular wind erosion and they create multiple environmental impacts. Indeed, in addition to the negative impact on the landscape that they generate, MTE contained in these wastes are transported, spread and contaminate surface water resources and soil around: (water: Pb : 13-430µg // // Sediments Pb : 33-2415ppm // // Soils: Pb : 71-566 ppm). However, we note that the risk of contamination related to chemical weathering from the studied wastes is reduced sequel on the one hand to the lack of moisture in semi-arid climate favoring chemical reactions within the waste and secondly due to the abundance of carbonates and / or silicates in wastes and into the geological terrain of the region. Phenomena of acid mine drainage (AMD), in particular acidification of surface water and leachate, most remarkable phenomenon of AMD were detected anywhere in mining districts. This is the contaminated neutral drainage (CND) for mining wastes of Zeïda and Mibladen at upper Moulouya. Mechanical wind erosion is the main vector of the dispersion of suspended particles of contaminants from wastes studied.

KEYWORDS : mine wastes, polluting capacity, zeïda mine, mibladen mine, environmental impacts.

Les rejets miniers de traitement : caractérisation, capacité polluante et impacts environnementaux, mine Zeïda, mine Mibladen, Haute Moulouya (Maroc)

EL HACHIMI Moulay laârabî,

CRMEF, laboratoire de Géologie, B.P. 6210, Souissi-Rabat, Maroc, Fondation Mibladen Aouli pour l'Environnement et le Développement, Maroc,

BOUABDLI Abdelhak,

Université Ibn Tofail, Faculté des Sciences, Laboratoire de Géosciences appliquées, B.P.133, 14000 Kenitra, Maroc.

FEKHAOUI Mohamed,

Université Mohammed V – Agdal, Institut Scientifique, Unité Pollution Ecotoxicologie et Risques Sanitaires, B.P.703 Agdal, Rabat, Maroc.

Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : elhachimi3@hotmail.com

I. Introduction

L'exploitation minière porte généralement préjudice à l'environnement, elle induit inévitablement la dégradation de l'écosphère. Les mines abandonnées sans réhabilitation constituent assurément pour leur part des sources de contamination et de nuisance pour l'environnement. Les opérations d'extraction et de broyage minier, la concentration de minerais et l'évacuation de rejets miniers, constituent des sources évidentes de contamination de l'environnement.

Selon Lee (2001), l'exploitation minière est l'une des plus importantes sources de métaux lourds dans l'environnement. Des niveaux élevés de métaux lourds peuvent être rencontrés aux alentours et dans les mines métallifères, dus à la décharge et à la dispersion des résidus miniers dans les sols agricoles proches, les récoltes et les cours d'eau. C'est ce qui pose éventuellement un risque potentiel pour les habitants des régions minières.

Les rejets miniers de traitement peuvent être définis comme étant les produits plus ou moins transformés issus de la phase de traitement et d'enrichissement du minerai (rejet de laverie) contenant d'éventuels additifs chimiques, minéraux ou organiques (B.R.G.M. 1999). Ces rejets (résidus) sont généralement transportés par voie hydraulique et stockés dans une retenue (verse à résidus/halde) obtenue par installation d'une digue afin d'éviter le déversement d'effluents pollués dans l'environnement. Les résidus restés à l'air libre, peuvent selon les courbes de métaux, devenir à intérêt économiquement rentable, par contre, ils sont d'un impact paysager et environnemental généralement très négatifs.

En plus de l'impact négatif des rejets miniers de traitement sur l'esthétique du milieu naturel, ces résidus présentent généralement une capacité polluante chimique élevée. Issus des opérations de traitement du minerai, ces résidus sont souvent très riches en minerais métalliques résiduels, en sulfures de fer et en phases minérales comprenant des éléments traces métalliques (ETM) toxiques. Sous l'action des agents météoriques, ces composés vont répondre de façons très diverses aux nouvelles conditions géochimiques (oxydation, réduction, etc.) de surface et vont alors être déstabilisés et s'altérer et les produits d'altération vont directement être dispersés dans l'environnement par lessivage et transport hydrique et/ou éolien. Selon le B.R.G.M. (1999), l'oxydation naturelle des minerais sulfurés des rejets exposés à l'air et à l'eau peut entraîner

la production d'effluents suffisamment acidifiés et chargés d'ions métalliques pour poser de sérieux problèmes dans un milieu aquatique récepteur. Ce phénomène appelé Drainage Minier Acide (DMA) constitue le problème environnemental le plus important pour les mines exploitant ce type de minerais, cependant ce problème n'est pas rencontré dans toutes les exploitations de minerais sulfurés, en particulier quand il y a présence de phases minérales capables de neutraliser l'acidité. Dans notre étude, nous nous sommes intéressés d'une part à caractériser les rejets miniers de traitement des mines de la Haute Moulouya (Mine Zeïda, Mine Mibladen) situées à l'oriental du Maroc, à discuter la stabilité géotechnique des verses à résidus et la mobilité des rejets, et d'autre part mettre en exergue la capacité polluante de ces rejets par dosage des teneurs des éléments traces métalliques (ETM) et déterminer les impacts environnementaux liés au stockage de ces rejets à l'air libre tenant compte du climat semi-aride et du contexte géologique dans la région.

2. Matériels et méthodes

2.1 Présentation de la zone d'étude

Les centres miniers Mibladen et Zeïda sont situés dans la région Nord orientale du Maroc dans le haut bassin versant de la Moulouya (figure 1). L'oued Moulouya principal cours d'eau de la région, draine d'abord la région minière puis parcourt le bassin sur plus de 550 km pour se jeter en Méditerranée.

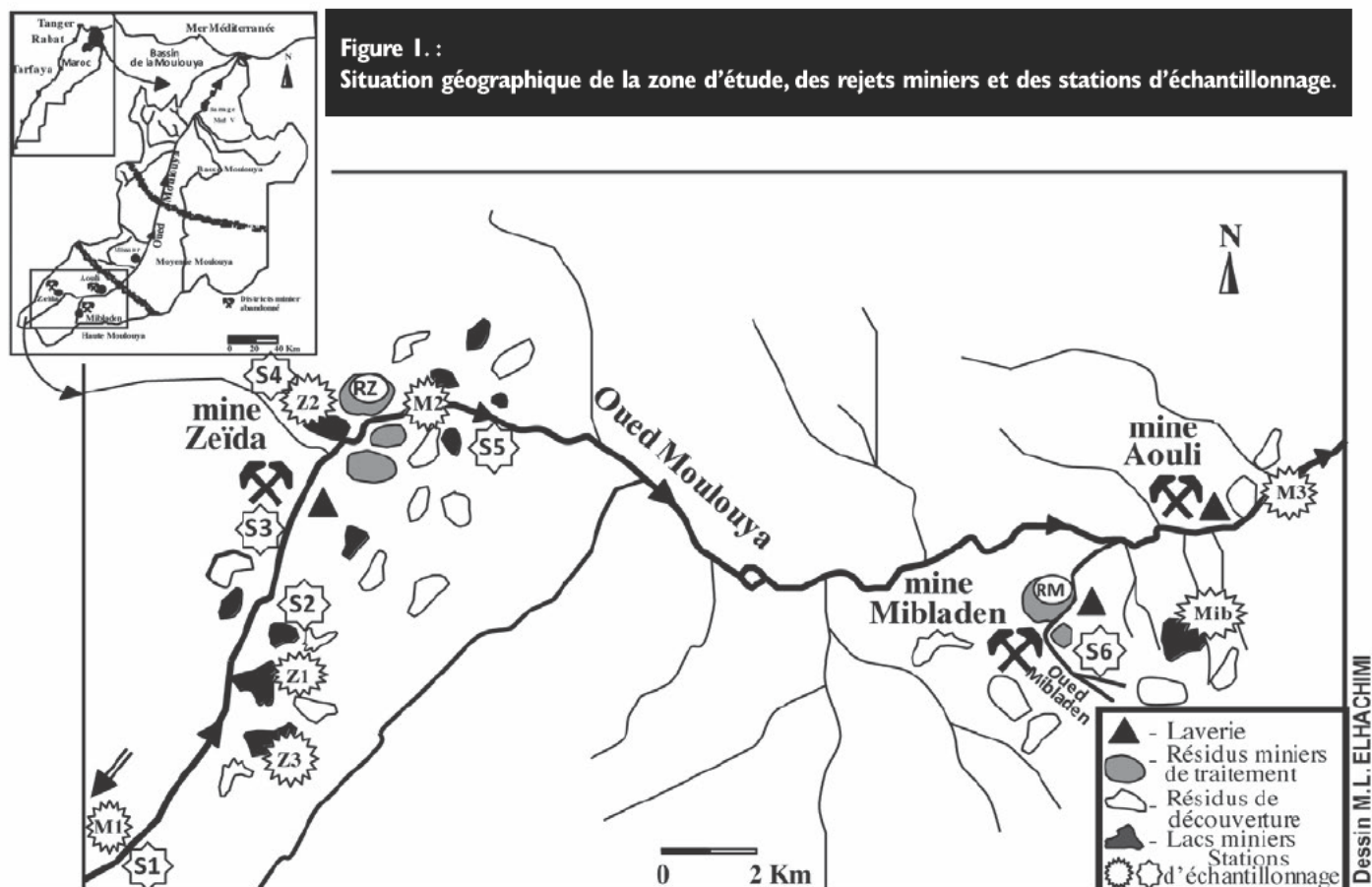
Le centre d'exploitation minière Zeïda d'une superficie de 300 Km², situé sur les berges et sur le parcours même de l'oued Moulouya a été de 1972 à 1985 le siège d'une exploitation intense du minerai de plomb. À Zeïda, les gîtes sont stratiformes et la minéralisation est répartie irrégulièrement sous forme d'amas dans des arkoses sub-horizontales du Permo-Trias et disposée en placages peu épais sur les massifs granitiques (Emberger, 1965 ; Schmitt, 1976). L'association paragenétique est formée par la cérusite bien cristallisée [PbCO₃] (70%) et de la galène [PbS] (30%), avec des minéraux accessoires tels que la chalcopryrite [CuFeS₂], la pyrite [FeS₂], avec de grandes quantités de barytine rose [BaSO₄] ainsi que de rares petits cubes jaunes de fluorine [CaF₂]. La zone minéralisée se situait sous des couches de stériles de 20 à 50 m (marnes, argilites rouges, grès argileux, grès arkosique) et se répartissait en bancs

superposés de 5 à 7 m (Schmitt, 1976). L'exploitation était en carrière à ciel ouvert à Zeïda. L'usine de traitement d'une capacité de 1400000 t/an, assurait l'enrichissement du minerai par concassage, broyage, flottation et filtration. Suite à 14 ans d'exploitation, le bilan est comme suit: des installations de surface (atelier, laverie, matériel abandonné) ; production de 630172 tonnes de concentré de plomb à une teneur de 40 à 70% ; Production d'environ 12 millions de tonnes de rejets de traitements et d'environ 70 millions de tonnes de stériles de découverte, l'ensemble stockés sur les berges de l'oued Moulouya (figure 1) ; Une dizaine de carrières à ciel ouvert remplies d'eau (entre autres : Z1 (12 Mm³), Z2 (1Mm³), Z3 (3Mm³)), principalement d'eau de la nappe souterraine et de ruissèlement, formant des lacs qui sont toujours en eau sauf pour quelques un qui s'assèchent en été. Les eaux des lacs de carrière comme celle de l'oued Moulouya sont utilisées pour la consommation domestique, irrigation et abreuvement du cheptel. Les eaux du lac de carrière Z3 sont distribuées sans traitement préalable dans le réseau du village Zeïda qui compte 9920 habitants.

Le gisement de Mibladen s'étend sur une superficie de 60 Km². Mibladen, siège de l'exploitation intense du minerai de plomb (1935-1985), est situé dans un plateau calcaire surmontant le socle ancien (Felenc et Lenoble, 1965). À Mibladen, les minéralisations se présentent sous forme d'amas stratoïdes dans des faciès du Lias et du Crétacé moyen. Ces amas sont constitués de galène [PbS] et de barytine [BaSO₄]. Selon Emberger

(1965), la galène exploitée à 4 % Pb était souvent oxydée en cérusite [PbCO₃] et anglesite [Pb(SO₄)₂] et en d'autres minéraux tel que la vanadinite [Pb₃(VO₄)₂Cl] qui fait la réputation minéralogique internationale de la région. Le minerai de galène souvent associé à la barytine est en imprégnation, il est disséminé ou interstratifié dans des niveaux marneux, dolomitiques, calcaro-dolomitiques, conglomératiques et dans des argilites qui couvrent le socle. La galène existe aussi sous forme géodique stratiforme suivant les joints entre les bancs calcaro-dolomitiques et les calcaires argilo-greux ou comme remplissage karstique dans les diaclases et les fractures diverses (Felenc et Lenoble, 1965).

Cinquante ans d'exploitation en carrières et en galeries à Mibladen ont conduit aux résultats suivants: Des installations de surface abandonnées (ateliers, laverie, matériel); Des galeries non remblayées, des puits et des descenderies abandonnés sans aucune mesure de mise en sécurité; Production de 391000 tonnes de concentré de plomb à une teneur de 70 à 72%; Production d'un volume d'environ 2 millions de tonnes de rejets fins de laverie; Une vingtaine de terrils en forme conique de grande dimension dépassant 15 m de hauteur chacun et sans couvert végétal, d'un volume total estimé à 60 millions de tonnes pour l'ensemble, il s'agit de stériles francs de découverte et de concassage faiblement minéralisés, physiquement stables, formés de gros blocs, de cailloutis et/ou de gravier ; Des carrières profondes, remplies de plusieurs millions de m³ d'eau de la nappe et de ruissèlement



(lac Mib : 1 Mm³). Comme pour Zeïda, à Mibladen, les eaux des lacs de carrières sont utilisées pour la consommation domestique, irrigation et abreuvement du cheptel.

La zone d'étude située au-dessus de 1400m d'altitude, est d'un climat semi-aride. Les conditions climatiques sont assez rigoureuses dans la Haute Moulouya et le régime des précipitations est irrégulier. Les moyennes annuelles des températures sont de l'ordre de 12-14°C. La température moyenne annuelle minimale atteint (0°C) en hiver. La température moyenne annuelle maximale atteint (33°C) en été (Raynal, 1961). La moyenne pluviométrique annuelle dans la région atteint 300mm. Des précipitations orageuses fréquentes courtes, brusques et violentes, sous formes d'averses concentrées dans le temps, tombent à la surface du sol dans la Haute Moulouya. Elles provoquent un ruissellement violent d'eau chargée en limons donnant lieu à de violentes crues. L'eau n'a pas le temps de s'infiltrer dans le sol ce qui favorise le ruissellement (Ngadi, 1995). La Haute Moulouya est balayée par des vents très violents qui renforcent la sécheresse dans la région, des vents froids soufflant pendant l'hiver et des vents chauds d'été (Ngadi, 1995). En été, les vents provoquent des nuages de poussière qui peuvent durer plusieurs jours (Raynal, 1961).

2.2 Etude des rejets miniers

Les situations, les géométries, les superficies, les volumes et la stabilité des vers à résidus miniers de traitement ont été estimés sur le terrain. Les types d'ouvrages de stockage de résidus de traitement ont été déterminés. Des échantillons composites de résidus ont été prélevés à partir des vers à Zeïda et à Mibladen (verse RZ et verse RM, figure 1). Chaque échantillon composite a été préparé à partir de cinq sub-échantillons. Les prélèvements ont été faits à l'aide d'une benne à mains en plastique, au sommet de chaque verse à résidus de traitement, à différents emplacements et à environ 40 cm de profondeur. Les échantillons destinés pour la minéralisation ont été broyés dans un mortier en céramique puis conservés pendant 45 jours dans des flacons en polyéthylène à l'abri de la lumière à une température de 4°C.

Sur l'ensemble des échantillons plusieurs analyses ont été effectuées:

- L'étude de la granulométrie a été réalisée en deux étapes sur la fraction inférieure à deux millimètres (la fraction > 2 mm est inexistante dans la plupart des échantillons) : les fractions argileuses (<2 µm) et limoneuses (2µ<limons fins<20 µm) ont été prélevées à la pipette de Robinson, les fractions plus grossières ont été séparées les unes des autres par tamisage à l'aide de tamis de type AFNOR.
- Les paramètres physico-chimiques suivants ont été déterminés : pH eau, salinité, CEC, matière organique, carbone organique, calcaire total (par calcimètre de Bernard), azote total, phosphore total, potassium total, calcium, sodium, potassium.
- L'étude de la minéralogie des rejets a été réalisée à la loupe

binoculaire et au microscope optique puis complétée et discutée en se basant sur des données d'autres études effectuées sur ces mêmes rejets.

La stabilité géotechnique des rejets miniers est discutée sur la base des données de terrain et de laboratoire.

2.3 Etude de la capacité polluante des rejets et des impacts environnementaux associés

L'étude de la capacité polluante des rejets miniers de traitement au centre minier Zeïda et au centre minier Mibladen a consisté en l'analyse par ICP-MS des teneurs en quelques ETM (teneur totale de chaque ETM) dans les échantillons de résidus miniers prélevés et minéralisés. L'analyse des ETM a été effectuée sur des fractions aliquotes de 10 ml obtenues par minéralisation des échantillons prélevés, avec ajout de standards internes (indium, bismuth), HNO₃ 15N et H₂O milli-Q. Ces fractions sont obtenues suite à une attaque à froid pendant 168 h de 0,1 g à 1 g de chaque échantillon solide prélevé préalablement broyé. L'attaque a été effectuée avec 20 ml d'acide HNO₃ concentré ultra-pur dans des flacons en polyéthylène. Les résultats d'analyses sont comparés avec les teneurs moyennes normales des ETM dans la croûte terrestre et avec les teneurs normales des sols non contaminés. La vitesse d'érosion, la réactivité chimique et la mobilité des résidus sont discutées en fonction des données climatiques et géologiques de la région d'étude.

Les impacts environnementaux liés au stockage à l'air libre des rejets miniers ont été étudiés par investigation du degré de contamination par les ETM des sols, des eaux de surface et des sédiments (eaux et sédiments de l'oued Moulouya et des lacs de carrières) ainsi que l'évaluation de la qualité des eaux aux alentours des vers à résidus au niveau des centres miniers Zeïda et Mibladen. Pour cela des échantillons d'eau, de matière en suspension et des sédiments ont été prélevés d'une part dans l'oued Moulouya (M1 : à 30 km en amont des mines ; M2 : au niveau de Zeïda près du parc à résidus miniers; M3 en aval de Mibladen au niveau d'Aouli), et d'autre part dans des lacs de carrières au niveau des centres miniers de Zeïda (Z1, Z2, Z3) et de Mibladen (Mib) non loin des vers à résidus miniers (figure 1). Des sols ont été également échantillonnés au niveau des districts miniers aux alentours des vers à résidus miniers (S1 : à 30 km en amont des centres miniers, S2, S3, S4, S5 : au niveau de Zeïda, S6 : au niveau de Mibladen). Les missions d'échantillonnage pour les eaux et les sédiments ont été réalisées en période sèche et en période de pluie. Les paramètres physicochimiques de l'eau ont été mesurés sur le terrain à l'aide d'un multiparamètres CONSORT C535. Les échantillons d'eau ont été filtrés sur des filtres de 0,45 µm propres montés sur un appareil à filtrer NalgèneR pour récupérer les matières en suspension (MES : phase particulaire). 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.

L'échantillonnage des sédiments a été effectué, en même temps que l'échantillonnage des eaux, dans les mêmes stations et pour les mêmes périodes le long de l'oued Moulouya et dans les lacs de carrières. Dans chaque station, les échantillons de sédiments ont été prélevés à l'aide d'une benne à main à environ 10 cm de l'interface eau/sédiment, sur les berges de la Moulouya et dans les lacs de carrières. Les sédiments sont mis dans des sacs en plastiques propres et conservés à 4°C. Au laboratoire en salle blanche, les échantillons ont été séchés à l'air ambiant, broyés et tamisés à 0,5 mm et conservés jusqu'au moment de la minéralisation faite selon la même procédure que celle appliquée pour les rejets miniers. Les analyses des ETM des rejets miniers, des eaux et des sédiments ont été effectuées au laboratoire Hydrosociences de l'Université Montpellier II (France).

Pour les sols, des points d'échantillonnage ont été choisis, au niveau des mines Mibladen- Zeïda. Des sols nus (non rhizosphériques) ont été échantillonnés aux alentours des verses à résidus miniers. Un échantillon de sol de référence (S1) a également été échantillonné à 30 km en amont de la mine de Zeïda loin de toute source de pollution. Les sols ont été échantillonnés à l'aide d'une pelle en plastique dans des terrains non agricoles. Dans chaque station, chaque échantillon de sol non rhizosphérique est un échantillon composite de 5 sub-échantillons prélevés au hasard dans une aire de 5x5m (0-15cm en profondeur). Les échantillons de sols prélevés ont été mis dans des sacs en plastique propres et conservés à basse température, toutes les précautions ont été prises pour éviter toute contamination avant analyse. Au laboratoire, les échantillons de sols ont été séchés à une température de 80°C en salle blanche à l'air ambiant puis broyés dans un mortier d'agate. Le pH du sol est mesuré selon la méthode de Hendershot (1993). Le protocole de minéralisation destiné à la préparation pour le dosage des ETM (Pb, Cu, Zn, Cd et Cr) dans les sols est celui préconisé par Chiffolleau (1994). Le dosage des métaux dans les sols a été effectué au laboratoire d'Ecotoxicologie de l'Institut National d'Hygiène de Rabat sur les minéralisats par spectrométrie d'absorption atomique avec four à graphite pour Pb, Cu, Cd et Cr et avec flamme pour Zn.

3. Résultats et discussions

3.1 Situation et description générale des verses à résidus de traitement de la Haute Moulouya

Les résidus de traitement des laveries de Zeïda et Mibladen correspondent aux produits obtenus après les opérations de traitement du minerai et séparation du concentré par flottation. Ces résidus, constitués à la sortie des laveries de matières minérales solides et d'eau (boues industrielles), ont été transférés par canalisation vers l'aval des laveries. Ils ont été déposés en verses à l'air libre. À Zeïda, les verses à résidus, au nombre de trois, se situent sur un terrain plat et découvert, à 3 Km en aval de la laverie (figure 1). Ces verses, non végétalisées, couvrent une superficie d'environ 80 hectares. La grande verse (verse RZ) est située près de l'oued Moulouya sur sa rive gauche à 32°51' de latitude Nord et 4°58' de longitude Est, elle est de hauteur 15 m environ, de volume total estimé à 6,5 Mt et occupe une superficie de 50 hectares. La zone de localisation des verses à Zeïda est rurale et essentiellement à vocation agricole. Les verses à résidus sont situées à 3 kilomètres au Nord Est du centre de la commune rurale Zeïda.

À Mibladen, les résidus de traitement sont répartis en 5 verses non végétalisées déposés sur les berges et dans le lit de l'oued Mibladen affluent de l'oued Moulouya situé au-delà à 7Km. Ces verses couvrent une superficie d'environ 120 hectares. La grande verse à résidus (RM) se situe à 32°64' de latitude Nord et 4°38' de longitude Est, à 300 m en aval de la laverie sur le versant gauche de l'oued Mibladen au flanc d'une colline, elle est de hauteur de 30 m environ et de volume total estimé à 2 Mt. La région est rurale et à faible densité de population comportant 3087 habitants.

3.2 Caractérisation des résidus miniers de traitement de la Haute Moulouya

3.2.1 Granulométrie et minéralogie des résidus

Les résultats de l'analyse granulométrique réalisée sur les échantillons prélevés à différents endroits aux sommets des verses montrent que l'ensemble des échantillons de Zeïda et de Mibladen a une texture très sableuse (87 % des grains de taille comprise entre 50 µm et 2 mm) (Tableau 1).

Tableau 1 Composition granulométrique des résidus miniers de traitement de Zeïda et de Mibladen

Constituant	Résidu de Zeïda	Résidu de Mibladen
Argile (%)	6,6	1,1
Limon fin (%)	5,4	0,4
Limon grossier (%)	0,4	0,1
Sable fin (%)	37,7	35,3
Sable grossier (%)	50	63,9

Tableau 2. Principales caractéristiques physicochimiques des résidus miniers de traitement de Zeïda et de Mibladen

Caractéristique	Résidu de Zeïda	Résidu de Mibladen
pH (H ₂ O)	8,40	8,41
Salinité (mmhos/cm/25°C)	0,11	0,09
CEC (meq/100g)	5,4	2,5
Calcaire total (%)	0,47	44,1
Matière organique (%)	0,07	0,09
Carbone organique (%)	0,04	0,05
Azote total (%)	0,01	0,01
Phosphore total (‰)	1,77	0,28
Potassium total (‰)	2,11	0,51
Calcium (%)	4,8	1,6
Sodium (%)	0,2	0,4
Potassium (%)	0,25	0,25

L'étude des résidus miniers de traitement de Zeïda et de Mibladen à la loupe binoculaire et au microscope optique des échantillons, montre la présence de grains de quartz libres d'aspect anguleux. Les autres minéraux sont des phyllites, des feldspaths, des carbonates et des minerais de plomb. Ces mêmes résidus étudiés par DRX sont constitués principalement de quartz, barytine, orthose, muscovite, chlorite et albite (Argane, 2012). Selon Lavazzo (2011), l'étude par DRX a montré que les résidus miniers de Zeïda sont riches en minéraux silicatés (85,6%) (quartz (49,5%), K-feldspaths (29,4%), plagioclases (6,7%)), pauvres en minéraux carbonatés (cérusite (0,5%)) et en minéraux argileux (4,1%) avec présence de barytine (7,5%) et absence de sulfures alors que les rejets miniers de Mibladen sont riches en minéraux carbonatés (45%) (dolomite (43,8%) et cérusite (1,2%)) et sulfatés (barytine (37,4%)), pauvres en minéraux silicatés (12,5%) (quartz (10,3%), K-feldspaths (2,2%)) et en argiles (4,8%), avec présence de sulfures (galène (0,1%) et sphalérite (0,4%)).

3.2.2 Physico-chimie

Les résultats d'analyses des principales caractéristiques physico-chimiques des résidus miniers de Zeïda et de Mibladen sont résumés dans le tableau 2.

Les résidus sablonneux de Zeïda et de Mibladen sont à pH alcalin (8,4). Cette alcalinité est liée à la présence des carbonates et/ou des silicates dans les résidus et donc dans le minerai traité. En effet, selon les résultats d'analyses (Tableau 2), le taux de calcaire total est élevé pour les résidus de Mibladen (44,1 %), par contre il est très faible pour les rejets de Zeïda (0,47 %) qui sont plutôt riches en minéraux silicatés comme le montre l'étude minéralogique de ces résidus.

La valeur de la capacité d'échange cationique est faible pour les résidus de Zeïda (5,4 meq/100g), très faible pour ceux de Mibladen (2,5 meq/100g). Il est de même pour la salinité faible

pour les résidus de Zeïda ainsi que pour ceux de Mibladen. Ces résidus contiennent un pourcentage très faible de matière organique (0,07 % à 0,09 %). La quantité de carbone organique est également très faible (0,04 % à 0,05 %). Les teneurs en phosphore, azote et potassium sont très faibles au niveau de ces résidus. En effet, il s'agit de résidus minéraux brutes résultats des différentes phases de traitement de minerai donc ne pouvant pas contenir d'éléments nutritifs.

La teneur faible en matière organique et en nutriments (Azote, phosphore, potassium) dans les résidus miniers de Zeïda et de Mibladen peut être un facteur limitant pour le développement du couvert végétal sur les verses.

3.2.3 Stabilité géotechnique des verses

Les verses à résidus ont été construites graduellement par décantation des boues résiduaires en provenance des laveries et drainage des eaux usées qui étaient collectées puis pompées et redirigées vers la laverie pour être réutilisées dans le cas de Zeïda, par contre directement rejetées dans l'oued dans le cas de la mine de Mibladen. À Zeïda, les dépôts ont été réalisés sur un terrain à pente très faible. La verse (RZ) à Zeïda, a été construite selon la méthode dite de l'axe central. La géométrie de la verse (RZ) est en forme conique aplanie en surface avec des flancs externes redressés de pentes dépassant 70° par rapport au substratum marnodolomitique. À Mibladen, la charge élevée en solides dans le rejet a permis des dépôts sur pente forte au niveau de l'aire de stockage. Il s'agit d'aires de stockages successives et imbriquées sur versant de coline. La technique utilisée pour la construction de la verse à résidus à Mibladen (RZ) est le déversement libre de résidus avec ceinture périphérique. Dans les deux cas à Zeïda et à Mibladen, des fûts métalliques ont été plantés sur les pentes des verses pour assurer la stabilité des ouvrages de retenues et limiter la dispersion des rejets toxiques dans l'environnement. Ces

Tableau 3 : Teneurs moyennes en ETM des résidus de traitement (ppm)

	Cd	Cu	Cr	Pb	Zn	As	Ba	Mn
Résidus de Zeïda (RZ)	1,3	118,7	304,3	5547	7500	192,2	5835	401,2
Résidus de Mibladen (RM)	7,2	126	168,8	10520	9074	144,4	6308	1686
Teneurs moyennes dans la croûte terrestre	0,15	62,5	200	16	101	5	250	1000
Teneurs normales des sols non contaminés (Bowen, 1979)	0,35	30	-	35	90	6	-	-

fûts ont été corrodés. En effet, l'érosion des versants est maximale sur les pentes externes non conçues en banquettes et non végétalisées. Constitués de particules de granulométrie sableuse et contenant un pourcentage très faible en matière organique (Tableau 1,2), les versants à résidus de traitement à Zeïda et à Mibladen sont de stabilité physique faible et les rejets très mobiles.

3.3 Capacité polluante et mobilité des rejets

Selon le B.R.G.M. (1999), la plupart des impacts qu'un résidu minier peut avoir sur l'environnement résultent d'une combinaison de la potentielle capacité polluante de ses composantes chimiques et de l'éventuel mouvement (mobilité) dans l'espace de ses particules solides après érosion. La vitesse d'érosion et la quantité de matériel déplacée du résidu minier, dépendent à la fois des caractéristiques du résidu (taille des particules, humidité, ...), de sa stabilité, du lieu de stockage (sa forme, positionnement dans le bassin versant) ainsi que de l'intensité des facteurs climatiques auxquels il est soumis (pluies, vents, régimes des températures, ...).

3.3.1 Capacité polluante des rejets miniers de Zeïda et de Mibladen

La capacité polluante chimique d'un résidu minier est déterminée par la nature des éléments "contaminants" présents dans ce dernier, de leur teneur et de leur réactivité (B.R.G.M., 1999). Les ETM constituent des éléments chimiques contaminants, ils sont présents avec des teneurs élevées dans les résidus miniers de traitement à Zeïda et à Mibladen comme le montre le tableau 3 donnant les résultats d'analyses de quelques ETM dans ces résidus.

En effet, les analyses des rejets ont révélé des teneurs moyennes en ETM (Cd, Cu, Pb, Zn, As, Ba, Mn) excessivement élevées comparées aux teneurs moyennes normales dans la croûte terrestre (Foucault, 1995) et aux teneurs normales des sols non contaminés (Bowen, 1979) en particulier pour Pb, As, Ba et Cd (Tableau 3). Ces fortes teneurs sont le résultat évident des processus de concentration dans les filières de traitement des minerais exploités (galène et cérusite) et des minerais associés (barytine, chalcocite, malachite, chalcopryrite...). Ces fortes teneurs en ETM déterminent la capacité polluante

chimique élevée des résidus de traitement de Zeïda et de Mibladen. Les versants à rejets miniers constituent par conséquent une source importante de pollution par les ETM toxiques en surface du sol aux alentours des sites miniers Zeïda et Mibladen dans la Haute Moulouya. Du fait des pluies orageuses et des vents violents de la Haute Moulouya (Ngadi, 1995), la dispersion des polluants à partir des résidus miniers est réalisée en période de pluie comme en période sèche.

D'autre part, en plus des ETM, des quantités résiduelles significatives de réactifs chimiques et de leurs produits de dégradation pourraient aussi se trouver dans les résidus miniers de traitement à Zeïda et à Mibladen suite aux additifs chimiques et des réactifs utilisés lors de l'enrichissement et du traitement du minerai : sulfhydrate de sodium, amyloxanthate, silicate de sodium et huile de pin.

Néanmoins, les résidus de traitement de Zeïda et de Mibladen peuvent être revalorisés en particulier pour la récupération des métaux. En effet, les tonnages estimés pour l'ensemble des rejets de Zeïda et de Mibladen sont de : 98 128t de plomb, 88 948t de baryum, 2739,6t d'arsenic et 37,2t de cadmium.

3.3.2 Mobilité et dispersion des rejets

Les versants à résidus, que ce soit à Zeïda et à Mibladen dans la Haute Moulouya, disposés en tas et non végétalisés sont de stabilité physique faible. Les résidus sont non consolidés. La finesse et l'homogénéité de la taille des particules rendent ces résidus particulièrement sujets à une dispersion large dans l'environnement. Les contaminants métalliques sont alors largement disséminés dans l'environnement à partir des foyers permanents que constituent les rejets miniers et atteignent les ressources en eaux de surface et les sols les plus proches ou même les plus lointains. L'érosion hydrique en période de pluie, mais en particulier l'érosion éolienne en période sèche, constitue le vecteur efficace de la dispersion des résidus miniers à Zeïda et à Mibladen qui deviennent très mobiles. Selon Ngadi (1995), la Haute Moulouya connaît des pluies orageuses et des ruissellements en nappes ainsi que des vents violents aussi bien en été qu'en hiver. En conséquence, les circulations d'eaux dans les ouvrages des versants, non saturés et surmontant le substrat imperméable, sont essentiellement de sub-surface en été alors qu'en hiver ou après de fortes précipitations, le ruissellement

Tableau 4 : Concentrations du Pb et As dans les échantillons d'eau et les sédiments de l'Oued Moulouya et des lacs de carrières au niveau des districts miniers

Stations		Echantillons de la période sèche					Echantillons de la période de pluie				
		eau			Sédim.		eau			Sédim.	
		pH	Pb (µg/l)	As (µg/l)	Pb (ppm)	As (ppm)	pH	Pb (µg/l)	As (µg/l)	Pb (ppm)	As (ppm)
M1	Total * Partic.	8	12 11,6	45 43,2	20,2	5,2	7,8	41 39,64	38,2 36,05	18,9	6,9
M2	Total * Partic.	8,2	13,3 13	54 51,3	46	7,5	7,8	130 128,16	67,6 64,89	33	10,1
M3	Total * Partic.	8,1	21 20,3	57 54,9	498,6	8,2	8,3	432 431,01	64,9 62,39	513,8	7,4
Z1	Total * Partic.	8,7	24 18,7	165 55,5	114,56	14,27	8,7	64 56,6	180 70,8	125,8	15,12
Z2	Total * Partic.	9,2	40 36,5	73 61,7	1815	18,2	9,4	25 22,3	68,3 57,1	2277	20,08
Z3	Total * Partic.	7,9	22 21,2	60 55,1	26,85	8,77	8,2	24 20,3	64 59,2	24,76	8,88
Mib	Total * Partic.	8	41 29,6	57 54,7	611,36	10,06	8,3	36 26,4	89 85	2415	10,33

* : Métal Total = métal sous forme dissous + métal lié à la matière particulaire (Partic.).

de surface domine. Les pluies qui s'abattent sur les résidus miniers et sur le substrat nu sont immédiatement écoulées et collectées par l'oued Moulouya, ses affluents et les lacs de carrières. En période sèche, et suite aux vents violant fréquents que connaît la région, la déflation et le transport des particules des résidus sont réalisés par action éolienne. L'envol de particules fines de rejets miniers est important. Les rejets sont alors transportés, dispersés et atteignent les ressources en eaux et les sols avoisinants.

3.4 impacts environnementaux des rejets

3.4.1 pollution métalliques des eaux et des sédiments de l'oued Moulouya et des lacs de carrières au niveau des districts miniers

Les résultats d'analyses de deux ETM (Pb, As) dans les eaux et les sédiments de l'oued Moulouya (M2, M3) et des lacs de carrières (Z1, Z2, Z3, Mib) au voisinage des centres miniers (Tableau 4), montrent que les eaux et les sédiments sont contaminés par Pb et As, que ce soit en période de pluie ou en période sèche, avec des valeurs de concentrations supérieures à celles enregistrées à la station de référence M1 situé sur l'oued Moulouya à 30 Km en amont de la zone minière. Ce qui révèle l'impact des rejets miniers de traitement riches en ETM et situés aux abords de l'oued Moulouya et des lacs de carrières, sur la qualité des eaux de surface et sur les sédiments.

La contamination par Pb et As est élevée dans les eaux et les sédiments des lacs de carrières comparée à celle des eaux et des sédiments de l'oued Moulouya. La pollution est maximale dans les sédiments qui constituent une réserve potentielle de polluants. Les sédiments des stations les plus contaminées montrent des teneurs jusqu'à 20 fois supérieures à celles de la station de référence en particulier pour Pb. Ces teneurs en Pb sont en général supérieures aux teneurs considérées comme naturelles dans les sédiments : 19 µg/g (Bowen, 1979). Du point de vue qualité des eaux, les concentrations en Pb et As mesurées dans l'eau de la Moulouya et des lacs de carrières, au niveau des centres miniers, dépassent largement les concentrations moyennes des eaux douces naturelles estimées à 0,45 µg/l pour As (Casiot, 1999) et 3µg/l pour Pb (Bowen, 1979). Les concentrations en Pb et As dans l'eau pour les différentes stations, plus spécifiquement en période de pluie, dépassent largement les normes de potabilité ((norme de l'OMS : Pb : 10 µg/l // As : 10 µg/l (WHO, 1998) ; norme marocaine : Pb : 50 µg/l // As : 10 µg/l (N.M., 2002)). Ces données indiquent que ces eaux nécessitent le traitement pour la production d'eau potable. D'après les résultats, la charge en ETM (Pb et As) des eaux de la Moulouya est surtout sous forme particulaire, que ce soit en période de pluie ou en période sèche (Tableau 4). Les proportions de Pb et As particulières dans l'eau sont supérieures à 97 % en période de pluie et supérieures à 90 % en période sèche. Ces concentrations élevées en ETM particulières dans

les eaux de surface au niveau des centres miniers Zeïda et Mibladen, révèlent l'intense érosion et le lessivage important auxquels sont sujets, en période de pluie et en période sèche, les rejets miniers abandonnés sans végétalisation et les sols au voisinage des centres miniers. On note que les concentrations élevées en ETM particulière dans les eaux en période de pluie peuvent aussi être le résultat de la remobilisation et du relargage des ETM à partir des sédiments.

Les valeurs de pH des eaux de surface aux alentours des mines sont neutres à alcalines ($7,8 < \text{pH} < 9,4$) pour toutes les stations de l'oued Moulouya et des lacs de carrières que ce soit en période de pluie ou en période sèche, elles sont plus alcalines dans les lacs de carrières que dans l'oued. Selon Caboi (1999), 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. Selon Younger (1998), les principaux minéraux responsables de ce phénomène sont les carbonates (entre autres la calcite (CaCO_3) et la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)). Selon Collon (2003), d'autres minéraux, incluant les minéraux silicatés, peuvent aussi neutraliser l'acide produit par l'oxydation des minéraux sulfurés.

En effet, les eaux de surface qui s'écoulent vers l'oued Moulouya et vers les lacs de carrières ruissellent et s'infiltrant dans les résidus de traitement nus déposés aux abords à pH alcalin ($\text{pH eau} = 8,4$) riches en minéraux carbonatés (à Mibladen) et silicatés (à Zeïda) ainsi que dans la couverture marnodolomitique non végétalisée et dans les minéralisations résiduelles dans la région. Ceci permet de tamponner les eaux qui

auraient pu être acidifiées par l'oxydation des sulfures minéraux dans les rejets et les minéralisations résiduelles. L'oxydation et la lixiviation des rejets miniers exposés à l'air et aux eaux météoriques, à Zeïda et à Mibladen, ne génèrent pas d'acides. Les phénomènes du drainage minier acide (DMA), en particulier l'acidification des eaux de surface et des lixiviats phénomène le plus remarquable du DMA, n'ont été décelés nul part au niveau des districts miniers de la Haute Moulouya. L'exportation des éléments traces métalliques vers les eaux de surface sous forme dissoute à partir des résidus miniers de Zeïda et de Mibladen est par conséquent limitée. Selon Argane (2012), des essais de lixiviation des rejets miniers de Zeïda et de Mibladen dans des mini cellules d'altération ont montré que ces lixiviats sont caractérisés par des pH neutres et une faible concentration en métaux dissous. Il s'agit du drainage minier neutre (DMN) (appelé aussi drainage neutre contaminé DNC) caractérisant la zone minière de Zeïda et de Mibladen dans la Haute Moulouya au Maroc.

3.4.2 Pollution métalliques des sols au niveau des districts miniers

L'évaluation du degré de contamination des sols non rhizosphériques (sols nus) par les éléments trace métalliques Pb, Zn, Cu, Cd au voisinage des centres miniers Mibladen- Zeïda, montre que les sols non rhizosphériques aux alentours des versées à résidus, présentent des teneurs élevées en ETM par rapport aux teneurs normales des sols non contaminés données par Bowen (1979) (Tableau 5).

Tableau 5 : Teneurs moyennes en ETM des échantillons de sols de la région minière.

site/Sols non rhizosphériques		Teneurs en ppm			
	pH	Pb	Zn	Cu	Cd
S1 (Sol de référence)	7,8	13,75	126,9	13,3	0,3
S2 Zeïda	8,5	79,2	2875	18,2	0,21
S3 //	8,1	72,8	3208	22,07	0,29
S4 //	8,3	230,1	2458	14,2	0,51
S5 //	8,2	566,8	1475	84,7	1,8
S6 Mibladen	8,7	71	3016	24,02	11,27
Teneurs normales des sols non contaminés (Bowen, 1979)		35	90	30	0,35

Ces teneurs dépassent pour tous les sols étudiés les teneurs enregistrées pour le sol de référence (S1), elles sont plus élevées jusqu'à 40 fois, 25 fois, 6 fois, 36 fois respectivement pour Pb, Zn, Cu et Cd. Les teneurs totales en Pb dans les résidus miniers, comparées aux teneurs du sol de référence S1, sont 760 fois plus élevées dans les résidus de Mibladen et 400 fois plus élevées dans les résidus de Zeïda, alors que pour Zn, les teneurs sont 59 fois plus élevées dans le rejets de Zeïda et 71 fois plus élevées dans le rejets de Mibladen.

L'augmentation des teneurs en ETM dans les sols, avoisinants les mines Zeïda et Mibladen, est le résultat d'une part de la dissémination en période sèche et en période de pluie de ces éléments contenus dans les rejets miniers et d'autre part de la désagrégation des minerais métallifères résiduels dans la région.

En effet, en période sèche, la déflation et le transport des particules des résidus sont réalisés par action éolienne suite aux vents violant fréquents que connaît la région. Selon Raynal (1961), en été, les vents dans la région provoquent des nuages de poussière qui peuvent durer plusieurs jours. Ainsi, l'envole de particules fines à partir des résidus miniers non végétalisés est important, des matières en suspension et des poussières toxiques volantes riches en ETM atteignent les ressources en eaux de surface et les sols avoisinants et même les plus lointains, entraînant ainsi leur contamination. En outre, les poussières, surtout les plus fines, constituent une source de nuisance pour les habitants du village Zeïda (9920 habitants) et du village Mibladen (3087 habitants) situés dans les directions des vents dominants, ces poussières sont directement inhalées ou ingérées avec les récoltes sur lesquelles elles se sont déposées et constituent ainsi une source potentielle d'intoxication en ETM en particulier au plomb et à l'arsenic chez les riverains. En périodes de pluies, les fréquents orages que connaît la région de la Haute Moulouya, donnent un ruissellement en nappes et des crues. Les résidus de traitement à Zeïda et à Mibladen, de stabilité physique et chimique faible, subissent alors le lessivage et libèrent des ETM dissous et surtout particulaires. Le transport de ces ETM vers les ressources en eau et les sols avoisinants est inévitable du fait du substrat marnodolomitique imperméable que surmontent les résidus miniers. La désagrégation des minerais métallifères résiduels dans la région est une autre source de contamination des sols par les ETM. En effet, le Pb peut provenir des minerais de galène (PbS) et de cérusite (PbCO₃) ; le Cu peut provenir des minerais de chalcopryrite (CuFeS₂), de malachite (Cu₂(OH)₃CO₃), de chalcocite (Cu₂S) ou de l'azurite (Cu₃(CO₃)₂(OH)₂). Pour le Zn, la contamination des sols au niveau des mines par cet élément peut être expliquée par désagrégation de la blende (ZnS) et de la smithsonite (Zn CO₃), minerais de Zn généralement associés à la galène. Quant au Cd, il se trouve associé avec le Zn, avec le Pb et le Cu dans les minerais. D'autre part, La contamination des sols au voisinage des sites miniers

de la Haute Moulouya peut affecter les quantités d'ETM puisés par les végétaux à partir de ces sols. En effet, selon Underwood (1971), les concentrations excessives de certains ETM dans les sols peuvent être toxiques pour les plantes et les animaux et peuvent affecter la production ainsi que la qualité des denrées alimentaires de consommation humaine. Ainsi, les versées à résidus de traitement à Zeïda et à Mibladen, constituent une nuisance pour toutes les composantes de l'environnement de la Haute Moulouya.

Conclusion

Les rejets miniers de traitement des mines Zeïda et Mibladen dans la Haute Moulouya au Maroc ont été étudiés. Ces rejets déposés sur les berges de l'oued Moulouya et de ses affluents sont constitués de particules de granulométrie sableuse, pauvres en matière organique et riches en carbonates et/ou silicates. Ces résidus de stabilité physique faible et sans couvert végétal, sont sujets à une dissémination large sous l'effet des vents violent et des pluies orageuses que connaît la région. Ces rejets à pH alcalin (8,4) riches en ETM (Pb: 5547ppm pour RZ//10520ppm pour RM) présentent une capacité polluante élevée en particulier par les ETM contaminants et constituent des sources permanentes pour ces éléments dans l'environnement. La dispersion des polluants à partir des résidus miniers est réalisée, spécifiquement sous forme particulière, en période de pluie comme en période sèche par les pluies orageuses et les vents violents que connaît la Haute Moulouya. La pollution des ressources en eau de surface, la contamination des sédiments et des sols de la région sont confirmés.

En effet, les résultats d'analyses des ETM (Pb,As) dans les eaux et les sédiments de l'oued Moulouya et des lacs de carrières aux alentours des rejets miniers, montrent que les eaux et les sédiments sont contaminés par Pb et As (Eaux: Pb :13-430µg/l//Sédiments: Pb :33-2415ppm), que ce soit en période de pluie ou en période sèche. La pollution est maximale dans les sédiments qui constituent une réserve potentielle de polluants. Les concentrations de Pb et As mesurées dans l'eau de la Moulouya et des lacs de carrières, au voisinage des centres miniers Mibladen- Zeïda, dépassent largement la concentration moyenne des eaux douces naturelles comme elles dépassent les normes de potabilité, ce qui montre que la qualité de ces eaux, au niveau des centres miniers, est dégradée. L'évaluation du degré de contamination des sols non rhizosphériques par les ETM (Pb, Zn, Cu, Cd) au voisinage des centres miniers, montre que ces sols aux alentours des versées à résidus, présentent des teneurs élevées en Pb, Zn, Cu et Cd (Pb :71-566ppm, Zn : 1475-3208ppm, Cu :14,2-84,7ppm, Cd :0,21-11,27ppm) par rapport aux teneurs normales des sols non contaminés. La contamination des sols au voisinage des sites miniers peut affecter les quantités d'ETM puisés par les végétaux à partir de ces sols. Toutefois, on note que le risque de contamination lié à l'altération chimique à partir des rejets miniers étudiés est réduit suite d'une part au manque

d'humidité en climat semi aride favorisant les réactions chimiques au sein des rejets et d'autre part suite à l'abondance des carbonates et/ou des silicates dans les rejets et dans les terrains géologiques de la région. Les phénomènes du drainage minier acide (DMA), en particulier l'acidification des eaux de surface et des lixiviats, phénomène le plus remarquable du DMA n'ont été décelés nulle part au niveau des districts miniers. Il s'agit du drainage neutre contaminé (DNC) pour les rejets des mines Zeïda et Mibladen de la Haute Moulouya. L'érosion mécanique éolienne est le vecteur principal de la dispersion, à partir des rejets miniers étudiés, de particules en suspension contaminants. Par ailleurs, les résidus de traitement de Zeïda et de Mibladen doivent être réhabilités comme ils peuvent être revalorisés en particulier pour la récupération de quelques métaux (Pb, As, Ba, Cd).

Références bibliographiques

- ARGANE, R., EI ADNANI, M., HAKKOU, R., BENZAAZOUA, M., BOUAMRANE, A., KHALIL, A., (2012). Environmental Geochemistry of the Zeïda Mine Site, Morocco, IST International Congress on the Management of Mining Wastes and Closed Mines, 3-6 April 2012 Marrakech Morocco.
- B.R.G.M. (1999). Les résidus miniers français: typologie et principaux impacts environnementaux potentiels. Techniques de l'industrie minière 3: 3ème Trimestre, pp : 77-110.
- BOWEN, H.J.M. (1979). Environmental Chemistry of the Elements. Academic Press, New York, pp. 49-62.
- CABOI, R., CIDU, R., FANFANI, L., LATTANZI, P. & ZUDDAS, P. (1999). Environmental mineralogy and geochemistry of abandoned Pb-Zn Montevecchio-Ingurto mining district, Sardinia, Italy, Chronique Recherche Minière 534, 21-28.
- CASIOT, C. (1999). Développement de techniques analytiques couplées (HPLC-ICP-MS et EC-ICP-MS) pour la spéciation des métalloïdes (Arsenic, Sélénium, Antimoine et Tellure). Thèse, Univ. Pau. France, 185p.
- CHIFFOLEAU, J.F. & TRUQUET, I. (1994). Nouvelles méthodes de dosages des métaux traces dans les sédiments et les matières en suspension. R. INT. DEL. 08-94 IFREMER.
- COLLON (2003). Evolution de la qualité de l'eau dans les mines abandonnées du bassin ferrifère lorrain. De l'expérimentation en laboratoire à la modélisation in situ. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 246 p.
- EMBERGER, A. (1965). Eléments pour une synthèse métallogénique du district plombifère de la Haute Moulouya. Colloque sur des gisements stratiformes de plomb, zinc et de manganèse du Maroc. Notes & M. Serv. Géol. Maroc, N° 181, pp : 167-174/205-244.
- FELENC, R. & LENOBLE, J.P. (1965). Le gîte de plomb de Mibladen. Colloque sur des gisements stratiformes de plomb, zinc et de manganèse du Maroc. Notes & M. Serv. Géol. Maroc, N° 181, pp: 185-204.
- FOUCAULT, A. (1995). Dictionnaire de géologie, 4è éd., Masson, Paris, 323p.
- HENDERSHOT, W. H., LALANDE, H. & DUQUETTE, M. (1993). Soil reaction and exchangeable acidity. In: Carter, M.R. Ed, Soil Sampling and Methods of Analysis for Canadian Society of Soil Science. Lewis, Boca Raton, FL, pp: 141-145.
- IAVAZZO, P., ADAMO, P., BONI, M., HILLIER, S., ZAMPLLA, M., (2011). Mineralogy and chemical forms of lead and zinc in abandoned mine wastes and soils: An example from Morocco. Journal of Geochem. Explor. doi:10.1016/j.gexplo.2011.06.001
- LEE, C.G., CHON H.T. & JUNG M.C. (2001). Heavy metal contamination in the vicinity of the Daduk Au-Ag-Pb-Zn mine in Korea. Applied Geochemistry 16, 1377-1386.
- NGADI, M. (1995). Précipitations et écoulements dans le bassin versant de la Moulouya (Maroc). Thèse de Doctorat Université Montpellier III, France, 333 p.
- N.M. (2002). Norme Marocaine Qualité Eaux. Bulletin officiel, N° 5062.
- RAYNAL, R. (1961). Plaines et piedmonts du bassin de la Moulouya (Maroc oriental). Edition Imframmar, Rabat, Maroc.
- SCHMITT, J. M. (1976). Sédimentation, paléaltération, géochimie et minéralisation en plomb de la série Triasique de Zeïda (Haute Moulouya, Maroc). Thèse de Doctorat. Ecole nationale supérieure des mines, Paris, 110p.
- UNDERWOOD, E.J. (1971). Traces elements in human and animal nutrition, 3rd Edn. Academic Press.
- YOUNGER P.L., BANWART S.A., NUTTAL C., JARVIS A.P. (1998). Mine waste and minewater pollution – Short course, The Mining Institute, Newcastle Upon Tyne.
- WHO. (1998). Guideline for drinking water quality, 2nd edition, volume 2, health criteria and other supporting information. World Health Organisation, Geneva.