

## Evaluation de la contamination et évolution de la qualité des eaux au voisinage d'une

### mine abandonnée d'extraction de plomb

(Zaida - Haute Moulouya – Maroc)

### Assessment of Water Quality in Abandoned Lead Mine environment in the High Moulouya in Morocco

*Bouamar BAGHDAD<sup>1</sup>, Mustapha NAIMI<sup>1</sup>, Abdelhak BOUABDLI<sup>2</sup>, Philippe SONNET<sup>5</sup>, Antonio Sanchez GARCIA<sup>3</sup>, Moussa BOUNAKHLA<sup>4</sup> et Adolfo Carlos INIGO INIGO<sup>3</sup>*

*1 Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, BP 6202, Madinat El Irfane, 10100 Rabat, Maroc*

*2 Université Ibn Tofail, Faculté des Sciences, Département de Géologie, 1074 Kenitra, Maroc*

*3 CSIC, Institut de recherches Naturelles et agrobiologiques, 37008 Salamanca, Espagne*

*4 Centre National de l'Energie des Sciences et Techniques Nucléaires, DASTE, 10001 Rabat, Maroc*

*5 Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale, UCL, 1348 LLN, Belgique*

Courriel/ [b.baghdad@iav.ac.ma](mailto:b.baghdad@iav.ac.ma) ; Tél. +212 661 344724 ; Fax : 00212 537 672750

#### Résumé :

La Haute Moulouya est un secteur où l'exploitation minière a été très développée au 20<sup>ème</sup> siècle. Les résidus miniers abondants qu'elle a engendrés ont été disposés en haldes qui n'ont fait l'objet d'aucune réhabilitation sur le plan environnemental. La qualité des eaux souterraines et de surface en ce qui concerne les éléments traces métalliques a été étudiée au voisinage du centre minier abandonné de Zaida. Soixante sept échantillons d'eau ont été prélevés au sein du territoire de la commune de Zaida le long de l'oued Moulouya qui draine le centre minier, dans des lacs de carrières à ciel ouvert et dans des puits. Le but de cette étude est de connaître les teneurs en éléments traces métalliques (ETM) des eaux de la commune et leurs relations avec les rejets miniers. Quatre métaux lourds (Cu, Pb, Zn et Cd) ont été déterminés dans les eaux échantillonnées ainsi que les ions habituels (Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mn<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Fe<sup>++</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), le pH et la conductivité électrique. Les analyses ont été faites par ICP-AES. Les résultats d'analyse montrent que les eaux souterraines sont caractérisées par une salinité globale variable d'un puits à l'autre, une forte charge minérale et de faibles teneurs en métaux lourds pour la majorité des puits. Le Pb, le Zn et le Cu suspectés n'atteignent des concentrations élevées que dans quelques puits. D'autre part, l'analyse des rejets miniers et des eaux de surface a montré une contamination des eaux et des teneurs élevées en ETM dans les haldes. On a également noté des teneurs relativement élevées des eaux superficielles en métaux (Pb, Zn, Cu) mais pas en Cd, qui présente des concentrations relativement faibles.

Mots clés : Haute Moulouya, Zaida, mine de plomb, ETM, rejets miniers, qualité des eaux.

#### Abstract

The High Moulouya is a region where intensive mining activities developed during the 20th century. Abundant mining waste generated by these activities has been dumped in piles which have never been subjected to rehabilitation. The quality of ground and surface waters have been studied in the vicinity of abandoned mining center of Zaida township. The goal of this study was to determine the content of metallic trace elements (MTE) in waters of the township and to study their relationships with mining disposal. Water samples have been collected along the Moulouya River, from quarry lakes, and in existing wells. Four heavy metals (Pb, Cu, Zn and Cd) in addition to usual ions (Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mn<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Fe<sup>++</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), pH and electric conductivity have been determined in these water samples. Chemical determinations have been made using ICP-AES. Results showed that ground water is characterized by a significant global salinity which varies among wells, a high mineral load and low concentrations of heavy metals in most wells. Greater concentrations of Pb, Zn and Cu were only observed in wells that were close to the piles of barren. Analysis of mining disposal and surface water revealed a substantial contamination of water because MTE contents are higher in the barrens.

Significant Pb, Zn and Cu contents were found in surface water, but not for Cd, which presented relatively low concentrations.

Key words: Water Quality, MTE, Lead Mine, Zaida, High Moulouya, Morocco

## 1 INTRODUCTION :

Les mines abandonnées ont causé et continuent à causer de nombreux problèmes à l'environnement. Les métaux lourds issus de ces mines, sont pour la plupart, à des teneurs élevées, et constituent un danger pour la santé publique lorsque ceux-ci parviennent à contaminer les eaux. Aussi, la pollution des eaux par les métaux lourds au voisinage des mines a-t-elle été souvent signalée dans la littérature (Smith et Bradshaw, 1972 ; Merrington et Alloway, 1994 ; Fanfani et al, 1997 ; Paquette et al, 2000 ; Jung, 2001; Jabour, 2003). Cela entraîne la nécessité de connaître l'état de pollution des eaux et les mécanismes géochimiques qui gouvernent la migration des métaux lourds depuis les rejets miniers vers les eaux souterraines et superficielles.

Le présent travail s'intègre dans l'étude d'impact et de l'évaluation de la pollution minière dans le bassin versant de la Moulouya qui est le plus grand fleuve de la bordure sud-ouest de la méditerranée. La Moulouya traverse la commune de Zaida d'une superficie de 30.000 ha au sein de laquelle se trouve une mine à ciel ouvert du même nom dont l'activité principale était l'extraction de minerai de Pb. Les déchets solides (haldes) engendrés par cette activité sont riches en sulfures de fer (pyrites, pyrrhotites) et autres sulfures (galène, sphalérite, chalcopryrite,... ; Pellet, 1963, Emberger, 1965 ; Amade, 1965). Ils sont stockés à proximité immédiate de l'oued Moulouya. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact de ces rejets miniers sur la composition chimique et les teneurs en métaux des eaux superficielles et souterraines. Pour cela, des prélèvements d'eaux ont été effectués dans l'oued Moulouya en amont et en aval de la mine, dans les lacs (anciennes carrières à ciel ouvert) ainsi que, les eaux d'une cinquantaine de puits de la commune. La distance par rapport à la source de pollution a été aussi considérée. Et des échantillons de rejets miniers ont été également prélevés. La caractérisation physico-chimique de l'ensemble de ces échantillons a été effectuée aux laboratoires (Baghdad et al ., 2006b) selon les méthodes normalisées.

Dans la région qui fait l'objet de la présente étude, l'alimentation en eau des communes se fait exclusivement à partir de la nappe superficielle, des eaux des oueds et des lacs sans aucun traitement préalable. Des études antérieures ont montrés que les eaux de l'oued Moulouya sont soumises à de multiples sources de pollution. Parmi ces sources, les mines abandonnées de la Haute Moulouya (Zaida, Aouli et Mibladan) constituent une menace persistante pour les eaux de ce oued et celles de proximité. Des études ont déjà signalé une pollution par les métaux lourds de eaux de surface de cet oued (El Founti 2000, Ech-Chokri, 2000, Assi, 2001, Saidi et al., 2002 ; Bouabdli et al., 2004 et 2005 ; El Hachimi et al., 2005, Baghdad et al., 2005 et 2006a). Cependant, l'impact de ces mines sur les eaux souterraines n'est pas encore connu, alors que la commune de Zaida contient à elle seul environ un millier de puits dont plus de 800 sont actifs et exploités pour l'alimentation en eau et l'agriculture.

## 2 MATERIELS ET METHODES :

### 2.1 Le site d'étude

La commune de Zaida est située dans la Haute Moulouya, qui forme la partie haute du bassin versant de la Moulouya (fig. 1). Sur le plan géologique, la Haute Moulouya est composée de terrains d'âge paléozoïque, recoupés par des intrusions granitiques hercyniennes, sur lesquels vient se déposer en discordance angulaire une couverture mésozoïque (Emberger, 1965). La mise en place des massifs primaires et une activité volcanique (volcanisme basique) ont provoqué la formation d'une minéralisation polymétallique d'importance majeure à molybdénite, avec des indices de Mn et de chalcopryrite. Dans les boutonnières de la Haute Moulouya, le gisement important est celui de Pb. Ce lui de Zaida est de type Stratiformes à Pb-Ba dans le Trias détritique (Emberger A, 1965). Il s'agit d'un dépôt d'arkose contenant galène, barytine et fluorine.

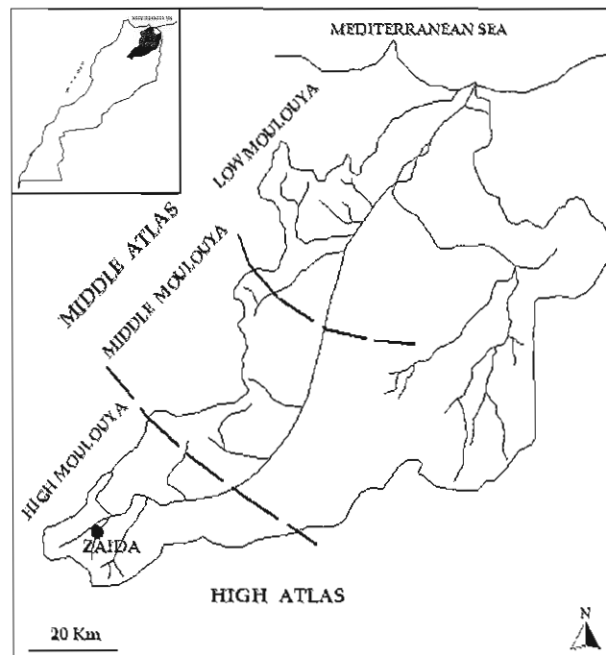


Figure 1. Carte de situation géographique du centre minier de Zaida  
 Figure 1. Geographic location map of the mining center of Zaida

L'impact visuel de la mine de Zaida (figure 2) est constitué par trois digues à résidus de traitements, des terrils à résidus de découverture, un ensemble de carrières à ciel ouvert et l'ancienne usine avec ses installations de surface :

- Les digues à résidus de traitements (haldes : H1, H2 et H3) sont disposés en tas d'environ 15 Mt et dépassant chacune plus de 10 m de hauteur qui ont été ravinés par les eaux météoriques, ils sont de granulométrie sableuse constitués pour l'essentiel par le quartz, le feldspath calco-sodique et la muscovite, et présentent de fortes concentrations en ETM surtout le Pb ;
- Les terrils à résidus de découverture sont constitué de matériaux de découverture ne contenant que peu ou pas de minerais (conglomérats, grès arkosiques rouge, grès argileux rouge, marnes, argiles...etc.) dépassant plus de 20 m de hauteur et occupant une superficie très importante du district minier de Zaida. Ces matériaux n'ont pas été étudiés dans ce travail ;
- Les carrières à ciel ouvert sont situées au pied des digues ou des terrils, dont plusieurs sont comblées d'eau de la nappe, de ruissellement ou de débordement de l'oued Moulouya, formant des lacs (C1, C2, C3, C4, C5 et C6) de 1 à 10 ha de superficie et contenant chacune selon les saisons entre 0.1 et 4 Mm<sup>3</sup> d'eau. La plupart sont pérennes ;
- l'ancienne usine avec ses installations de surface (ateliers, laveries, bassins de décantation, matériel abandonné et produits de traitement (sels) laissé à l'air libre) est située sur la rive droite de la Moulouya en face du centre de Zaida.

## 2.2 L'échantillonnage

Pour connaître les niveaux de concentration et évaluer le risque de contamination des eaux souterraines et superficielles par ces métaux, des analyses chimiques des eaux (souterraines et superficielles) et des rejets miniers ont été réalisées pour la détection des concentrations en Pb, Cu, Zn et Cd.

Les eaux souterraines ont été prélevées sur un réseau d'échantillons de puits actifs recouvrant totalement la zone en question (figure 2) et dont la piézométrie a été relevé et la position (coordonnées) a été déterminée à l'aide d'un GPS. Cinq cent soixante dix puits ont été inventoriés parmi lesquels cinquante et un ont été choisis pour analyse. Pour les eaux superficielles, des échantillons d'eau ont été prélevés au niveau du centre minier de Zaida dans l'oued Moulouya et dans les lacs de carrières (figure 2). L'échantillonnage a été réalisé

au cours de l'année 2005 en période de crue. Des rejets miniers et des résidus de traitement ont été également prélevés sur plusieurs points du site (haldes, anciens stocks de produits de traitement,... etc.).

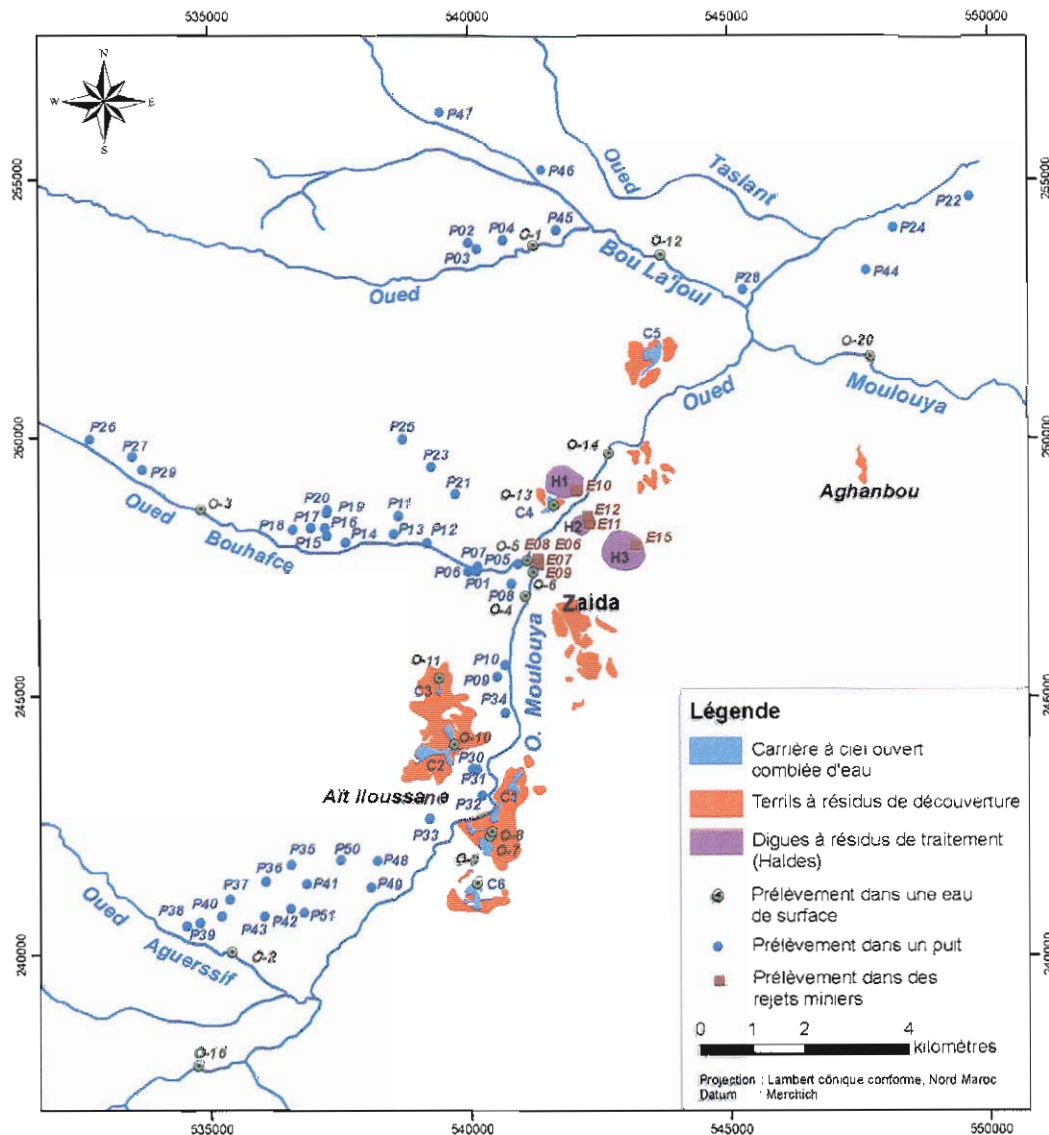


Figure 2 : Impacts visuels de la mine abandonnée de Zaida et positions des échantillons (d'après l'image satellite Spot – XS du 29 novembre 2002)

### 2.3 L'analyse

Les échantillons d'eau prélevés ont été conservés dans des flacons en polyéthylène destinés aux différentes analyses et après ajout d'acide nitrique à 4%. Les paramètres température, pH, et conductivité électrique des eaux ont été mesurés in situ. Les échantillons de rejets miniers ont été prélevés à la surface de ceux-ci (10 cm de profondeur). Ils ont été conservés dans des sacs en papier et ensuite broyés dans un mortier en agate et tamisés à 0.5 mm, puis ont subi une attaque aux acides. La digestion a été réalisée sous hotte par des solutions d'acides concentrés (acide nitrique 70% (1ml) + acide fluorhydrique (10ml)) à approximativement 120°C. Après évaporation le résidu est attaqué avec l'acide perchlorique (10 ml) et puis séché à 160°C. Ensuite, une autre attaque avec l'acide nitrique 70% (1ml) et l'acide chlorhydrique 38% (3ml) est effectuée sur les échantillons. L'attaque se fait dans des récipients en téflons pour résister à HClO<sub>4</sub> et aussi pour minimiser les contaminations. Après réaction, les solutés ont été filtrés et portés à volume avec de l'eau désionisée (H<sub>2</sub>O MQ). L'acidité active (pH-eau) des haldes a été mesurée à l'aide d'un ph-mètre à électrode après avoir mis en contact 20 g de sable avec 50 ml d'eau distillée pendant 2h.

Les analyses des métaux (Pb, Zn, Cu et Cd) ont été effectués par ICP-AES (Inductive Coupled Plasma - Atomic Emission Spectroscopy) au Centre national des études scientifiques et techniques de l'énergie nucléaire (CNESTEN) à Rabat au Maroc pour les eaux et à l'Unité des sciences du sols de la Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale de l'Université Catholique de Louvain (UCL) en Belgique pour les rejets miniers.

### 3 RESULTATS ET DISCUSSION :

#### 3.1 Eaux souterraines :

La qualité naturelle de l'eau souterraine est peu documentée dans la région de la Haute Moulouya, malgré l'existence de plusieurs milliers de puits. La qualité physico-chimique des eaux souterraines est globalement moyenne à bonne par rapport aux normes et critères des eaux marocaines (Normes marocaines, 2002) sur l'ensemble des aquifères de la commune de Zaida (Baghdad, 2005 ; Baghdad, 2006a). Toutefois dans le détail, les résultats des analyses effectuées, mettent en évidence une situation contrastée. Pour les paramètres de dureté, le fer et le manganèse présentent des concentrations moyennes respectivement de 0.027 et 0.078 mg/l et sont donc inférieurs aux normes de potabilités (européennes, 1991 ; Normes marocaines, 2002) (Tableau 1). Le chlore, le calcium, le sodium le magnésium et le potassium, présentent à quelques endroits, des concentrations qui excèdent largement les recommandations marocaines (N. M., 2002) sur l'eau potable (Tableau 1). Les nitrates sont sous le seuil recommandé (< 50 µg/l), mais neuf sur cinquante et un puits analysés présentent une concentration en nitrate supérieure au seuil de 10 mg/l généralement admis pour les eaux naturelles (Blum A., 2004). Ceci est donc signe d'une influence anthropique. Les sulfates présentent des concentrations relativement élevées avec une moyenne de 631.50 mg/l.

Les résultats obtenus montrent également que les eaux des nappes présentent une variabilité spatiale importante de point de vue salinité avec 25% des puits présentant une conductivité électrique supérieure à 2000 µS/cm (Tableau 2), ce qui est ordinairement indicateur d'une eau chargée en sels minéraux. L'eau est alcaline avec un pH variant entre 7.5 et 8,0 (Tableau 2).

**Tableau 1. Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la commune de Zaida. (Nombre de puits analysés: 51)**

Elément (mg/l)	Cl	Mn	Ca	Na	Mg	K	Fe	SO4	NO3
Minimum	58	0,0003	36,6	12,5	23,4	1,5	0,002	134	0,34
Moyenne	472	0,078	157	142	107	13,9	0,027	631	6,62
Maximum	844	1,2	825	618	455	95,4	0,309	2160	40,6
Norme (mg/l) Marocaine et européenne	200	5	100	150	50	12	1 - 2	250	50

Pour les ETM (Tableau 2), à part dans quelques puits où les concentrations sont largement au-dessus des normes; Les teneurs en Pb, Zn, Cd et Cu sont minimes et largement au dessous des normes usuelles marocaines (N. M., 2002) et celles des Directives européennes (1991).

**Tableau 2. Niveaux de concentration en métaux lourds, pH et conductivité électrique des eaux souterraines de la commune de Zaida. (nd : non déterminée)**

N° Puits	Métal	Pb (µg/l)	Zn (µg/l)	Cu (µg/l)	Cd (µg/l)	pH	CE µS/cm
P1		<1	2	8	0,8	7,68	5480
P2		nd	nd	1100	<0,1	7,35	4430
P3		<1	2	5	0,5	7,44	4360
P4		<1	49	5	0,4	7,9	4250
P5		1500	nd	nd	<0,1	7,38	6290
P6		<1	4	5	<0,1	7,28	310
P7		nd	1000	1000	<0,1	7,35	3030
P8		nd	nd	1200	<0,1	7,23	3350
P9		nd	nd	nd	<0,1	7,65	2060
P10		5	3	6	<0,1	7,22	4080
P11		5	4	4	<0,1	7,27	3820
P12		nd	nd	nd	<0,1	7,37	2360
P13		nd	80	nd	<0,1	7,06	3150
P14		<1	4	3	<0,1	6,96	2690
P15		nd	nd	nd	<0,1	7,85	130
P16		<1	3	3	<0,1	7,55	130
P17		nd	950	nd	<0,1	8,01	210
P18		nd	480	nd	<0,1	nd	nd
P19		<1	4	4	<0,1	7,68	140
P20		<1	2	5	<0,1	7,84	120
P21		<1	2	6	0,9	7,87	190
P22		<1	2	5	0,5	7,87	110
P23		nd	360	nd	<0,1	7,67	110
P24		nd	100	2300	<0,1	7,75	140
P25		<1	4	4	<0,1	7,85	50
P26		nd	550	1200	<0,1	7,75	110
P27		<1	4	6	<0,1	7,41	205
P28		<1	160	1100	<0,1	7,46	310
P29		<1	210	nd	<0,1	7,57	140
P30		<1	2	3	<0,1	7,58	150
P31		<1	400	nd	<0,1	7,51	160
P32		<1	240	<1	nd	7,52	160
P33		<1	3	3	<0,1	7,56	250
P34		<1	270	nd	<0,1	7	250
P35		nd	<0,1	nd	<0,1	7,77	10
P36		<1	3	3	<0,1	7,69	350
P37		nd	80	nd	<0,1	7,51	220
P38		nd	<0,1	3100	<0,1	7,68	70
P39		<1	1	3	<0,1	7,91	120
P40		nd	10	nd	<0,1	7,48	120
P41		<1	0,7	3	<0,1	7,55	70
P42		nd	160	nd	<0,1	7,73	50
P43		nd	60	nd	<0,1	7,58	60
P44		nd	06	4	nd	6,97	90
P45		nd	<0,1	nd	<0,1	7,55	130
P46		<1	8	5	0,9	7,66	70
P47		nd	<0,1	nd	<0,1	7,95	70
P48		nd	80	nd	<0,1	7,63	140
P49		<1	1	3	<0,1	nd	nd
P50		<1	3	4	<0,1	7,92	80
P51		5	3	5	<0,1	7,46	170

Pour le Pb, un seul puits (P5) présente une teneur anormalement élevée (1500 µg/l). Ce puit est situé dans la zone de l'activité minière non loin de l'usine de traitement et des haldes et elle est donc probablement liée à cette activité minière puisque le P6 se trouvant à 800 m du puit P5 et dans le même aquifère que celui-ci présente des teneurs faibles en Pb (<1 µg/l). Pour le Cu sept puits (P2, P7, P8, P24, P26, P28 et P38) présentent des teneurs anormalement élevées oscillant entre 1100 et 3100 µg/l. Ceci est probablement lié à la composition du substrat puisque ces puits sont répartis sur l'ensemble de l'aquifère et sont loin de toute source de contamination (industrielle, agricole...). Pour le Zn, deux puits présentent des concentrations très élevées (P17 avec 950 µg/l et P7 avec 1000 µg/l) tandis qu'un puit a une concentration légèrement supérieure à la norme P26 avec 550 µg/l. Ces puits sont situés le long de l'oued Bouhafce. De l'amont vers l'aval on remarque qu'il y a une augmentation de la teneur en Zn et donc ceci est lié à la composition du substrat pour le point P26 en amont et probablement, en plus, à une contamination par la mine pour le point P7 en aval qui n'est pas loin de l'usine et des haldes. Enfin en ce qui concerne le Cd, les teneurs dans tous les puits sont inférieures aux normes (<5 µg/l ; Tableau 2).

Ces valeurs élevées de métaux lourds dans les eaux souterraines pourraient être attribuées pour les puits P2, P24, P26, P28 et P38 à la nature et à la composition des substrats rocheux pour le Zn et le Cu. Pour le Pb présent en teneur élevée dans le seul puit P5 et pour le Zn dans le puit P8 situés non loin de l'usine et des haldes l'origine du métal est probablement liée à ces déchets. Des études (Citeau, 2004 ; Adriano, 1986 ; Pichard et al., 2004) montrent que les métaux Pb, Zn, Cu et Cd migrent peu en profondeur dans les aquifères, sauf dans des conditions particulières de drainage ou en milieu très acide. En effet, il existe un pH en dessous duquel ces métaux sont brusquement relargués par les sols et les sédiments, ce qui entraîne une mobilisation des métaux (Martinelli, 1999). Le pH est différent selon le métal considéré; 4 pour le Pb, 5 pour le cuivre, 5.5 pour le Zinc et 6 pour le cadmium (Citeau, 2004). Ceci n'est pas, actuellement le cas pour la commune de Zaida où on a une alcalinité déclarée avec un pH supérieur à 7.5 et où ces métaux évoluent dans un milieu basique.

On retiendra donc que ces données mettent en évidence une probable contamination des eaux souterraines en métaux lourds, en sulfates et en nitrates mais que pour ces paramètres, les pollutions restent relativement ponctuelles.

### 3.2 Eaux de surface :

Le tableau 3 présente les teneurs en Pb, Zn, Cu et Cd, le pH et la conductivité électrique des eaux superficielles de la commune de Zaida prélevées dans l'oued Moulouya et ses affluents (A) ou dans les carrières à ciel ouvert (B) avec un prélèvement d'eau de pluie (O6) dans un ancien bassin de décantation fermé au niveau de l'usine.

1- Pour les eaux de l'oued Moulouya (O4, O5, O14, O16 et O20) et ses affluents (O1, O2 O3, et O12), les concentrations en éléments traces Pb, Zn, Cu et Cd sont nettement variables d'un point d'échantillonnage à l'autre. Les concentrations sont en général supérieures aux concentrations mesurées à la station O16 en aval du village et de la mine de Zaida (Baghdad et al., 2006) et également à la station de référence M1 (El Founti et al., 2000 ; Bouabdli et al., 2004 ; El Hachimi et al., 2005 ; Baghdad et al., 2006) située en amont à 30km de Zaida sur l'oued Moulouya.

Les concentrations des différents métaux varient respectivement de <1 à 2.95 µg/l pour le Pb, de 0.07 à 0.95 µg/l pour le Zn, de 1 à 1.9 µg/l pour le Cu et <0.1 pour le Cd. Le pH est toujours supérieur à 7 et oscille entre 7.42 et 7.91. La conductivité électrique varie de 370 à 2380 µS/cm.

Dans les points d'échantillonnage (O4, O5, O14 et O20), situés au niveau du village de Zaida, de l'usine, des haldes et en aval de celle-ci les teneurs en Pb dans l'eau respectivement de 2.95 µg/l, 2.56 µg/l, 2.53 µg/l et 2.25 µg/l sont supérieures aux teneurs enregistrées en amont du village dans la station O16 ainsi que dans toutes les stations (O1, O2, O3 et O12) sur les affluents qui ont toutes une teneur inférieure à 1 µg/l. Pour le Zn, la station O4 au niveau du village et la station O20 en aval de la mine présentent des teneurs supérieures à celle de la station O16 avec respectivement 0.95 µg/l, 0.3 µg/l et 0.1 µg/l. Les teneurs en Cu au niveau des eaux des oueds ne présentent pas de très grandes variations, mais on note une augmentation de la teneur du Cu entre les stations O16 en amont de la

mine et O4 avant le village de Zaida avec 1.2 µg/l et les stations O5 au niveau de la mine et O20 en aval de celle-ci avec respectivement 1.9 µg/l et 1.35 µg/l. Ceci montre directement l'effet de l'usine et des haldes sur les teneurs en Cu de l'oued Moulouya. Les autres stations sur les affluents de la Moulouya présentent toutes des teneurs élevées par rapport à O16 avec 1.9 µg/l pour la station O1, 1.5 µg/l pour O2 et 1.7 µg/l pour O12 et seul la station O3 sur l'oued Bouhafce présente une teneur de 1 µg/l. Pour le Cd et pour toutes les stations, les teneurs sont inférieures à la limite de détection 0.1 µg/l.

Pour la station O5 située au niveau de l'ancienne usine et à proximité des rejets miniers, plusieurs travaux effectués à des périodes différentes, font état de concentrations différentes pour l'élément Pb. Les teneurs mesurées en Pb ont variées de 2.5 µg/l en période d'étiage en 2001 (Assi, 2001), 5.56 µg/l en période d'étiage en 2003 (Boubdli et al., 2004), 130 µg/l en période pluvieuse en 2004 (El Hachimi et al., 2005) à 2.56 µg/l en période de crue en 2005 (Baghdad et al., 2006a).

Les raisons de ces variations tiennent à l'environnement naturel de la zone considérée et aux aléas climatiques (Bril et Floc'h, 2001). Une forte pluie d'été peut remettre en charge une nappe phréatique ou expulser une eau contaminée d'une ancienne galerie de mine, une modification du pH de l'eau, par des pluies orageuses par exemple, provoque une variation des charges de surface des colloïdes et donc la libération des éléments traces métalliques qui étaient absorbés sur ces particules. Plusieurs études ont montrées que le pH peut affecter considérablement la mobilité des métaux lourds (Colburn and Thornton, 1977 ; Jones and Jarvis, 1981 ; Christensen, 1984 et Merrington and Alloway, 1994). La caractérisation d'une pollution ne peut donc jamais être faite sur base d'une seule campagne d'analyses. Elle doit être faire l'objet de mesures sur au moins les quatre saisons d'un année.

Dans les points d'échantillonnage situés sur l'oued Moulouya au niveau du village, de l'usine et des digues à stériles, les concentrations en Pb, Zn et Cu sont en général supérieures aux teneurs mesurées à la station O16 en amont du centre minier ainsi qu'à celles enregistrées dans les stations des affluents de cet oued. Cette augmentation des teneurs peut être attribuée aux effets des résidus miniers très riches en ETM qui contribuent probablement par lessivage à l'augmentation des teneurs en Pb mais aussi du Zn et du Cu de l'oued Moulouya.

2- Pour les lacs miniers (carrières à ciel ouvert remplies d'eau ; O7, O8, O9, O10, O11 et O13), les teneurs des différents métaux des eaux des lacs miniers varient respectivement de <1 à 22 µg/l pour le Pb, de 0.06 à 3 µg/l pour le Zn, de <1 à 4.9 µg/l pour le Cu et de <0.1 pour le Cd. Le pH est alcalin oscillant entre 7.82 et 9.06. La conductivité électrique varie de 360 à 3520 µS/cm.

La teneur en Pb dans les carrières est inférieure à la limite de détection qui est de 1 µg/l sauf pour les points O10 et O13 qui ont des concentrations respectivement de 5.1 µg/l et 22 µg/l. La station O13 est située au pied de la digue H1. Pour le Zn, seul la station O13 au niveau du lac minier C4 présente une teneur de 3 µg/l, les autres stations ont des teneurs inférieures à 1 µg/l. Pour le Cu, les concentrations les plus élevées sont enregistrées au niveau des stations O10 et O11 situées sur la rive gauche de l'oued Moulouya au NW du village d'Aït Illoussane. Pour toutes les stations, la teneur en Cd est inférieure à la limite de détection qui est de 0.1 µg/l.

Les cations métalliques (Pb, Zn, Cu et Cd) montrent en général des concentrations faibles dans les eaux des lacs miniers quand les pH sont alcalins (Eary, 1999). Ceci est le cas des eaux des lacs de la commune de Zaida qui situées en terrain calcaire et argileux où les eaux acides sont rapidement neutralisées par les carbonates, et où la plupart des métaux deviennent donc insolubles et précipitent.

3- Pour la station O6 (bassin de décantation au sein de l'usine) contenant de l'eau de pluie, la teneur en Pb est de 8.9 µg/l, celle du Zn elle est de 0.34 µg/l alors que pour le Cu et le Cd elle est inférieure aux limites de détection des deux métaux respectivement de 1 µg/l et 0.1 µg/l. Le pH est alcalin avec 8.29 et la conductivité électrique est de 80 µS/cm. Lors de fortes pluies, cette eau riche en plomb et en zinc est directement envoyée par débordement vers l'oued Moulouya.



**Tableau 3. Niveaux de concentration en métaux lourds, pH et conductivité électrique des eaux superficielles de la mine abandonnée de Zaida.**

<b>A : Oueds</b>									
N° échantillon	O1	O2	O3	O4	O5	O12	O14	O16	O20
<i>Métal</i>									
Pb (µg/l)	<1	<1	<1	2,95	2,56	<1	2,53	<1	2,25
Zn (µg/l)	0,15	0,07	nd	0,95	0,09	nd	0,08	0,1	0,3
Cu (µg/l)	1,9	1,5	1	1,2	1,9	1,7	nd	1,2	1,35
Cd (µg/l)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
pH	7,78	7,91	7,84	7,81	7,42	7,82	7,62	7,51	7,71
CE (µS/cm)	620	700	1240	680	370	1330	1480	530	2380
<b>B : Carrières à ciel ouvert remplies d'eau</b>									
N° échantillon	O6 Bassin usine	O7	O8	O9	O10	O11	O13		
<i>Métal</i>									
Pb (µg/l)	8.9	<1	<1	<1	5,1	<1	22		
Zn (µg/l)	0,34	0,06	0,94	0,4	0,09	nd	3		
Cu (µg/l)	<1	1,9	1,6	1,4	2,9	4,9	<1		
Cd (µg/l)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
pH	8,29	8,01	7,82	7,92	9,06	7,86	8,35		
CE (µS/cm)	80	360	500	440	1228	1366	3520		

Dans la commune de Zaida, les concentrations en plomb, zinc et cuivre des eaux superficielles sont supérieures aux concentrations usuelles pour les eaux naturelles non contaminées (Lal and Stewart, 1994) et présentent des teneurs plus fortes avec une différence significative dans les valeurs comparées à la station O16 ainsi qu'à la station de référence M1 loin de toute perturbation. Les eaux de l'oued Moulouya au voisinage du centre minier de Zaida s'avèrent donc nettement polluées.

### 3.3 Rejets miniers :

Les déchets miniers (ou haldes) de la commune de Zaida sont formés par les rejets de l'usine de concentration du Pb. Les stériles, de granulométrie sableuse à limoneuse, sont disposés en tas de 500 à 800 m de diamètre et dont la hauteur dépasse 10 m, ont été ravinsés par les eaux météoriques

et subissent l'action des vents très fréquents dans la zone. Les conditions sont alcalines à la surface des haldes (entre 10 et 20 cm de profondeur) avec un pH qui oscille entre 7.72 et 8.03 (Tableau 4). Les stériles sont dénués de toute végétation et ne présentent aucun indice de développement d'un quelconque horizon pédologique.

**Tableau 4. Niveaux de concentration en métaux lourds dans les sables des haldes (rejets miniers) et leur pH dans la mine abandonnée de Zaida.**

**Table 4. Levels of concentration of heavy metals in the sands of the tailings (mine waste) and their pH in the abandoned mine of Zaida.**

N° échantillon	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E15	Moyenne
<i>Metal</i>									
Pb (mg/kg)	116	46,4	6580	3940	2490	5190	5210	407	2997
Zn (mg/kg)	176	206	1475	90	148	105	93	54,7	355
Cu (mg/kg)	0,8	0,5	710	61	18,4	21,8	18,2	16,3	105
Cd (mg/kg)	1	0,4	43,3	0,4	2,1	2,1	1,4	2,3	6,6
pH	8,02	7,87	nd	7,84	8,03	7,72	7,79	nd	7,88

L'analyse de ces rejets miniers superficiels a permis de donner une idée sur les teneurs en métaux polluants. Les résultats de ces analyses relèvent des quantités très élevées par rapports aux sédiments de l'oued Moulouya (Bouabdli et al., 2004), par rapport aux normes usuelles des sols (européennes, 1991; Normes marocaines, 2002 ) et aux moyennes normales dans la croûte terrestre (Foucault, 1995).

Les résultats sur les 10 premiers centimètres de profondeur pour les sites de l'usine (E6, E7, E8 et E9) ainsi que pour les haldes (E10, E11, E12 et E15) (Tableau 4) montrent que les teneurs en éléments traces métalliques Pb, Zn, Cu et Cd sont élevées.

Les teneurs en Pb, Zn, Cu et Cd dans les haldes et les sites situés au niveau de l'ancienne usine (Tableau 4) sont très élevées avec une moyenne respectivement de 2997.4 µg/l, 355 µg/l, 105.9 µg/l et 6.6 µg/l. Le point E8 situé au niveau de l'ancienne usine montre des teneurs très élevée pour les quatre métaux Pb, Zn, Cu et Cd avec respectivement 6580 µg/l , 1475 µg/l, 710 µg/l et 43.3 µg/l. Ce point est situé près de l'usine non loin des bassins de décantation et en face d'un grand tas de résidus minier et de traitement constitué de cristaux transparent riche en zinc (E7) laissé à l'aire libre, ce qui explique sa grande richesse en ETM et son grand potentiel polluant.

La configuration et la disposition des haldes ainsi que leurs granulométrie sont aussi des facteurs dont il faut tenir compte. La disposition en pente des haldes favorise une instabilité plus importante et leur granulométrie sableuse favorise le piégeage des métaux et accroît dans des proportions importantes la surface spécifique totale et donc les possibilités de contact entre les eaux météoriques et les phases solides porteuses des éléments traces métalliques (Bril, 2002).

Les haldes et les rejets miniers de l'ancienne usine constituent donc le point noir de la commune de Zaida avec une réserve potentielle en métaux lourd Pb, Zn, Cu et Cd qui peuvent être libérée au moindre changement des conditions du milieu, en particulier du pH, mais aussi une dispersion de la matière solide par érosion éolienne.

La comparaison de la distribution du Pb, du Zn, du Cu et du Cd entre les eaux souterraines et les eaux superficielles dans la commune de Zaida, montre que les teneurs de ces éléments dans les eaux de l'oued Moulouya au niveau de la mine et en aval de celle-ci, sont largement supérieures à celles des eaux des affluents de cet oued et des eaux souterraines de la commune.

Les travaux précédents réalisés sur les eaux de la région de la Haute Moulouya (El Founti, 2000 ; Ech-Chokiri, 2000 ; Assi, 2001 ; Saidi et al, 2002 ; Bouabdli et al., 2004 et 2005 ; El Hachimi et al., 2005 ; Baghdad et al., 2005 et 2006a) montrent qu'il n'y a pas de problème d'acidité et que l'oxydation et la lixiviation des stériles miniers exposés à l'air libre et aux eaux météoriques ne génèrent pas d'acides. Mais, l'action des résidus miniers (haldes) et de traitement très riche en Pb et autres métaux abandonnés contribuent de manière directe par érosion à l'augmentation des teneurs en Pb des eaux superficielles et des sédiments des oueds (Bouabdli et al., 2004 et El hachimi et al., 2005). La présence d'une teneur élevée en Pb dans un puits et du Zn et du Cu dans d'autres puits de la commune laisse penser à une contamination de la nappe par ces métaux lourds provenant probablement de l'héritage minier, mais nous ne pouvons pas le démontrer de façon certaine.

## CONCLUSION :

Les résultats obtenus dans ce travail nous ont permis de faire une évaluation de la contamination métallique des eaux souterraines et superficielles ainsi que des rejets miniers de la commune de Zaida. L'analyse physico-chimique des eaux et des haldes, a montré que la zone minière de cette commune connaît une pollution métallique importante qui se fait sentir de façon nette surtout au niveau des eaux superficielles, et que la présence de certaines concentrations élevées en métaux lourds (Pb, Zn, Cu) dans les eaux souterraines des puits situés au environs de la mine, nous permet de soupçonner une éventuelle contamination métallique de ces eaux. Les haldes et les rejets dans l'ancienne usine sont très riches en ETM (Pb, Zn, Cu et Cd) et sont donc une source potentielle de contaminations de la ressource eau. Les rejets miniers solides présentent donc le point noir de cette zone.

Un suivi doit être réalisé aussi pour identifier les pollutions éventuelles par les eaux usées. Pour les haldes de Zaida, une étude de caractérisation minéralogique doit se faire afin de connaître la répartition des ETM au niveau des phases néo-formés et la capacité de mobilisation de ces phases vis à vis des ETM.

## REMERCIEMENTS :

*Ce travail est réalisé dans le cadre du programme thématique d'appui à la recherche scientifique (PROTARS II) ainsi que dans le cadre d'une bourse mixte de la coopération technique belge (CTB) et du projet CNRPRST Maroc – CSIC Espagne.*

## Références bibliographique :

- ADRIANO D. C. (1986) Trace elements in the territorial environment, trace element in the environment. *Springer – Verlag*, New York, (1986), 106-243.
- AMADE E. (1965) Les gisements de plomb de Zaida et de Boumia. *Notes et Mém. Géol. Maroc*, n° 181, pp 175-184.
- ASSI M. (2001) Impact de l'exploitation de la mine de Zaida sur l'environnement : Cartographie et Aménagement. D.E.S.A., Faculté des Sciences de Rabat, Univ. Mohamed V, 104p.
- BAGHDAD B., NAIMI M., BOUABDELLI A. Et BOUNAKHLA M. (2005) Caractérisation physico-chimique et évaluation de la contamination par les métaux lourds des eaux souterraines de la Commune de Zaida (Haute Moulouya, Maroc). *3<sup>ème</sup> Journées Internationales des Géosciences de l'Environnement*, 8 au 10 juin 2005, El Jadida, Maroc.
- BAGHDAD B., BOUABDLI A., NAIMI M., SONNET P., BOUNAKHLA M., EL HACHIMI M. L, Taleb A. et Jakni L. (2006a) Mines abandonnées : Impacts environnementaux, déformation du paysage et évolution de la qualité des eaux et des sols, cas de la mine abandonnée de Zaida (Haute Moulouya –

Maroc) ; *1st International conférence (M3E) Mining : Exploration, Exploitation and Environmental impact*. Bouznika, Morocco. 20 – 21 April 2006.

BAGHDAD B., BOUNAKHLA M., NAIMI M., BOUABDLI A. et SONNET Ph. (2006b) Etude d'impact sur l'environnement des mines abandonnées de la commune de Zaida (Haute Moulouya - Maroc) : Apport des différentes méthodes d'analyses (ICP-AES, AAS, AAN- Gammas prompts, WD-XRF). *Workshop sur les Techniques Analytiques Nucléaires, Conventiionnelles et leurs Applications*, 8-9 Décembre 2006, Rabat, Maroc.

BOUABDLI A., SAIDI N., EL FOUNTI L. et 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, 2004, 27-33.

BOUABDLI A, SAIDI N., M'RABET S., ESCARRE J. et LEBLANC M. (2005) Oued Moulouya : Vecteur de transport des métaux lourds (Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau* v : 18/2, p : 199-213.

BLUM A. (2004) L'état des eaux souterraines en France : Aspects quantitatif et qualitatif. Etude et travaux, n° 43, *Institut Français de l'Environnement, IFEN*, 20004.

BRIL H. et J.P. FLOC'H (2002) Le devenir des métaux provenant des anciennes mines ; l'exemple du massif central français. *Rev. Géologie* n° 130/131, pp 233-241. Pub. Union des géologues français.

CHRISTENSEN T. H. (1984) *Water, Air, Soil Pollution* 21, 105.

CITEAU L. (2004). Etude des colloïdes naturels présents dans les eaux gravitaires de sols contaminés: relation entre nature des colloïdes et réactivité vis-à-vis des métaux (Zn, Cd, Pb, Cu). Thèse Sciences du sol, Sciences du sol, Agro. Paris [INAPG] (2004) n°2004INAP0010.

COLBOURN P. and THORNTON I. (1978) *Journal Soil Sci.* 29, 513.

DERECTIVES EUROPEENNES 1991.

EARY L.E. (1999). Geochemical and equilibrium trends in mine pit Lakes. *Appl. Geochem.*, 14, 963-987.

ECH-CHOKRI R. (2000) Contrôle géochimique des éléments majeurs et en traces dans le bassin versant de la Moulouya. DESA, Faculté des Sciences de Kenitra, 120p.

EL FOUNTI L ; (2000). Evaluation de la qualité physico-chimique et métallique dans le bassin versant de la Moulouya. DESA, Faculté des Sciences de Kenitra, 59p.

EL HACHIMI M. L., EL HANBALI M., FEKHAOUI M., BOUABDLI A., FOUNTI L. et Saidi N. (2005) Impact d'un site minier abandonné sur l'environnement : cas da la mine de Zaida (Haute Moulouya, Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique*, Rabat, section Sciences de la Terre, 2005, n°27, 93-100.

EL HACHIMI M. L, BOUABDLI A., FEKHAOUI M., EL ABIDI A., Baghdad B. et Saidi N. (2006) Evaluation des nuisances d'une mine abandonnée sur l'environnement ; Mine à ciel ouvert de Zaida (Maroc) ; *1st International conférence (M3E) Mining : Exploration, Exploitation and Environmental impact*. Bouznika, Morocco. 20 – 21 April 2006.

EMBERGER A. (1965) Eléments pour une synthèse métallogénique du district plombifère de la Haute Moulouya. *Notes et M. Serv. Géol. Maroc*, 181, 205-244.

EMBERGER A. (1965) Introduction à l'étude des minéralisations plombifères de la Haute Moulouya. Colloque sur les gîtes stratiformes, *Notes et M. Serv. Géol. Maroc*, n° 181, pp 167-174.

FANFANI L., ZUDDAS P. et CHESSA A. (1997) Heavy metals speciation analysis as a tool for studying mine tailings weathering. *Journal of geochemical Eploration* 58 (1997) 241-248.

JABOUR J. L. (2003) Mine-waste mineralogy and mineralogical perspectives of acid-base accounting. In *Environmental Aspects of Mine Wastes* (eds. J. L. Jabour, D. W. Blowes and A. I. M. Ritchie). *Mineralogical Association of Canada*, Vol. 31, 117-145.

JONES L. H. P. and JARVIS S. C. (1981) The fate Heavy Metals, in Greenland D. J. and Hayes M. H. B. (eds.) *The Chemistry of Soil Processes*, John Wiley and Sons, Chichester, pp593-616.

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

LAL R. and Stewart B. A. (1994) *Soil Processes and Water quality*. Ed. R. Lal and B.A. Stewart, Lewis Publishers.

MARTINELLI I. (1999) Infiltration des eaux de ruissellement pluvial et transfert de polluants associés dans le sol urbain - Vers une approche globale et pluridisciplinaire. Thèse de Doctorat, spécialité Conception en bâtiment et techniques urbaines, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (1999), 207p.

MERRINGTON G. & ALLOWAY B. J. (1994) The flux of Cd, Cu, Pb and Zn in mining polluted soils. *Water, Air and Soil Pollution* 73: 333-344, 1994. *Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands*.

N. M. (2002). Norme Marocaine de qualité des eaux. Bull. off. N° 5062.

PAQUETTE Y., BLACHERE A., LEFEBVRE O., GUISE Y. et BARRIERE J. P. (2000) Les lacs miniers des exploitations à ciel ouvert du Massif central : qualité et évolution. *Chronique de la Recherche minière* n° 541, éd. BRGM, 85-101.

PELLET R. (1963) La laverie pilote de flottation de Plomb Moulouya. *Mines et Géologie*, Rabat, n° 21-22, pp 135-143.

PICHARD A., BISSON M., DIDERICH R., MORIN A., LEVEQUE S., MAGAUD H., MORIN A., Rose M. et Pepin G. (2004). Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques: Chrome et ses dérivés inorganiques. INERIS-DRC-01-25590 – ETSC – Api/SD, N° 00df253, (2004), 68p.

PRICE W. A. (2005) Liste des éléments d'information à connaître pour évaluer et atténuer les phénomènes de lixiviation de métaux et de drainage rocheux acide. Rapport NEDEM 5.10F, Ressources Naturelles Canada.

SAIDI N., BRHADA F., ZAÏD A., BOUABDLI A. et ESCARRE 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.

SAIDI N., BRHADA F., ZAÏD A., BOUABDLI A. & ESCARRE J. (2002) Impact de la mine d'Aouli sur l'écosystème au niveau de la Haute Moulouya (Maroc). *Bulletin de la société d'Histoire Naturelle de Toulouse*, T.138, 21-27.

SCHMITT J. M. et Thiry (1977). Minéralisation en plomb par évolution pédogénétiques d'une série arkosique du Trias (Zaida, Haute Moulouya, Maroc) *Bull. BRGM*, section 2 n° 2, p. 113-133.

SMITH R. A. H. and BRADSHAW A. D. (1972) Stabilisation of toxic mine wastes by the use tolerant plant populations. *Transactions of Institution of Mining and Metallurgy (Section A)* 81: 230-237.