

## Contamination des sols par les métaux lourds à partir de mines abandonnées : le cas des mines Aouli-Mibladen-Zeïda au Maroc

Moulay Laârabî El Hachimi<sup>1</sup>  
Mohamed Fekhaoui<sup>2</sup>  
Abdellah El Abidi<sup>3</sup>  
Ali Rhoujatti<sup>4</sup>

<sup>1</sup> CRMEF  
Laboratoire de géologie  
BP 6210  
Madinat Al Irfane  
Rabat 10000  
Maroc  
<elhachimi3@hotmail.com>

<sup>2</sup> Institut scientifique  
Unité Pollution, écotoxicologie et risques  
sanitaires  
BP 703 Agdal  
Rabat 10000  
Maroc  
<fekhaoui@israbat.ac.ma>

<sup>3</sup> Institut national d'hygiène  
Laboratoire d'hydrobiologie, hygiène  
industrielle et environnementale  
BP 1014 RP  
Rabat 10000  
Maroc  
<abidi-ma@yahoo.com>

<sup>4</sup> Faculté des sciences et techniques  
Laboratoire Géorressources  
BP 549  
Guéliz Marrakech 40000  
Maroc  
<a.rhoujatti@uca.ma>

### Résumé

Cette étude évalue la contamination métallique des sols au voisinage des mines Aouli, Mibladen et Zeïda abandonnées dans la Haute Moulouya à l'est du Maroc, et s'attache en particulier à l'estimation de la variabilité spatiale de cette contamination et de l'étendue de l'aire contaminée. Les résultats révèlent que les sols proches des sites miniers étudiés et même très éloignés sont fortement contaminés par les métaux lourds – plomb (Pb), zinc (Zn), cuivre (Cu) et cadmium (Cd) ; ils soulignent également une grande variabilité des concentrations non seulement entre les trois sites miniers mais aussi dans un même site minier. L'index de pollution des sols étudiés est généralement élevé même pour les sols échantillonnés en aval à plus de 130 km des sites miniers, alors qu'il est extrêmement élevé en surface des versées de résidus miniers soulignant que ces dernières constituent en l'état des sources pérennes de contamination par les métaux lourds. L'aire insalubre touchée par la pollution métallique issue des sites miniers abandonnés dans la Haute Moulouya est très vaste suite à la dispersion, par les transports éoliens et hydriques, des polluants résiduels des rejets miniers abandonnés sur place. Des mesures de remédiation doivent être prises afin d'immobiliser les polluants et limiter leur transport vers l'environnement.

**Mots clés :** contamination des sols ; Maroc ; métaux lourds ; mines abandonnées.

**Thèmes :** ressources naturelles et environnement ; sols.

### Abstract

**Heavy metal contamination of soils from abandoned mines: The case of Aouli-Mibladen-Zeïda mines in Morocco**

This study assesses the metal contamination of soils in the vicinities of Aouli, Mibladen and Zeïda mines abandoned in the High Moulouya in eastern Morocco focusing in particular on its spatial variability as well as on the extent of the contaminated area. The results show that the studied soils close to mining sites and even very remote are highly contaminated with heavy metals: Pb, Zn, Cu and Cd. The results also highlight great variability in concentrations between soils of the three mining sites as well as at the same mining site. The index of soil pollution is generally high even for soils sampled downstream located at more than 130 km from the mining sites, while surface levels on tailings are extremely high, indicating that they are perennial sources of contamination by heavy metals. The insalubrious area affected by metallic pollution derived from the abandoned mining sites in the high Moulouya is very large due to dispersal by wind and water transport of metallic pollutants of mine tailings. Remedial measures must be taken to immobilize pollutants and limit their transport to the environment.

**Key words:** abandoned mines; contamination; heavy metals; Morocco; soils.

**Subjects:** natural resources and environment; soils.

Tirés à part : M.L. El Hachimi

doi: 10.1684/agr.2014.0702

Pour citer cet article : El Hachimi ML, Fekhaoui M, Abidi AE, Rhoujatti A, 2014. Contamination des sols par les métaux lourds à partir de mines abandonnées : le cas des mines Aouli-Mibladen-Zeïda au Maroc. *Cah Agric* 23 : 213-9. doi : 10.1684/agr.2014.0702

**S**elon Baize (1997) la contamination d'un milieu par les métaux lourds désigne une augmentation des teneurs totales de ces éléments dans le milieu suite à des apports anthropiques importants. Selon Akujobi (2012), les métaux lourds constituent de sérieux polluants environnementaux, en particulier dans les zones à haute pression anthropique ; leur présence dans l'atmosphère, le sol et l'eau, même sous forme de traces, peut causer de graves problèmes à tous les organismes. L'accumulation de métaux lourds dans les sols est une préoccupation en production agricole en raison de leurs effets néfastes sur la croissance des cultures, la qualité des produits alimentaires et la santé de l'environnement (Augusto Costa AC, 2001).

Selon Lee *et al.* (2001), l'exploitation minière est l'une des plus importantes sources de métaux lourds dans l'environnement. Les opérations d'extraction et de broyage minier, la concentration de minerais et l'évacuation de résidus, constituent des sources majeures de contamination de l'environnement (Adriano, 1986). Par conséquent, des niveaux élevés de concentrations en métaux lourds peuvent être trouvés aux alentours des mines métallifères en raison de la décharge et la dispersion des déchets miniers dans les sols environnants, dans les cultures et les cours d'eau. Ils peuvent éventuellement présenter un risque potentiel pour la santé des résidents au voisinage de zones minières (Jung, 2001).

De nombreuses études ont été entreprises dans divers pays, dont le Maroc, sur la contamination par les éléments traces métalliques (ETM) des sols, des plantes, des eaux et des sédiments résultant de l'activité minière. Le degré de contamination métallique des sols est souvent évalué à partir de la teneur totale en ETM déterminée dans l'horizon superficiel (Van Oort *et al.*, 2002). Selon Li et Thornton (2001), il s'agit bien d'une approche valide pour étudier le degré et l'ampleur de la contamination dans le système sol-plante.

L'activité minière au Maroc remonte à l'Antiquité. Son premier développement connu est daté du IX<sup>e</sup> siècle (Wadjinny, 1998). Ce secteur d'activité industrielle a été de longue date l'un des piliers fondamentaux de l'écono-

mie du pays. Les mines Aouli-Mibladen-Zeïda constituaient les plus gros districts miniers Pb-Zn marocains du siècle dernier. Ces gisements, actuellement abandonnés, ont largement contribué à la production marocaine de plomb.

Notre étude porte sur l'évaluation du degré de contamination métallique (Pb, Zn, Cu, Cd) des sols non rhizosphériques (sols nus) au voisinage des mines afin d'identifier la contamination multi-éléments ainsi que sa variabilité spatiale aux alentours des mines, en amont et très loin vers l'aval. La différence entre les concentrations mesurées dans les sols proches des centres miniers et dans les sols suffisamment éloignés, permet de déceler d'éventuelles contaminations et d'estimer l'étendue de l'aire touchée par la contamination métallique.

## Matériel et méthode

### Zone d'étude : situation et caractérisation

Les centres miniers Aouli-Mibladen-Zeïda sont situés dans la région nord orientale du Maroc dans le haut bassin-versant de la Moulouya (*figure 1*).

Le centre d'exploitation d'Aouli (1 130 m d'altitude ; exploitation active de 1926 à 1985), situé sur les berges de l'oued Moulouya, se trouve à 26 km au nord-est de la ville de Midelt. Le gisement Aouli, d'une surface de 300 km<sup>2</sup>, comprend de nombreux filons encaissés dans les schistes métamorphiques et les granites, dans les grès, les marnes et les laves du Permo-Trias (Emberger, 1965). Le minerai exploité en galeries à Aouli est principalement la galène, associée à la sphalérite et à d'autres sulfures moins abondants (Nasloubi, 1993).

Le gisement de Mibladen (1 130 m d'altitude ; exploitation active de 1936 à 1985), situé sur les berges de l'oued Mibladen affluent de l'oued Moulouya, s'étend sur une superficie de moins de 60 km<sup>2</sup>. Le siège de l'exploitation est situé à 15 km au nord-est de Midelt dans un plateau calcaire surmontant le socle affleurant à Aouli (Felenc et Lenoble, 1965). Les minéralisations du Secondaire en amas

stratoïdes, constituées de galène associée en imprégnation à la barytine, disséminées ou interstratifiées dans des niveaux marneux, dolomitiques, calcaro-dolomitiques et conglomératiques du crétacé étaient exploitées en galeries et en carrières dans ce gisement (Emberger, 1965).

Le centre d'exploitation minière de Zeïda (1 490 m d'altitude ; exploitation active de 1972 à 1985), d'une superficie de 300 km<sup>2</sup>, est situé sur les berges et sur le parcours même de l'oued Moulouya à 30 km au nord-ouest de Midelt. À Zeïda, les gîtes sont stratiformes. La minéralisation répartie irrégulièrement sous forme d'amas dans des arkoses subhorizontales du Permo-Trias est disposée en placages peu épais sur les massifs granitiques (El Jaouani, 2001). La minéralisation est formée de cérusite (à 70 %) et de galène (à 30 %) (Direction des Mines, 1990).

L'exploitation minière au niveau des districts miniers Aouli-Mibladen-Zeïda a provoqué inévitablement des modifications du milieu naturel et engendré de nombreuses perturbations ayant un impact paysager négatif et des risques pour les riverains : des carrières profondes, des galeries, des puits, des descenderies et des installations de surface ont été abandonnés sans mesures de mise en sécurité ; des terrils qui nuisent à l'esthétique du milieu et dégradent le paysage ; enfin, des verses de résidus de traitement non végétalisées, de plusieurs millions de tonnes, sont abandonnées dans des terrains dégagés près des terres agricoles, sur le parcours et dans le lit de l'oued Moulouya et sur les berges de ses affluents (*figure 1, figure 2A*).

### Échantillonnage et analyses

Des sols non rhizosphériques (sols nus) ont été échantillonnés au printemps, dans les districts miniers Aouli-Mibladen-Zeïda (*figure 1*), sur les verses de résidus miniers pour les trois centres miniers (Sra, Srm, Srz), aux alentours des verses et à des distances variables de celles-ci (S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11, S12, S13). L'échantillonnage a été aussi réalisé en aval à plus de 130 km des districts miniers à Missour dans la moyenne Moulouya (S14). Un échantillon de référence a également été pris

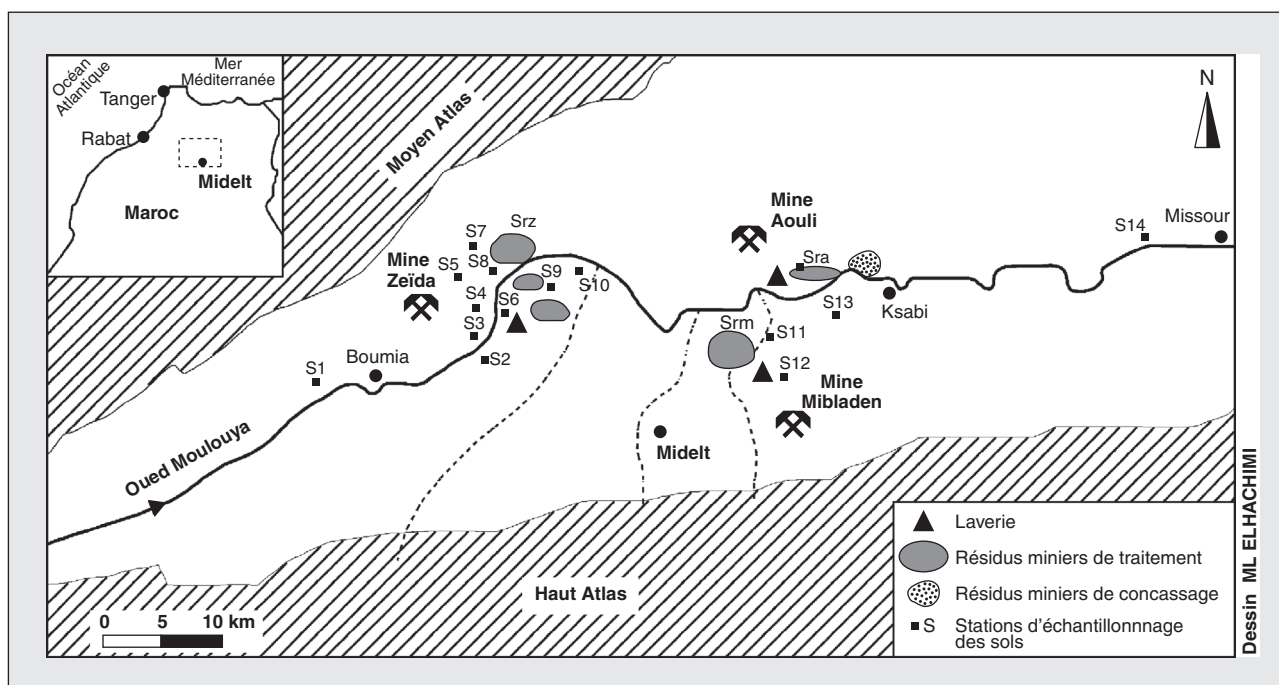


Figure 1. Carte de situation de la région d'étude, des infrastructures minières et des stations d'échantillonnage au voisinage des mines Aouli-Mibladen-Zeïda, en amont et en aval.

Figure 1. Location map of the study area, mining infrastructures and sampling stations in the vicinities of Aouli- Mibladen-Zeïda mines, upstream and downstream.

dans la station S1 à 30 km en amont de la zone minière loin de toute source de pollution. Les sols ont été échantillonnés dans des terrains non agricoles à l'aide d'une benne à main en plastique.

Dans chaque station, chaque échantillon de sol est un échantillon composite de 5 sub-échantillons prélevés au hasard dans une aire de 5 x 5 m (0-15 cm de profondeur). Les échantillons prélevés ont été mis dans des sacs en plastique propres et conservés à basse température. Des profils des principaux types de sols rencontrés dans la zone d'étude ont été étudiés afin de déterminer les principaux types de sols de la région.

Au laboratoire, l'analyse granulométrique a été réalisée pour les échantillons de sols prélevés sur les versants à résidus miniers, les caractéristiques physicochimiques (pH, calcaire total, matière organique, carbone organique, phosphore, azote, potassium) ont été déterminées. L'ensemble des échantillons de sols prélevés ont été séchés à une température de 80 °C en salle blanche à l'air ambiant puis broyés dans un mortier d'agate. Le protocole de minéralisation destiné à la préparation pour le dosage des

métaux lourds (Pb, Cu, Zn, Cd) dans les sols étudiés est celui qui a été préconisé par Chiffolleau (1994). Le dosage des métaux dans les sols a été effectué au laboratoire d'écotoxicologie de l'Institut national d'hygiène de Rabat sur les minéralisats des sols par spectrométrie d'absorption atomique avec four à graphite pour le plomb (Pb), le cuivre (Cu), le cadmium (Cd) et avec flamme pour le zinc (Zn).

La validité de la méthode analytique a été vérifiée par contrôle interne à l'aide de deux échantillons de référence certifiés : IAEA- 433, BCSS-1 (sédiments) ; et par contrôle externe à l'aide d'exercices d'intercalibration (AIEA).

## Résultats et discussions

### Caractérisation des sols

Les principaux types de sols rencontrés dans la Haute Moulouya, appartiennent à quatre catégories principales de sols. Il s'agit des sols calcimagnésiques, des sols minéraux bruts, des sols

peu évolués d'érosion et des sols hydromorphes.

Les sols au voisinage des centres miniers Aouli-Mibladen-Zeïda sont des sols minéraux bruts couverts généralement d'une mince pellicule de résidus miniers, en particulier autour des versants et dans le sens des vents dominants. L'analyse granulométrique réalisée sur les échantillons prélevés sur les versants à résidus montre que ces résidus à Zeïda, à Mibladen et à Aouli sont de texture très sableuse (87 % des grains de taille comprise entre 50 µm et 2 mm). Le pH pour l'ensemble des sols étudiés est généralement alcalin ; il varie de 7,6 à 8,9 (tableau 1). Cette tendance du pH des sols étudiés à l'alcalinité est attribuée au contexte géologique qui, dans la région d'étude, est dominé par les carbonates.

Pour les sols sablonneux des résidus miniers de traitement, l'alcalinité est liée à l'abondance des carbonates et/ou des silicates dans les minerais traités et dans les roches encaissantes. En effet, selon les résultats d'analyses minéralogiques, les résidus de Mibladen sont riches en carbonates (44 %), ceux de Zeïda sont très riches en silicates (8 %) alors que ceux d'Aouli



Figure 2. Vues de résidus miniers de traitement.

Figure 2. Views of waste of treatment.

A) mine Zeïda : halde à résidus miniers de traitement nue abandonnée près des terres agricoles et des cours d'eau ; B) mine Zeïda : transfert éolien des résidus de traitement à partir de la verse à résidus vers les terres agricoles ; C) région de Missouri en aval des centres miniers très loin à 130 km, sols riches en résidus miniers de traitement.

sont moyennement riches en carbonates et en silicates respectivement 25 et 23 %. Les carbonates et les silicates constituent un réservoir important pour les métaux dans le sol. Selon Kabata-Pendias et Pendias (1992), le cadmium, le cuivre, le plomb et le zinc ont une grande affinité pour les carbonates. Par ailleurs, plusieurs auteurs ont montré que le pH est un facteur qui contrôle la solubilité et/ou la rétention des métaux dans le sol (Basta *et al.* [1993], Jung et Thornton [1996]). Selon Plant et Ratswell (1983), plusieurs métaux sont relativement plus mobiles à pH acide et en conditions oxydantes alors qu'ils sont fortement retenus sous des conditions alcalines et réductrices.

D'autre part, les teneurs en carbone organique (0,0 à 0,05 %), en phosphore (0,2 à 2 %), azote (0,01 %) et potassium (0,5 à 2,5%) sont très faibles dans les sols des verses. En effet, il s'agit de résidus minéraux bruts, résultats des différentes phases de traitement des minerais, qui ne peuvent donc pas contenir d'éléments nutritifs. Les teneurs faibles en matière organique et en nutriments dans ces

sols des verses constituent un facteur limitant important pour le développement du couvert végétal sur ces dernières.

### Teneurs en métaux lourds dans les sols

Les résultats d'analyse des métaux lourds (Pb, Zn, Cu, Cd) dans les sols des différentes stations étudiées sont rassemblés dans le *tableau 1*.

D'après les résultats, les sols au niveau des sites miniers Aouli-mibladen-Zeïda et même ceux qui sont situés très loin à 130 km en aval des sites miniers dans la région de Missouri (S14) se caractérisent en général par de fortes teneurs en métaux lourds. Les teneurs sont particulièrement élevées dans les sols des résidus miniers Srz, Srm, Sra.

Par comparaison entre les trois sites miniers Aouli-Mibladen-Zeïda, on observe la variabilité des teneurs en métaux entre les sols des trois sites, comme entre les sols d'un même site minier. En effet, les teneurs en métaux des sols sont en général très élevées à

Mibladen, élevées à Zeïda et moyennement élevées à Aouli, mais des variations de teneurs sont enregistrées d'un sol à l'autre, au niveau du site minier de Zeïda, en fonction de l'éloignement par rapport aux verses et de la position par rapport aux sens des ruissellements et des vents dominants. On enregistre à Zeïda une diminution des teneurs pour le Pb, le Cu et le Cd (qui restent cependant supérieures à la normale) en allant de la verse à résidu Srz à la station S2 située à plus de 6 km de la verse. La variabilité des teneurs en métaux entre les sols des sites miniers étudiés et même entre les sols d'un même site minier semble être une caractéristique de la pollution minière dans la région. En effet, selon Ernst et Nelissen (2000) les teneurs en métaux totaux dans les sols proches des régions minières et des fonderies, sont élevées et très différentes entre les sites.

D'un autre côté, les teneurs en métaux lourds des sols au niveau des centres miniers Aouli-Mibladen-Zeïda et même très loin à Missouri, dépassent beaucoup, pour la plupart des échantillons et des métaux (Pb, Zn, Cu et Cd), les teneurs enregistrées pour le sol de la station de référence (S1) dans lequel les teneurs en métaux étudiés, exception faite pour le Zn, sont inférieures ou proches des moyennes mondiales des sols non contaminés, comme elles dépassent de loin les moyennes mondiales normales des sols non contaminés données par Bowen (1979) et dépassent les valeurs limites de concentration en ces métaux dans les sols en France (MATF, 1998) (*tableau 1*). Il s'agit de sols nécessitant certainement des travaux de restauration.

Les teneurs maximales en métaux lourds dans les sols étudiés ont été enregistrées dans les sols en surface des verses (Srm, Srz, Sra). Ces teneurs sont très élevées comparées aux teneurs enregistrées pour le sol de référence (S1) et les dépassent jusqu'à 765 fois, 71 fois, 32 fois, 37 fois, respectivement pour le Pb, le Zn, le Cu et le Cd. Ces résultats révèlent que ces résidus miniers, abandonnés sans réhabilitation constituent des foyers importants d'éléments traces métalliques susceptibles d'avoir des effets contaminants durables au voisinage immédiat des sites miniers et même à plus longue distance dans les

**Tableau 1. Valeurs du pH, teneurs moyennes en métaux (mg/kg) et index de pollution dans les échantillons de sols.**

Table 1. pH values, average levels of metals (mg/kg) and pollution index in soil samples.

Station	Site	Concentrations en mg/kg					IP*
		pH	Pb	Zn	Cu	Cd	
S1 (sol de référence)		7,8	13	129	13	0,3	0,19
S2	Zeïda	8,5	79	2 875	18	0,2	2,65
S3	//	7,9	68	2 983	20	0,9	2,78
S4	//	8,1	72	3 208	22	0,29	2,93
S5	//	8,3	230	2 458	14	0,5	2,7
S6	//	7,6	112	3 616	45	1,03	3,49
S7	//	8,9	2 612	2 041	45	2,9	8,59
S8	//	8,7	2 370	2 458	19	0,3	8,05
S9	//	8,8	2 016	2 658	29	0,3	7,35
S10	//	8,2	566	1 475	84	1,8	3
S11	Mibladen	8,6	548	2 425	25	0,8	3,53
S12	Mibladen	8,7	71	3 016	24	7,2	3,35
S13	Aouli	7,9	2 008	209	365	0,5	6,1
S14	Missour	7,8	100	2 266	24	0,16	2,21
Sols de résidus miniers	Zeïda (Srz)	8,4	5 547	7 500	118	1,3	20,52
	Mibladen (Srm)	8,4	10 520	9 074	126	11,27	35,11
	Aouli (Sra)	7,9	2 101	3 125	437	3,6	9,25
<b>Teneurs normales des sols non contaminés (Bowen, 1979)</b>			35	90	30	0,35	
<b>Teneurs limites sols France (MATF, 1998)</b>			100	300	100	2	

\*IP : index de pollution = [(Cd/3 + Cu/100 + Pb/100 + Zn/300)/4].

directions des ruissellements et des vents dominants (WSW et ENE).

En effet, les résidus miniers des versées dans les sites étudiés, constitués de particules fines et homogènes de taille, contenant un pourcentage très faible en matière organique, non végétalisés et de stabilité physique faible, sont sujets à une large dispersion dans l'environnement suite à l'érosion hydrique en période de pluie et éolienne en période sèche. La Haute Moulouya est balayée par des vents très violents qui renforcent la sécheresse dans la région et provoquent en été des nuages de poussières qui

peuvent durer plusieurs jours. L'envol de particules fines à partir des résidus miniers est important (*figure 2B*) : des matières en suspension et des poussières volantes toxiques riches en ETM atteignent les sols avoisinants et même les plus lointains qui sont alors contaminés.

En période de pluie, les orages fréquents que connaît la région de la Haute Moulouya, donnent un ruissellement en nappes et des crues. Les versées subissent le lessivage et libèrent des métaux dissous et surtout particulaires en suspension. Le transport des résidus est inévitable du fait

du substrat marno-dolomitique imperméable que surmontent les versées. Les rejets sablonneux riches en métaux lourds atteignent les cours d'eau et les sols proches et lointains (*figure 2C*).

En conséquence, suite à la dissémination et l'entraînement des contaminants par les vents et les eaux très loin des sites miniers vers l'aval dans la moyenne Moulouya jusqu'à Missour, l'aire insalubre touchée par la pollution métallique issue des zones minière Aouli-Mibladen-Zeïda est très vaste. Les impacts négatifs des versées à résidus de ces mines de la Haute Moulouya ne se limitent pas aux

impacts localisés sur le paysage, mais à ceux-ci s'ajoutent les impacts durables liés au transport de ces résidus riches en métaux lourds. Il est donc nécessaire de limiter l'impact négatif sur l'environnement des haldes à résidus miniers abandonnées sans stabilisation dans la zone minière. Des mesures de remédiation doivent être prises pour immobiliser la pollution métallique résiduelle dans ces rejets et limiter la dispersion des contaminants suite aux transports éoliens et hydriques responsables de l'extension de la zone contaminée au-delà des sites d'exploitation des gisements métallifères.

D'un autre côté, la contamination métallique des sols, dans la région minière étudiée, s'avère critique et peut affecter les quantités de métaux lourds puisées à partir de ces sols par les végétaux et induire des toxicités. En effet, sachant que la teneur critique en métaux du sol est définie comme étant la valeur au-dessus de laquelle la toxicité est possible et que les valeurs au-dessus desquelles le sol est critique sont, d'après Kabata-Pendias et Pendias (1984), 8 mg/kg en Cd, 125 mg/kg en Cu et 400 mg/kg pour le Pb et le Zn, il y a au moins d'après

les résultats de notre étude, un métal qui présente une teneur au-dessus du niveau critique dans l'ensemble des sols échantillonnés et au moins deux métaux (Pb, Zn) sont au-dessus du niveau critique dans les sols des résidus miniers. D'autre part, selon Lee *et al.* (2001), les concentrations excessives des ETM dans les sols influencent l'absorption de ces éléments par les plantes ; comme elles peuvent être toxiques pour ces dernières ainsi que pour les animaux, elles peuvent affecter la production agricole ainsi que la qualité sanitaire des denrées alimentaires de consommation humaine.

### Index de pollution des métaux dans les sols

La contamination par les métaux lourds à la surface des sols, en particulier dans les sites miniers, est associée à un cocktail de contaminants plutôt qu'à un seul métal (Lee *et al.*, 2001). Ainsi, le concept d'un index de pollution (IP) des sols a été introduit dans de nombreuses études pour identifier la contamination multi-éléments qui se traduit par une augmen-

tation de la toxicité métallique (Chon *et al.*, 1998 ; Jung, 2001 ; Lee *et al.*, 2001 ; Smouni, 2010). Il s'agit d'un critère permettant d'évaluer la toxicité globale d'un sol contaminé.

Selon Chon *et al.* (1998), l'index de pollution du sol est calculé à partir de la moyenne des rapports des concentrations en métaux dans les échantillons de sol par rapport aux valeurs directives limites. Ces valeurs limites correspondent aux niveaux supposés tolérables dans le sol suggérés par Kloke (1979). Ainsi, l'index de pollution est calculé par l'équation suivante :

$$IP = \frac{(Cd/3+Cu/100+Pb/100+Zn/300)}{4}$$

et un IP supérieur à 1 correspond à un sol pollué.

Dans le cadre de notre étude, l'index de pollution a été calculé pour les différents sols prélevés sur les sites Aouli, Mibladen et Zeïda ; les résultats sont reportés dans le *tableau 1* et la *figure 3*.

Les résultats obtenus révèlent des valeurs de IP. qui varient entre 0,19 pour la station de référence (S1) et 35 (sols des résidus de Mibladen :

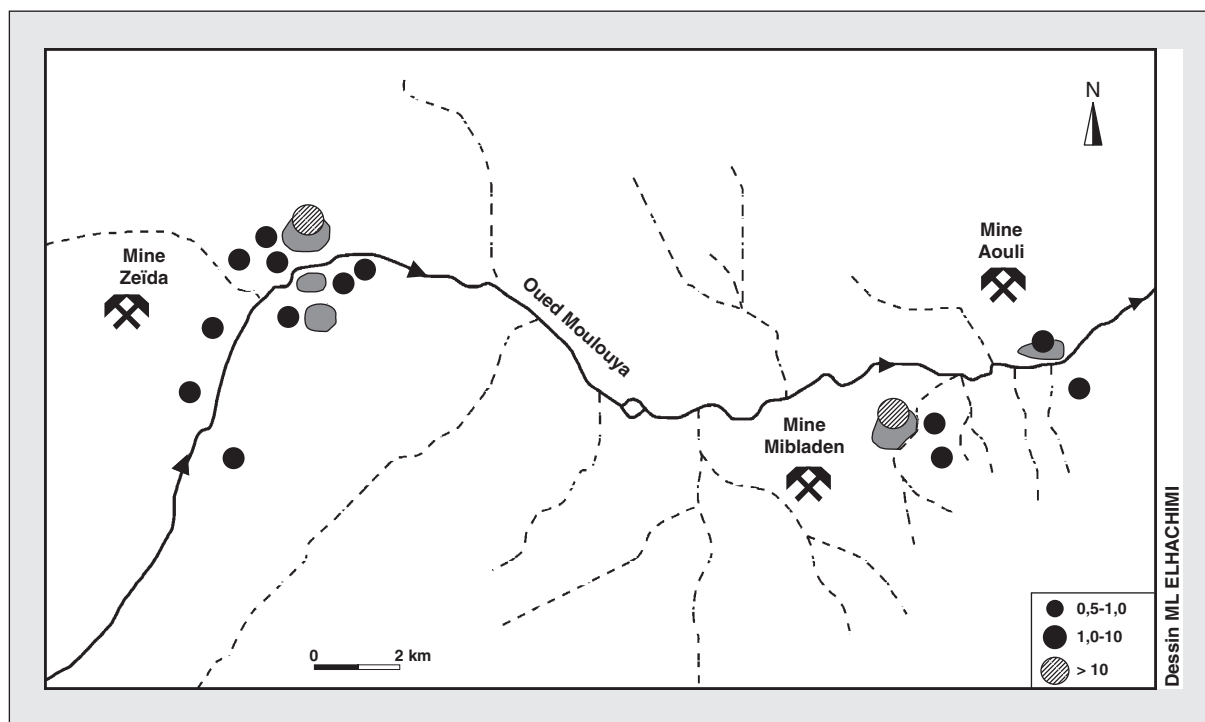


Figure 3. Répartition de l'index de pollution (IP) des échantillons de sols au voisinage des mines Aouli-Mibladen-Zeïda.

Figure 3. Distribution diagram of the pollution index (PI) of soil samples in the vicinities of Aouli-Mibladen-Zeïda mines.

Srm). À l'exception du sol de la station de référence tous les échantillons de sols prélevés au niveau des sites miniers Aouli-Zeïda-Mibladen et même le sol le plus lointain (S14) prélevé à 130 km présentent un IP supérieur à 1, ce qui confirme la contamination polymétallique des sols dans l'ensemble de la zone aval des sites miniers.

Les IP extrêmement élevés enregistrés pour les sols des résidus miniers (Sr, Srz, Srm, Sra), soulignent le caractère extrêmement néfaste de ces substrats abandonnés sans réhabilitation, qui constituent une source pérenne de contamination par les métaux lourds pour l'environnement et l'agriculture de la région. Les versées à résidus de Mibladen présentent la contamination polymétallique maximale dans la région d'étude (IP : 34,7). Ils sont suivis par les résidus de Zeïda avec un IP égal à 20, 52, puis par ceux d'Aouli avec un IP égal à 9,25.

## Conclusion

L'évaluation du degré de contamination des sols par les métaux lourds (Pb, Zn, Cu, Cd) au voisinage des centres miniers Aouli-Mibladen-Zeïda, abandonnés depuis des décennies dans la Haute Moulouya au Maroc, montre en général que les teneurs en métaux des sols au voisinage des districts miniers et même très loin sont élevées comparées aux teneurs du sol de référence ou aux teneurs considérées comme normales dans la littérature pour des sols non contaminés.

Les teneurs maximales en métaux sont enregistrées dans les sols des versées à résidus miniers qui montrent une contamination polymétallique, ce qui indique que les versées à résidus constituent une source pérenne importante de métaux lourds en surface des sites miniers. Ces contaminants polymétalliques sont ainsi disséminés par les voies hydriques et éoliennes à partir des résidus miniers et atteignent les sols proches et même

lointains *via* les mécanismes éoliens et hydriques d'érosion et de dépôt.

Les résultats de l'étude convergent vers un constat de contamination plus ou moins élevé par les métaux lourds d'une zone qui dépasse la zone minière proprement dite. Des mesures de remédiation doivent être prises afin d'immobiliser les polluants métalliques résiduels des rejets miniers et limiter leur transport, responsable de l'extension de la zone contaminée au-delà des sites miniers. ■

## Références

Adriano DC, 1986. *Trace elements in the terrestrial environment*. New York : Springer-Verlag.

Akujobi CO, Odu NN, Okorundu SI, 2012. Bioaccumulation of lead by *Bacillus* species isolated from pig waste. *Journal of Research in Biology* 2 : 83-9.

Augusto Costa AC, Pereira Duta F, 2001. Bioaccumulation of copper, zinc, cadmium and lead by *Bacillus* SP., *Bacillus cereus*, *Bacillus speareucus* and *Bacillus subtilis*. *Brazilian Journal of Microbiology* 32 : 32-50.

Baize D, 1997. *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation*. Paris : Inra éditions.

Basta NT, Pantone DJ, Tabatabai MA, 1993. Path analysis of heavy metal adsorption by soil. *Agro-nomy Journal* 85 : 1054-7.

Bowen HJM, 1979. *Environmental chemistry of the elements*. New York : Academic Press.

Chiffolleau, JF, Truquet I, 1994. *Nouvelles méthodes de dosages des métaux traces dans les sédiments et les matières en suspension*. R. INT. DEL. 08-94 IFREMER. Nantes : Ifremer. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00140/25119/23228.pdf>

Chon HT, Ahn JS, Jung MC, 1998. Seasonal variations and chemical forms of heavy metals in soils and dusts from the satellite cities of Seoul. *Environmental Geochemistry and Health* 20 : 77-86.

Direction des Mines, 1990. *Panorama de l'industrie minière*, Tome 2. Rabat (Maroc) : Direction des Mines.

EL Jaouani L, 2001. *Étude géologique et géologique des gisements plombifères de la boutonnière d'Aouli (Aouli, Zeïda, Mibladen) Haute Moulouya (Maroc)*. Thèse de doctorat, université Mohamed V, Rabat, Maroc.

Emberger A, 1965. Introduction à l'étude des minéralisations plombifères de la Haute Moulouya, Maroc. Colloque sur des gisements stratiformes de plomb, zinc et de manganèse du Maroc. *Notes & Mémoires du Service Géologique Maroc* (181) : 167-74.

Ernst WHO, Nelissen HJM, 2000. Life-phase of a zinc- and cadmium-resistant ecotype of *Silene vulgaris* in risk assessment of polymetallic mine soils. *Environmental Pollution* 107 : 329-38.

Felenc R, Lenoble JP, 1965. Le gîte de plomb de Mibladen. Colloque sur des gisements stratiformes de plomb, zinc et de manganèse du Maroc. *Notes & Mémoires du Service Géologique Maroc* 181 : 185-204.

MATF (ministère de l'Aménagement du Territoire français), 1998. Teneurs limites de concentration en ETM dans le sol. Arrêté du 8 janvier 1998. *Journal Officiel de la République Française du 31 janvier 1998*.

Jung MC, 2001. Heavy metal contamination of soil and water in and around the Imcheon Au-Ag mine. *Korea. Applied Geochemistry* 16 : 1369-75.

Jung MC, Thornton I, 1996. Heavy metal contamination of soils and plants in the vicinity of a lead-zinc mine Korea. *Applied Geochemistry* 11 : 53-9.

Kabata-Pendias A, Pendias H, 1984. *Trace elements in soils and plants*. Boca Raton (Florida) : CRC Press.

Kabata-Pendias A, Pendias H, 1992. *Trace elements in soils and plants*, 2nd edition. Boca Raton (Florida) : CRC Press.

Kloke A. 1979. *Contents of Arsenic, Cadmium, Chromium, Fluorine, Lead, Mercury and Nickel in plants grown on contaminated soil*. Paper presented at United Nations -ECE Symposium, Geneva, on Effects of Air-borne pollution on vegetation, Warsaw, August 20.

Lee CG, Chon HT, Jung MC, 2001. Heavy metal contamination in the vicinity of the Daduk Au-Ag-Pb-Zn mine in Korea. *Applied Geochemistry* 16 : 1377-86.

Li X, Thornton I, 2001. Chemical partitioning of trace and major element in soils contaminated by mining and smelting activities. *Applied Geochemistry* 16 : 1693-706.

Nasloubi M, 1993. *Genèse et modélisation des minéralisations plombifères de la haute Moulouya (Maroc)*. Mémoire de maîtrise, université du Québec à Montréal.

Plant JA, Raiswell R, 1983. Principles of environmental geochemistry. In : Thornton I, éd. *Applied Environmental Geochemistry*. New York : Academic Press.

Smouni A, Ater M, Auguy F, Laplaze L, El Mzibri M, Berhada F, et al., 2010. Évaluation de la contamination par les éléments-traces métalliques dans une zone minière du Maroc oriental. *Cahiers Agricultures* 19 : 273-9. doi: 10.1684/agr.2010.0413

Van Oort F, Lamy I, Baize D, Bourennane H, 2002. *Comment définir une contamination métallique pour les agrosystèmes ? Par la teneur totale en surface, le profil des teneurs ou les stocks de métaux ? Actes des Septièmes Journées Nationales de l'Étude des Sols*, 22-24 octobre 2002, Orléans.

Wadjinni A, 1998. Le plomb au Maroc : cas des districts de Touissit et de Jbel. Aouam. *Chronique de la Recherche Minière* (531-532) : 9-28.