

DIAGNOSTIQUE ET ÉVALUATION DE LA CHARGE POLLUANTE PAR LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES (ETMs) : CAS DU COMPLEXE MINIER DE KHERZET YOUSSEF (SÉTIF).

Linda ATTOUCHEK*, Boualem BAYOU, Abdelhak BOUTALEB*
et Djamel Eddine AÏSSA***

RÉSUMÉ

Le développement industriel a généré une pollution des sols et des eaux, fournis en éléments traces métalliques (ETMs). L'accumulation de ces éléments dans les formations superficielles (sols et sédiments) en teneurs excessives, représente un risque pour les systèmes sol et eau. C'est le cas de l'Algérie. En effet, les activités industrielles, tel que les mines et leurs unités de traitement, libèrent une grande variété d'ETMs. Dans ce contexte, la laverie du complexe minier (Pb-Zn) de Kherzet Youssef (Sétif), objet de notre étude, est un bon exemple d'une telle pollution.

On se propose d'évaluer la charge polluante accumulée dans les sols et dans les nappes d'eaux souterraines de la région, de cartographier la dispersion de cette pollution ainsi que la caractérisation des conditions d'infiltration des ETMs dans les sols.

Les résultats obtenus ont permis de montrer l'existence d'une pollution importante aux niveaux des sols par le zinc, le plomb, le cadmium et moins importante par le cuivre. Ces polluants n'ont pas atteint fort heureusement les nappes d'eaux. La nature pédologique (argilo-sableuse et argileuse), la présence de la matière organique, la nature géologique des roches (calcaires et dolomies), ont formé une barrière géochimique dans ce milieu à pH neutre. Ces résultats sont bien confortés par la cartographie des anomalies de susceptibilité magnétique. En effet la direction des anomalies magnétiques se corrèle bien avec la direction des vents dominants (NE). La dispersion verticale des ETMs est aussi bien caractérisée par la susceptibilité magnétique K, comme le montre les courbes de K en fonction de la profondeur. En effet, en dessous des 40 à 50 premiers centimètres de la colonne lithologique, les valeurs de susceptibilité magnétique sont inférieures à la valeur limite de pollution. Cette limite qui se situe à la base des argiles conforte l'hypothèse de barrière géochimique jouée par celle-ci.

Mots clés - Environnement - Contamination - Pollution des sols - Pollution des eaux - Eléments traces métalliques (ETMs) - Activité minéralurgique - Dispersion géochimique - Susceptibilité magnétique.

*Laboratoire de Métallogénie - FSTGAT/USTHB - Alger, BP. 32 El Alia - 16 111 Algérie.

**CRAAG - BP. 63, Route de l'observatoire 16340, Bouzaréah - Alger, Email : bbayou57@yahoo.fr

- Manuscrit déposé le 26 Septembre 2007, accepté après révision le 05 Février 2008.

DIAGNOSTIC AND EVALUATION OF THE POLLUTING LOAD BY THE METAL ELEMENTS TRACES (ETMs) CASE OF THE MINING COMPLEX OF KHERZET YOUSSEF (SÉTIF).

Abstract

The industrial development generated a pollution of the soil and water, rich in metallic trace elements (MTEs). The accumulation of these elements in the surface formations (soil and sediments) with excessive contents represents a risk, for the soil and ground-water systems. It is the case of Algeria. Indeed, the industrial activities, such as the mines and their treatment units release in the environment a large variety of MTEs. In this context, the laundry of the mining complex (Pb-Zn) of Kherzet Youssef (Sétif), aim of this study, presents the example of such a pollution.

For that we propose to evaluate the polluting load accumulated in the ground and the underground water of the area, to chart the dispersion of this pollution as well as the characterization of the infiltration conditions of the MTEs in the ground.

The obtained results show the existence of an important pollution, of the soil, by zinc, lead, cadmium and a less important one by copper. Fortunately, these pollutants did not reach the aquifers. The pedological nature (sandy-clays and argillaceous), the presence of the organic matter and the geological nature of the rocks (limestone and dolomite), favoured the formation of a geochemical barrier in the neutral pH of this medium. This fact slowed down the dissolution and the vertical dispersion of the MTEs. These results are well consolidated by the cartography of the magnetic anomalies of susceptibility. Indeed the direction of the magnetic anomalies is well superimposed with the direction of the dominant wind (NE). Vertical dispersions of the MTEs is well characterized by magnetic susceptibility K as shown by the K-depth curves. Indeed, below the first 40 to 50 centimeters of the lithologic column, the magnetic susceptibility values are lower than the K-limit value of pollution. This limit, which is the clays base, consolidates the geochemical assumption of barrier played by clay stratum.

Key words - Environment - Contamination - Soil pollution - Water pollution - Metallic trace elements (MTEs) - Mining activity - Geochemical dispersion - Magnetic susceptibility.

DIAGNOSTIQUE ET ÉVALUATION DE LA CHARGE POLLUANTE PAR LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES (ETMs) :
CAS DU COMPLEXE MINIER DE KHERZET YOUSSEF (SÉTIF).

I- INTRODUCTION

Durant ces dernières années l'activité humaine et en particulier celle liée au développement industriel a généré une importante pollution de l'environnement avec des conséquences dramatiques pour le futur. L'étude de l'impact de cette pollution sur l'environnement et sa caractérisation, présente donc un grand intérêt.

En outre, cette pollution anthropique est caractérisée par une diversité de ses sources et de ses composants, (organiques et/ou métalliques). Elle présente un danger sur l'environnement au vu de ses conséquences sur la santé publique, particulièrement celle des métaux lourds.

En effet, les mines et les unités de traitement minéralurgique présentent l'exemple idéal et propice d'une source de pollution anthropique. La mine de Kherzet Youssef, dans la région d'Aïn Azel (Wilaya de Sétif), objet de cette étude, en est l'exemple type.

La région de Kherzet Youssef renferme une ancienne mine de Pb-Zn, dotée d'une usine de traitement du minerai métallique. Ces deux unités (mine et usine de traitement) libèrent des quantités importantes d'éléments traces métalliques (ETMs) dans l'environnement entraînant souvent une augmentation des risques de la contamination des sols, des nappes aquifères et par suite de la chaîne alimentaire.

Pour ce faire, l'étude comporte, d'une part, dans un premier temps une évaluation de la charge polluante accumulée dans les sols et dans les nappes d'eaux souterraines de la région et dans un second temps la réalisation d'une cartographie de répartition des anomalies de susceptibilité magnétique, qui sont le reflet et l'image de la répartition des éléments métalliques polluants (ETMs). D'autre part, une corrélation avec les résultats des analyses quantitatives

précédentes est suggérée. Enfin, la profondeur d'infiltration des ETMs est qualitativement caractérisée, puis liée à la nature du sol.

II- CONTEXTE GÉNÉRAL.

- Géographiquement, la région de Kherzet Youssef est située dans la partie centrale de l'Algérie du nord. Elle appartient au domaine méridional des hauts plateaux (fig. 1). La zone d'étude, notamment l'usine de traitement du minerai plomb-zinc est située à proximité de l'agglomération d'Aïn Azel (wilaya de Sétif). Celle ci est implantée sur une petite colline à environ 45 km de Sétif.

- Géologiquement, le gisement de Kherzet Youssef, appartient au flanc NE du chaînon de Hadjar Labiod qui culmine à 1371 m. Celui-ci correspond à une série monoclinale située sur la bordure septentrionale de l'autochtone hodnéen (Glaçon, 1967). Affecté par des failles N-S et E-W (Boutaleb, 2001), le massif de Hadjar Labiod correspond à un anticlinal d'orientation est-ouest. Dans le secteur étudié, les roches sont en général assez compétentes et sont soumises à un style de déformation de type cassant où on peut distinguer l'accident majeur exprimé par la faille de Kherzet Youssef (fig. 2).

- D'un point de vue pédologique, on identifie dans la zone d'étude cinq (5) types de sol (fig. 3) : un sol argileux; un sol limono-argileux; un sol argilo-sableux; un sol limono-sableux et un sol sableux (Medkour, 1994). Les sols argileux et limono-argileux couvrent presque la moitié de la zone d'étude, ce qui favorise l'accumulation des ETMs à la surface de sol.

- Quant au cadre hydrogéologique, les études géologiques et géophysiques ont montré que la région d'étude est représentée principalement par deux niveaux aquifères.

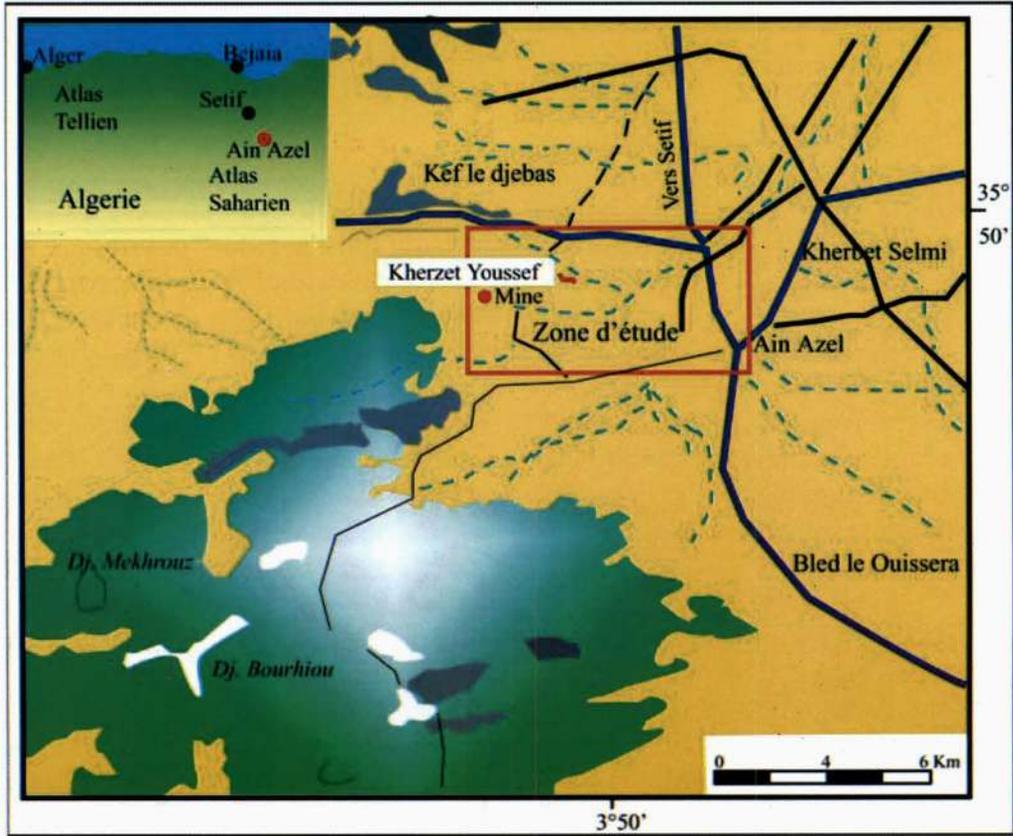


Fig. 1 - Carte géographique de la région d'Aïn Azel (Sétif) montrant la zone d'étude.
Geographic framework of the Ain Azel zone (Sétif) showing the studied area.

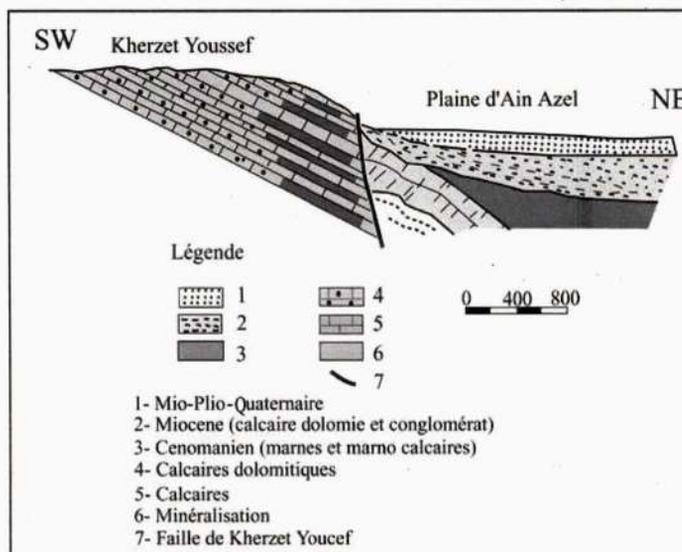


Fig. 2- Coupe géologique schématique passant par la mine de Kherzet Youssef
Geological cross section passing by the mine of Kherzet Youssef

DIAGNOSTIQUE ET ÉVALUATION DE LA CHARGE POLLUANTE PAR LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES (ETMs) :
CAS DU COMPLEXE MINIER DE KHERZET YOUSSEF (SÉTIF).

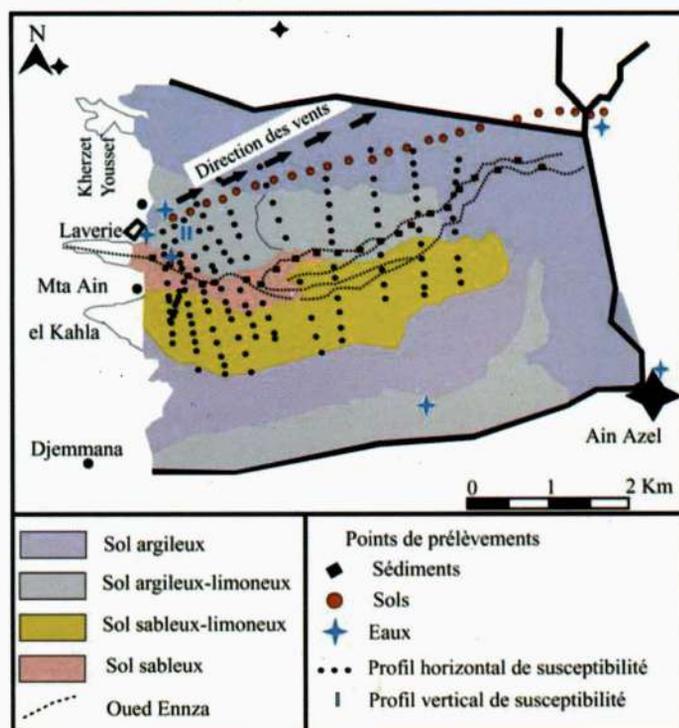


Fig.3 - Carte pédologique actualisée d'Aïn Azel (A.N.R.H., 1992) montrant les unités pédologiques et les sites de prélèvement des échantillons

Updated pedological map of Ain Azel (A.N.R.H., 1992) showing the pedological units and the sampling sites

1. La nappe barrémienne; elle est située à l'ouest de la faille de Kherzet Youssef (fig. 2) elle est caractérisée par des formations sédimentaires constituées d'une alternance de calcaires, marnes et dolomies avec intercalation de bancs gréseux (Sommelet, 1990). Le Barrémien est affecté par un réseau de failles et de fractures particulièrement développées au niveau du massif de Hadjar Labiod, permettant la circulation des eaux souterraines dans les formations calcaire-dolomitiques (Sommelet, 1990). Les eaux de cette nappe sont employées pour l'irrigation et le lavage du minerai.

2. La nappe mio-plio-quadernaire (fig. 2); elle est située immédiatement à l'est de la faille de Kherzet Youssef dans la plaine de Aïn Azel, son épaisseur peut atteindre 250 m. Elle est caractérisée par une sédimentation détritico-continentale représentée, par des conglomérats

qui s'inter-calent avec des grès, argiles, marnes et calcaires lacustres (Sommelet, 1990). Les eaux de cette nappe sont utilisées par les agriculteurs à travers leurs puits domestiques pour la consommation et l'irrigation.

III- ÉCHANTILLONNAGE

Pour évaluer la dispersion géochimique des ETMs (Zn, Pb, Cu et Cd) autour du complexe minier de Kherzet Youssef, un échantillonnage massif a été réalisé. En effet, à partir de la digue, cent dix huit (118) échantillons des eaux (de rejet, oued, puits, forage et source) ont été prélevés. Tandis que pour les sols et les sédiments (digue de stériles, les terres agricoles), un prélèvement d'échantillons est effectué tous les 200m, sur une distance d'environ 5 km, selon la direction NE (direction dominante des vents).

Comme les conditions météorologiques influent probablement sur la répartition et l'infiltration des ETMs, les prélèvements ont été réalisés au cours de deux périodes, sèche et humide, successives (octobre 2003 et juin 2004).

Pour les eaux, la plupart des échantillons ont été prélevés dans la plaine d'Aïn Azel (à l'est de la faille de Kherzet Youssef) (fig. 3). Par souci de cerner l'origine et la nature de la contamination éventuelle des eaux et d'évaluer aussi leur qualité, on a procédé à l'analyse de chaque point d'eau (source, puits, forage, oued et les eaux de rejet de la laverie) (fig. 3). Les échantillons d'eau ont été recueillis dans des flacons stériles qui ont été soigneusement rincés sur place avec de l'eau distillée puis avec de l'eau de la prise en prenant soin de ne pas laisser de bulles d'air sous le dispositif de fermeture. Pour les eaux potables en profondeur, on a utilisé l'appareil de prélèvement à distance, muni d'un système de repérage de la profondeur du prélèvement. Avant tout traitement au laboratoire, les échantillons sont soumis à une acidification en ajoutant systématiquement deux millilitres d'acide nitrique (HNO_3) et puis à la filtration de la moitié de chaque échantillon à travers un filtre de $0,45 \mu\text{m}$ (rapidité moyenne), afin d'éliminer les substances en suspension.

Pour les prélèvements de sols, les échantillons sont prélevés à une profondeur moyenne de 30 cm au moyen d'une pelle à main. La quantité prélevée est de l'ordre de 1 kg pour chaque échantillon. Avant le traitement au laboratoire, les échantillons sont séchés à l'air libre pendant une dizaine de jours. Toutes les précautions ont été prises afin d'éviter toute contamination durant le stockage et le transport des différents échantillons.

Enfin une campagne de mesures du paramètre magnétique (susceptibilité magnétique) a été menée en période d'été. Elle a consisté en la mesure de ce paramètre selon une maille de $2 \times 3 \text{ km}$ avec

une grille moyenne de 200 m à partir de la limite de la digue (fig.3). Aussi, tout près de la digue deux profils verticaux sur une profondeur de 1,20 m ont été effectués, afin d'étudier le taux d'infiltration en fonction de la susceptibilité magnétique (fig 3.).

L'absorption atomique ainsi que l'ICP (Inductively Coupled Plasma) ont été utilisées comme techniques d'analyses des échantillons. Ces méthodes s'avèrent être des méthodes très fiables pour le dosage des métaux présents aussi bien dans les eaux (souterraines, superficielles et rejets) que dans les sols. (Davidson et Kevin 1995; Manning et William 1997; Ramsey et Thomson, 1987).

IV- RÉSULTATS DES ANALYSES QUANTITATIVES.

IV-1. Les eaux.

Les résultats d'analyse des eaux sont classés selon les sources de collecte des échantillons. A cet effet on distingue :

IV-1-A. Les eaux résiduaires

Les eaux résiduaires du complexe minier de Kherzet Youssef sont réparties en deux types :

- les eaux industrielles de la laverie, qui sont dirigées par une canalisation vers l'aire de stockage du minerai stérile (digue) et de là, à travers un réseau de canalisations pour aboutir dans l'oued;
- les eaux usées de refroidissement des machines qui sont déversées directement dans l'oued.

Les résultats d'analyse des eaux, prélevées dans le bassin de décantation (digue des tailings) et dans l'oued Enza, durant les deux périodes de prélèvement, avant et après filtration, ont donné les résultats rassemblés dans les tableaux I et II.

DIAGNOSTIQUE ET ÉVALUATION DE LA CHARGE POLLUANTE PAR LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES (ETMs) :
CAS DU COMPLEXE MINIER DE KHERZET YOUSSEF (SÉTIF).

D'après le tableau comparatif des teneurs en ETMs dans les eaux de l'oued Ennza et les eaux de la digue, aux normes des eaux de rejets, on remarque que les teneur en Zn, Pb et Cd sont supérieures aux normes à l'exception de l'élément Cu qui a donné des teneurs inférieures aux normes en vigueur (tabl. I et II).

Tableau I - Comparaison des teneurs en ETMs des eaux de l'oued Ennza aux normes.
Comparison of the contents of ETMs of water of the Ennza ouady to the standards.

Eléments	Teneur en mg/l		Normes applicables aux eaux de rejets en mg/l			Observations
	Période humide	Période sèche	(A.F.N.O.R)	O.M.S	Algériennes	
Zn	6.20-13.6	15.20-5.80	2	5	5	Sup. à toutes les normes
Pb	0.30-0.80	0.38-0.85	0.5	0.1	1	Sup. à la norme OMS
Cu	0.01-0.04	0.02-0.05	0.5	0.2	0.2	Inf. à toutes les normes
Cd	0.04-0.09	0.05-0.095	0.02	3	3	Sup. à l'A.F.N.O.R

Tableau II - Comparaison des teneurs en ETMs des eaux de la digue aux normes.
Comparison of the contents of ETMs of dike's water to the standards.

Eléments	Teneur en mg/l		Normes applicables aux eaux de rejets en mg/l			Observations
	Période humide	Période sèche	(A.F.N.O.R)	O.M.S	Algériennes	
Zn	6.80-12.6	6.00-14.6	2	5	5	Sup. à toutes les normes
Pb	0.20-0.40	0.23-0.60	0.5	0.1	1	Sup. à l'O.M.S et l'A.F.N.O.R
Cu	0.01-0.03	0.01-0.03	0.5	0.2	0.2	Inf. à toutes les normes
Cd	0.03- 0.06	0.04-0.082	0.02	3	3	Sup. à l'A.F.N.O.R

**IV-1-B. Les eaux de la nappe barrémienne
(Puits de mine)**

Les résultats d'analyses des eaux, prélevées dans la nappe barrémienne (pour les deux périodes d'échantillonnage), avant et après filtration, sont rassemblés dans le tableau III. La comparaison des teneurs en ETMs pour les eaux de la nappe barrémienne aux normes applicables aux eaux de boisson, révèle que ces eaux sont très polluées par le zinc, le plomb, le cadmium et plus ou moins par le cuivre (tabl. III).

**IV-1-C. Les eaux de la nappe mio-plio-
quaternaire (sources et puits privés)**

Le tableau IV montre les résultats d'analyse, pour les deux périodes, des eaux de la nappe mio-plio-quaternaire (sources et puits privés). La comparaison des teneurs obtenues en ETMs aux normes applicables aux eaux potables montre que durant les deux périodes de prélèvement, tous les éléments métalliques (Zn, Pb, Cd et Cu) présentent des valeurs inférieures aux normes admises (tabl. IV). Ces résultats montrent bien que la dispersion des ETMs en profondeur est inexistante ou du moins très faible.

Tableau III - Comparaison des teneurs en ETMs des eaux de la nappe barrémienne aux normes.

Comparison of the contents of ETMs of the Barremian aquifers to the standards.

Eléments	Teneur en mg/l		Normes applicables aux eaux de boissons en mg/l			Observations
	Période humide	Période sèche	(A.F.N.O.R)	O.M.S	Algériennes	
Zn	2.40-5.75	2.80-8.25	2	5	5	Sup. à toutes les normes
Pb	0.10-0.38	0.15-0.50	0.1	0.1	0.05	Sup. à toutes les normes
Cu	0.01-0.03	0.01-0.04	0.02	1	0.01	Sup. à l'A.F.N.O.R et Algérienne.
Cd	0.03-0.07	0.04-0.09	0.05	0.01	1.5	Sup. à l'O.M.S et l'A.F.N.O.R

Tableau IV - Comparaison des teneurs en ETMs des eaux de la nappe mio-plio-quaternaire aux normes.

Comparison of the contents of ETMs in the mio-plio-quaternary aquifers to the standards.

Eléments	Teneur en mg/l		Normes applicables aux eaux de boissons			Observations
	Période humide	Période sèche	(A.F.N.O.R)	O.M.S	Algériennes	
Zn	0.20-0.68	0.26-0.75	2	5	5	Inf. aux normes
Pb	0.00-0.04	0.01-0.05	0.1	0.1	0.05	Inf. aux normes
Cu	0.00-0.01	0.00-0.04	0.02	1	0.01	Inf. aux normes
Cd	0.00-0.01	0.0-0.02	0.05	0.01	1.5	Inf. aux normes

DIAGNOSTIQUE ET ÉVALUATION DE LA CHARGE POLLUANTE PAR LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES (ETMs) :
CAS DU COMPLEXE MINIER DE KHERZET YOUSSEF (SÉTIF).

IV-2. Les sols

L'analyse et l'interprétation des données sont basées sur le seuil d'investigation proposé par Baize (2000a), les normes françaises A.F.N.O.R (arrêté 08/01/1998) et le fond pédo-géochimique de la région d'étude.

Le tableau récapitulatif des teneurs en zinc, plomb, cuivre et cadmium (tabl.V) montre que le sol de la plaine d'Aïn Azel est très pollué par le zinc, le plomb et par le cadmium.

Pour suivre l'évolution de la distribution des ETMs, par rapport à la source de pollution (la mine), dans les sols de la plaine d'Aïn Azel, des courbes de distribution géochimique spatiale de Zn, Pb et Cd ont été établies.

L'analyse de la distribution géochimique des éléments Zn, Pb et Cd dans les sols de la plaine d'Aïn Azel (fig. 4) durant les deux périodes de prélèvement (humide et sèche), montre que d'une façon générale les teneurs en Zn, Pb et Cd diminuent selon un profil SW-NE de 5,2 km, en partant de la digue (source de pollution). Toutefois, pour chacun des éléments, nous notons des anomalies positives qui reflètent des teneurs importantes, le long de cette distance. Nous présentons la distribution géochimique spatiale de chaque élément par sa courbe de variation le long de ce profil. En fonction de la

pédologie du terrain, les courbes de teneurs montrent ce qui suit :

IV-2-A. Dans le sol de type argilo-sableux:

- les teneurs en zinc, plomb et cadmium obtenues pendant les deux périodes de prélèvement présentent des valeurs faibles depuis le premier point prélevé à partir de la digue jusqu'au point de prélèvement n°7, sur une distance de 1.2 km.

Cette diminution est probablement liée à la nature du sol (argilo-sableux) caractérisé par une porosité moyenne qui permettrait l'infiltration d'une grande partie des particules de Zn^{2+} , Pb^{2+} et Cd^{2+} vers les horizons inférieurs (Juste, 1995).

IV-2-B. Dans le sol purement argileux:

On note des augmentations très importantes en teneurs de Zn, Pb et Cd, durant les deux périodes de prélèvement et plus particulièrement durant la période sèche.

- Les teneurs en zinc montrent des augmentations importantes représentées par les pics «a», «b», «c», «d», «e» et «f» (fig.4, A, A'). Les valeurs de ces concentrations varient entre 1400 et 3200 ppm durant la période humide et atteignent jusqu'à 5000 ppm pendant la période sèche.

Tableau V - Comparaison des teneurs en ETMs des sols de la plaine d'Aïn Azel aux normes admises.

Comparison of the contents of ETMs of the soils, in the studied area, to the standards.

Eléments	Teneur en ppm		Normes en ppm		Fond Pédo-géochimique	Observations
	Période humide	Période sèche	Baize (2000 b)	A.F.N.O.R		
Zn	80 - 5200	300-6500	300	150	50	Sup. aux normes admises
Pb	20 - 400	60-4500	100	60	20	Sup. aux normes admises
Cd	5 - 35	5 - 40	2.0	0.7	/	Sup. aux normes admises
Cu	10 - 22	10 - 38	100	40	35	Inf. aux normes admises

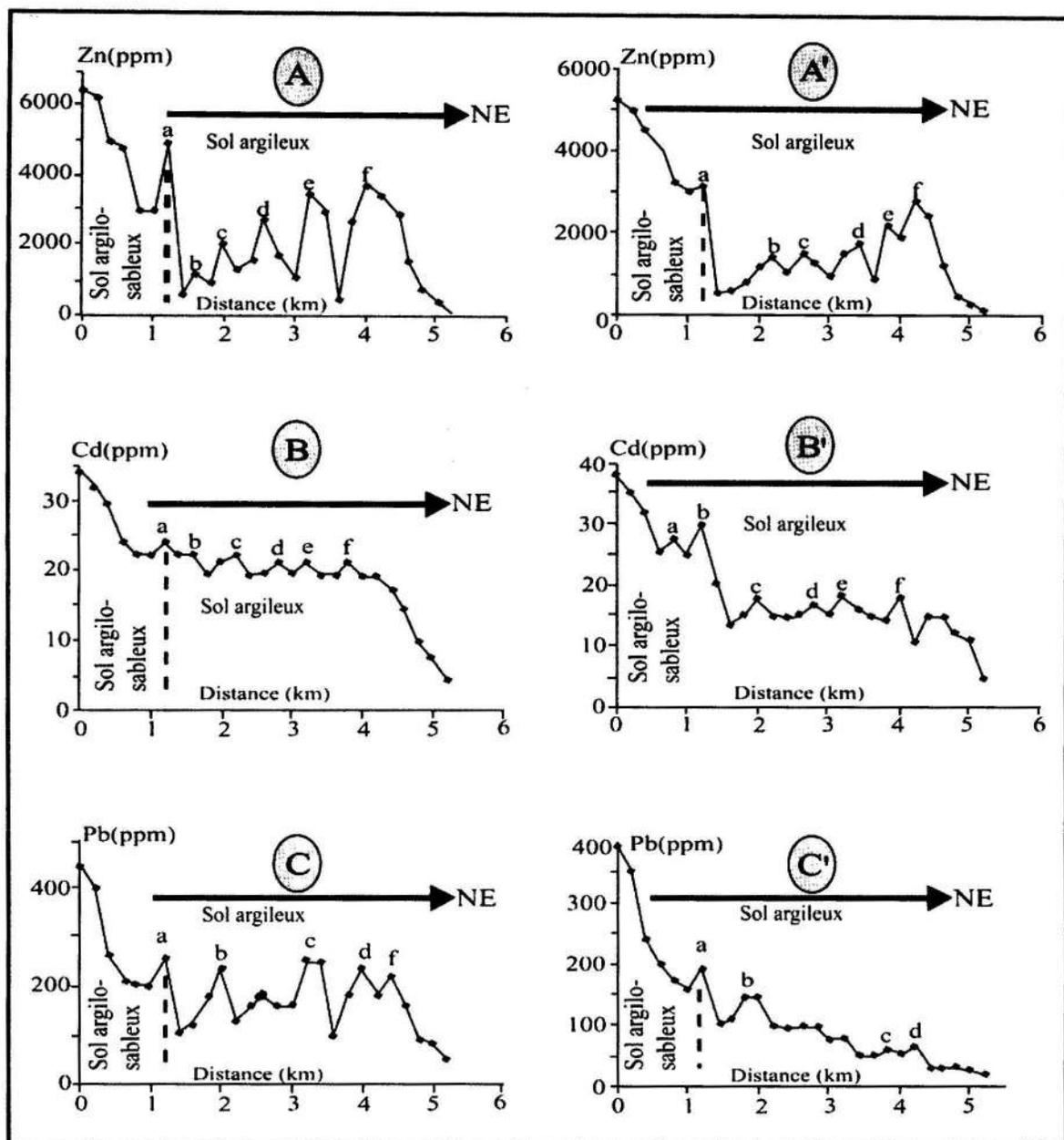


Fig. 4 - Courbe de distribution géochimique spatiale du zinc (A,A'), cadmium (B, B') et plomb (C,C') dans les sols de la plaine d'Aïn Azel, en période humide et sèche respectivement.

Spatial geochemical distribution curves of Zinc (A,A'), Cadmium (B, B') and Lead (C, C') in the soils, in wet and dry periods respectively.

DIAGNOSTIQUE ET ÉVALUATION DE LA CHARGE POLLUANTE PAR LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES (ETMs) :
CAS DU COMPLEXE MINIER DE KHERZET YOUSSEF (SÉTIF).

- les teneurs en plomb obtenues pendant la période humide montrent quelques petites augmentations correspondant aux pics «a», «b», «c», «d» où les valeurs varient entre 65 et 200 ppm (fig.4. C et C'). Par contre durant la période sèche on remarque des augmentations très importantes en plomb correspondant aux pics «a», «b», «c», «d» et «f» qui présentent des valeurs variant entre 180 et 260 ppm.

- durant la période humide les teneurs en cadmium montrent une distribution hétérogène représentée par des élévations plus ou moins importantes correspondant aux pics «a», «b», «c», «d» et «e» (fig.4. B et B'). Si l'intervalle des teneurs en période humide varie de 22 ppm à 25ppm, en période sèche cet intervalle passe de 15 ppm jusqu'à 30 ppm avec des pics très importants ('b', 'c', 'd', 'e' et 'f') comme le montre la figure 4B'.

L'augmentation des concentrations en zinc, plomb, cadmium dans les sols argileux s'explique probablement par la présence de différents types d'argiles; illite-montmorillonite (50%), illite (30%) et kaolinite (30%), prépondérantes dans les sols de la plaine d'Aïn Azel. Ces argiles avec un pH neutre (6,8 – 7,4) fixent plus facilement Zn, Pb et Cd par adsorption sur leurs feuilletés et par l'intermédiaire des oxydes d'alumines (Zachara et Smith, 1994). Ces oxydes d'alumines se présentent avec un taux élevé dans les sols ($H \approx 7\%$). Le phénomène d'adsorption sur les argiles pour les cations Zn^{2+} , Pb^{2+} et Cd^{2+} se fait par échange d'ions avec Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^{2+} , K^{+} présents dans le sol et par la complexation de surface surtout pour le cadmium et le plomb (Zachara et Smith, 1994).

Les carbonates surtout les dolomies qui se présentent avec un taux élevé dans les sols (39.80 %) interviennent aussi dans la fixation des ions de Zn^{2+} , Pb^{2+} et Cd^{2+} par échange d'ions avec les Ca^{2+} ou bien par complexation avec les groupes carbonatés de la surface hydratée (Zachara et Smith, 1994).

La matière organique qui se présente avec un taux élevé dans les sols (20.12 %) intervient aussi dans l'accumulation des ions de Zn^{2+} , Pb^{2+} et Cd^{2+} dans le sol par complexation avec les groupes fonctionnels des substances humiques (Evans, 1989).

V. RÉSULTATS DES ANALYSES QUALITATIVES (GÉOPHYSIQUE).

V-1. Interprétation des résultats de susceptibilité.

La susceptibilité magnétique, qui est le reflet de la concentration des métaux lourds (Michael Evans et *al.*, 2002), est caractérisée par son intensité et sa distribution. Dans cette étude, son intensité a une valeur moyenne de $450 \cdot 10^{-6}$ SI. Concernant sa distribution, l'histogramme de la fréquence des intensités montre que les valeurs de susceptibilité magnétiques les plus dominantes sont dans le voisinage de la valeur moyenne (fig.5). Cependant, de fortes intensités sont présentes dans le milieu immédiat de la digue. Nous pensons que ces valeurs de susceptibilité sont le reflet d'une composition à dominance ferromagnétique.

L'analyse de la courbe de variation de l'intensité de la susceptibilité magnétique le long d'un profil NE (direction dominante des vents) montre trois comportements (fig. 6B). En effet, dans le milieu immédiat de la digue elle présente un

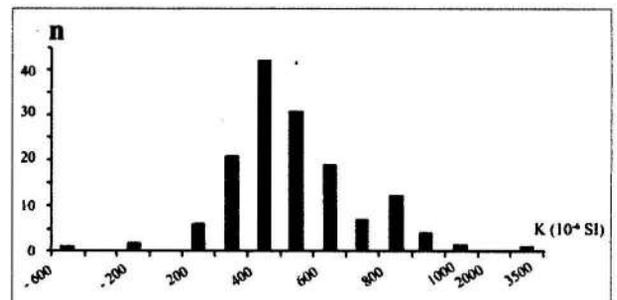


Fig. 5. Histogramme de la fréquence des susceptibilités moyennes.

Histogram of the frequency of mean susceptibilities.

maximum, puis une décroissance, suivi par un large pic dans un intervalle (de 600 à 1000 m à partir de la digue) pour reprendre sa décroissance en fin de profil. Cette variation peut être corrélée avec la pédologie du terrain (pouvoir d'accumulation). En outre, le pouvoir de dispersion des ETMs dans la direction des vents dominants dépend de la taille des grains métalliques et de la force des vents dominants. Ainsi, la répartition décroissante des anomalies à partir de la digue, peut être confortée en partie, par cette relation (relation granulométrie - force des vents). Néanmoins, cette courbe de susceptibilité magnétique se corrèle bien avec la courbe d'analyse géochimique des ETMs, d'une façon générale. La meilleure corrélation est observée avec la courbe de variation du taux de plomb selon le même profil (fig. 6A).

et les zones limitrophes de l'oued Annza (fig.7). Cependant, l'intensité de ces anomalies diminue tout en s'éloignant de la mine. La répartition de ces anomalies est donc en bon accord avec les conditions de dispersion (vents et eaux). Néanmoins, l'existence de quelques rares anomalies négatives peut être reliée à des origines organiques (décomposition de la matière organique) ou bien à la lithologie argileuse, donc diamagnétique.

On pourrait, dans une première approche définir une limite de susceptibilité magnétique ($<400 \cdot 10^{-6}$ SI) qui représenterait la limite des composants paramagnétiques, probablement d'origine pédogénique (altération de la roche mère). A partir de cette limite, on pourra considérer les anomalies observées comme étant anthropiques, donc associées à une pollution.

V-2. Interprétation de la carte de susceptibilité magnétique.

La projection des intensités de la susceptibilité magnétique dans un système cartographique révèle mieux la répartition des anomalies. En effet, les plus importantes anomalies sont localisées dans la partie proche de la source de pollution (mine)

V-3. Étude des conditions d'infiltration des particules polluantes dans la couche superficielle.

Afin d'étudier les conditions d'infiltration des particules polluantes nous avons procédé à des levés verticaux de la susceptibilité magnétique

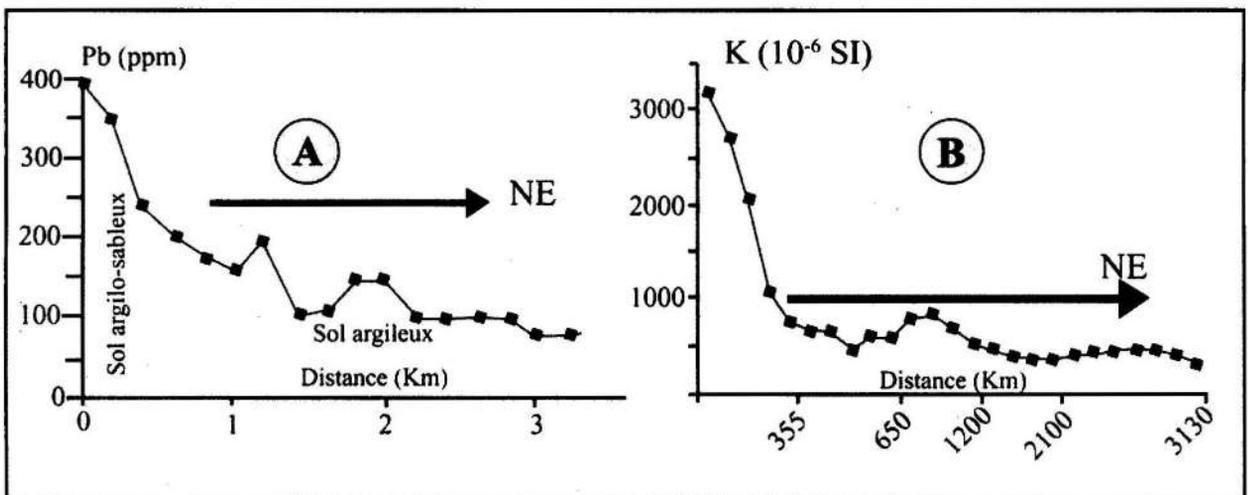


Fig.6 - Comparaison de la teneur en Pb (A) et la variation de la susceptibilité magnétique (B) le long du même profil.

Comparison of Pb content (A) and the variation of magnetic susceptibility (B) along the same profile

DIAGNOSTIQUE ET ÉVALUATION DE LA CHARGE POLLUANTE PAR LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES (ETMs) :
CAS DU COMPLEXE MINIER DE KHERZET YOUSSEF (SÉTIF).

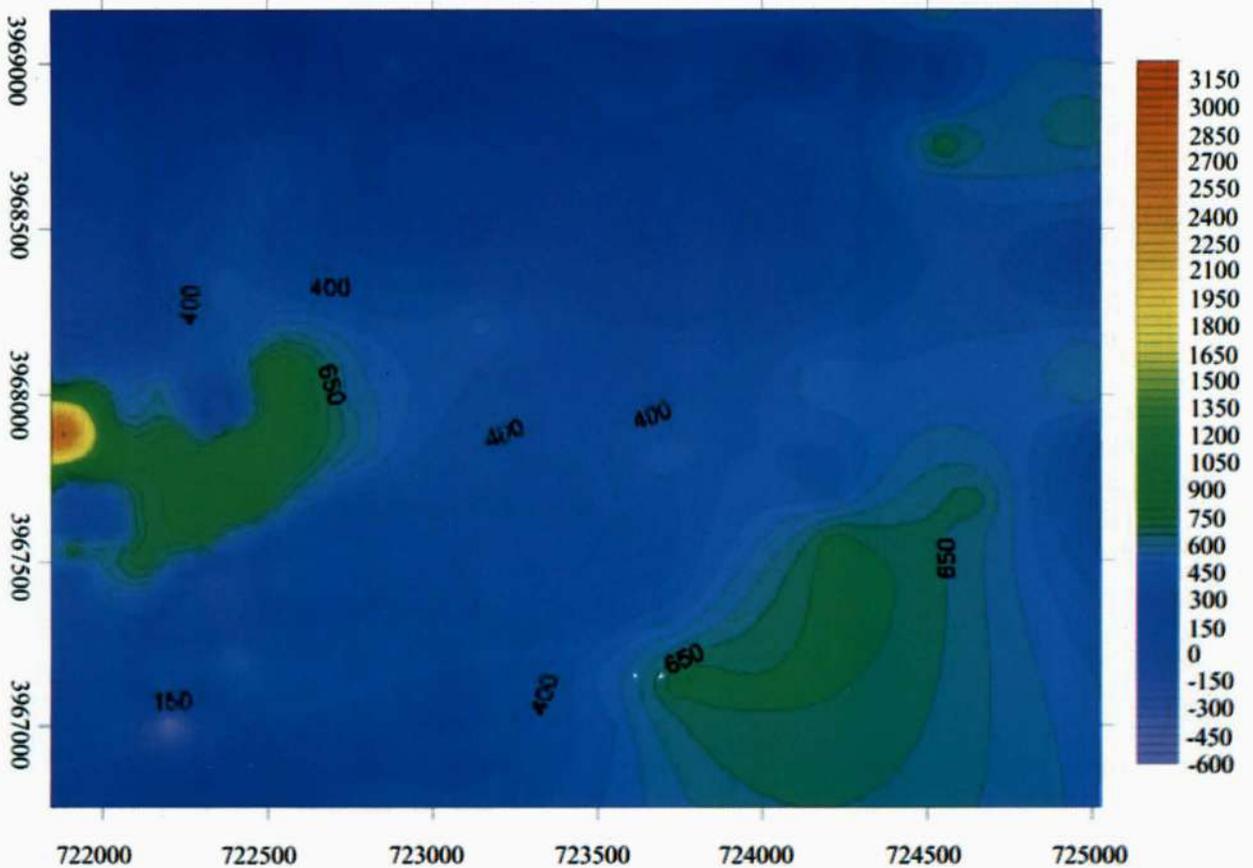


Fig.7 - Répartition spatiale des anomalies de susceptibilité magnétique.

Spatial distribution of the magnetic susceptibility anomalies..

que sur une profondeur d'un mètre, en deux points proches de la source de pollution.

L'analyse des graphiques de la susceptibilité magnétique en fonction de la profondeur, montre une diminution de la valeur de la susceptibilité magnétique. Cette diminution est un indicateur d'une réduction des substances polluantes dans le sol (fig.8).

De plus, les graphiques montrent une relation étroite de l'infiltration avec la lithologie. En effet, la couche d'argile ou argilo-limoneuse (situé entre 45 et 55 cm du niveau de sol) se comporte comme un écran à l'infiltration. Au contraire, la couche composée de conglomérats et de graviers, est un milieu très propice à l'infiltration

des ETMs. Nous pourrions donc avancer l'idée d'une relation simple entre infiltration de la matière polluante (caractérisée par sa susceptibilité magnétique) et la pédologie. En effet, l'abondance de la matière polluante, avec une granulométrie fine, du vecteur de transport (eaux et vents), ne pourraient favoriser que ce genre de réaction de contamination dans des sols ayant une telle pédologie.

VI. DISCUSSION.

Les résultats des analyses de susceptibilité magnétique ont montré que la distribution des éléments polluants (ETMs) dépend de la proximité des sources de pollution, de la nature des sols, et enfin des vecteurs de transport à savoir

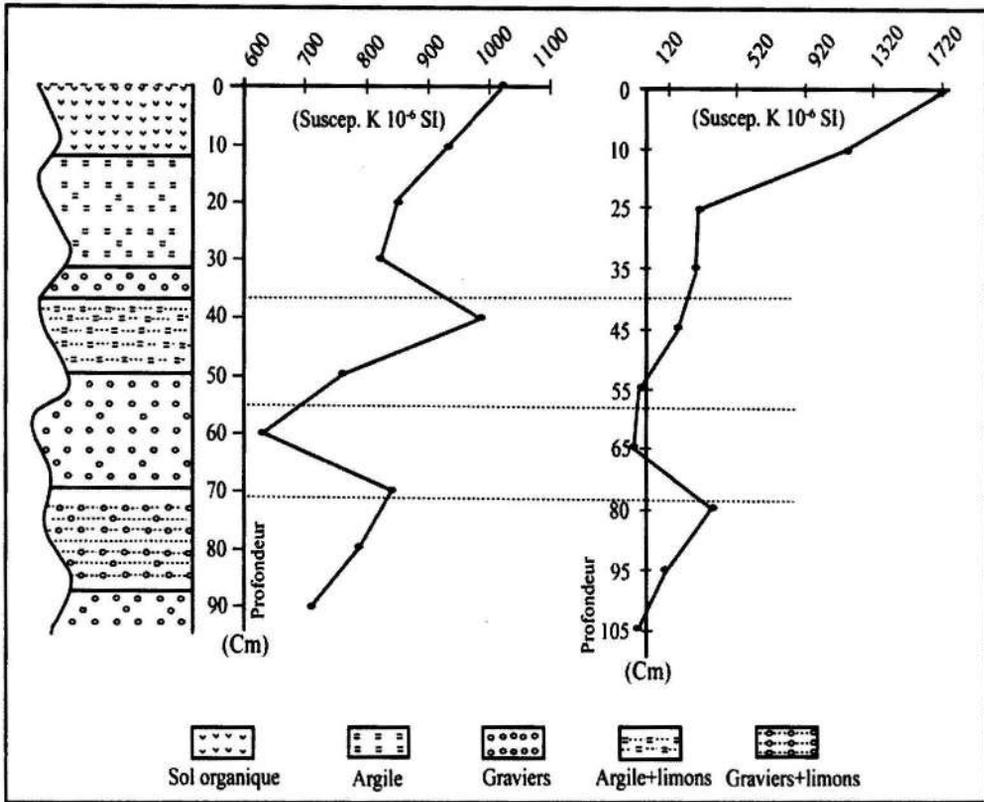


Fig.8 - Susceptibilité magnétique en fonction de la profondeur, selon deux profils verticaux, montrant sa relation avec la lithologie.

Magnetic susceptibility versus depth, along two vertical profiles, showing its relation with lithology.

l'eau et le vent. L'intensité du paramètre susceptibilité magnétique peut donc très bien refléter l'état de pollution.

Les résultats obtenus (avant et après filtration) pour les eaux résiduaires (eaux de l'oued Enza et eaux de la digue) et celles de la nappe barrémienne montrent des concentrations en Zn, Pb (partie soluble et insoluble) relativement importantes (Zn: 5.80 -15.20 mg/l; Pb: 0.3 - 0.85 mg/l; Zn: 2.40 - 8.82 mg/l et Pb: 0.12 - 0.50 mg/l, respectivement). La majorité des ETMs, à l'état insoluble, sont présents en quantité élevée et variable, dans leurs milieux respectifs, dépassant les normes prescrites pour l'irrigation et la consommation humaine. Les analyses montrent aussi que les concentrations en cuivre et cadmium

sont moins élevées mais dépassent largement les normes admises pour la consommation humaine. Ainsi, la contamination des sols avoisinants la mine et son infrastructure est favorisée par l'action de plusieurs facteurs. Il s'agit de l'action de ruissellement des eaux, du vent, de l'évapo-transpiration sur la digue de tailings et la laverie et enfin l'irrigation. En conséquence, cette dernière (irrigation) présente un certain danger.

Au contraire, les analyses des eaux de la nappe libre (mio-plio-quadernaire), montrent l'absence d'une contamination anthropique en ETMs. Les concentrations sont inférieures aux normes de potabilité et ne présentent aucun risque sur la santé humaine.

DIAGNOSTIQUE ET ÉVALUATION DE LA CHARGE POLLUANTE PAR LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES (ETMs) :
CAS DU COMPLEXE MINIER DE KHERZET YOUSSEF (SÉTIF).

La contamination de la nappe barrémienne, nappe plus profonde que la nappe libre (mio-plio-quadernaire) trouve son explication par l'infiltration rapide et intense des eaux à travers un réseau de fissures et de karsts. En effet, à la suite de l'accident d'effondrement de la mine, un réseau profond de fissures s'est développé où les ETMs peuvent migrer facilement dans les nappes souterraines et provoquer leur pollution. Au contraire le sol de notre région est de type limoneux à limono-argileux, ce qui nous laisse supposer que l'infiltration des eaux pluviales se fait difficilement à travers ces types de sols à la nappe libre. A cet effet, l'accumulation des ETMs se fait dans les horizons superficiels où vont être ruisselés par les eaux pluviales pendant les averses.

Les analyses obtenues pour les sols de la plaine d'Aïn Azel durant les deux périodes de prélèvement (humide et sèche) et particulièrement lors de la période sèche montrent une pollution très importante en éléments Zn, Pb et Cd à proximité de la laverie. Celle-ci diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne du complexe minier, tout en notant des augmentations irrégulières et ponctuelles dues à la nature et à la composition des terrains.

En outre, la comparaison des résultats qualitatifs avec les résultats quantitatifs permet de mettre en évidence une relation étroite entre les paramètres magnétiques et la quantification des éléments polluants comme le suggéraient de récentes études (Magiera et Strzyszc, 2004, Petrovsky et al., 2000, 2001; Desenfant et al. 2004, D'Emilio et al., 2007). En effet la distribution des concentrations des ETMs, le long d'un profil de direction NE dans les sols, est en bon accord avec la variation de la susceptibilité magnétique sur le même profil, et particulièrement pour le plomb et le zinc (fig. 6). De plus, la cartographie de la susceptibilité magnétique présente les mêmes traits de distribution de la pollution que les analyses chimiques. A partir de cette comparaison, il est donc possible de définir

un seuil de susceptibilité magnétique à partir duquel la pollution est anthropique. Il est estimé à $250 \cdot 10^{-6}$ SI.

Il découle ainsi de ces premières conclusions qu'il existe une relation directe entre la susceptibilité magnétique et la concentration des ETMs. Cette concentration dépend elle aussi de la nature du sol (lithologie), c'est à dire de son pouvoir à piéger les particules polluantes. Cette relation paramètre magnétique- concentration des polluants est donc utilisée pour l'étude des infiltrations des ETMs (fig. 8). En effet, les graphiques montrent que cette infiltration, reflétée par la susceptibilité magnétique, décroît en profondeur. Cette décroissance est très marquée en dessous de la couche d'argile, permettant de déduire le comportement écran des argiles en ne permettant pas la diffusion en profondeur des particules polluantes. Donc la nature du sol est un paramètre important pour le piégeage des particules polluantes. Il résulte donc que l'infiltration peut être décrite dans une première approche, par la susceptibilité magnétique avant d'être quantifiée. Le graphique de la figure 8 montre bien cette propriété. En outre, il montre clairement le rôle d'écran joué par les argiles, ce qui est en bon accord avec les conclusions des analyses chimiques.

VII. CONCLUSION.

L'objectif de cette étude étant de diagnostiquer l'état environnemental du site de la mine de Kherzet Youssef, dans un premier temps, de quantifier ses caractères dans un deuxième temps, et enfin de corréler les résultats des deux méthodes et d'en déduire la méthode appropriée afin de minimiser les coûts des investigations.

Les résultats des analyses chimiques des eaux et des sols, à l'exception des eaux de la nappe libre (mio-plio-quadernaire), ont bien montré l'ampleur de la pollution en ETMs dans la plaine d'Aïn Azel. En effet, les concentrations de ceux-là dépassent les normes prescrites pour une utilisation agricole ou publique.

D'autre part, l'utilisation du paramètre susceptibilité magnétique comme paramètre environnemental s'avère payant. Cette méthode, peu coûteuse, facile à mettre en œuvre, permet de diagnostiquer rapidement l'état de pollution en ETMs. Les résultats obtenus ont bien mis en évidence cette propriété, et plaident donc pour une généralisation de cette méthode dans les études environnementales, avant tout déploiement des méthodes coûteuses.

Remerciements : Ce travail a été réalisé dans le cadre de la réalisation de la thèse de magister de Melle Lynda Attouchek. Nous tenons à remercier Mr. Guerfi M., ex-cadre de l'ENOF et ex-cadre du ministère des mines, pour tous les moyens qu'il a mis à notre disposition tout au long de la réalisation de ce travail. Le département de géophysique du CRAAG trouve ici l'expression de notre reconnaissance pour son aide durant la campagne géophysique de terrain. Nous remercions aussi les deux Reviewers, Mr. Derder MEM et Mr. Kolli O. pour leur commentaires très utiles et très détaillés.

BIBLIOGRAPHIE.

- ANRH, 1992.** Plan de développement de la ferme témoin de Kherzet Youssef (Beethel et Sonatrach): *Rapport interne*.
- ATTOUCHEK, L. 2005.** Étude géochimique des rejets du complexe minier à Pb-Zn de Kherzet Youssef (Sétif) et son impact sur l'environnement. *Thèse de Magister, USTHB, Alger*, 100 p.
- BAIZE, D. 2000 a.** Guide des analyses pédologiques 2^{ème} revue et argumentée. *INRA, France*. 266p.
- BAIZE, D. 2000 b.** Teneurs totales en "métaux lourds" dans les sols français. Résultats généraux du programme. *ASPITET. Le courrier de l'environnement de l'INRA*.
- BAYOU, B., FEKKAR, D., KHENIEN, N., DERDER, M.E.M. ET BOUNIF, A. 2006.** La susceptibilité magnétique : Un facteur de diagnostic de la pollution en métaux lourds, exemple d'application. *Actes du 3^{ème} Colloque Maghrébin de Géophysique Appliquée, Oujda, Maroc*, p. 79-83.
- BOUTALEB, A. 2001.** Les minéralisations à Pb-Zn du domaine Sétifien-Hodna : Gîtologie, pétrographie des dolomies, micro thermométrie et implications métallogéniques. *Thèse de Doctorat d'Etat, USTHB*.
- DAVIDSON, J. P. AND MC. KEEGAN, K. D. 1995.** Geochemical analysis of small samples: Micro-analytical techniques for the nineties and beyond *Clive R. Neal. Rev. Geophys. Vol. 33 Suppl., © 1995 American Geophysical Union*.
- DESENFANT, F., PETROVSKÝ, E. AND ROCHETTE, P. 2004.** Magnetic signature of industrial pollution of stream sediments and correlation with heavy metals: case study from south France. *Water, Air, and Soil Pollution 152: 297-312*.
- D'EMILLO, M., CHIANEZ, D., COPPOLA, R., MACHIATO, M. AND RAGOSTA, M. 2007.** Magnetic susceptibility measurements as proxy method to monitor soil pollution : development of experimental protocols for field surveys. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 125, N° 1-3.
- EVANS, J. 1989.** Chemistry of metal retention by soils. *Environment Sciences and Technology*, Vol.23, n°9, pp.1047-1056.
- GLAÇON, J. 1956 ET 1967.** Recherche sur la géologie et les gîtes métallifères du tell Sétifien (Algérie). *Publ. Serv. Géol. Algérie, Nlle série, Bull n° 32, 751*.
- JUSTE, C. 1995.** Les micropolluants métalliques dans les boues résiduaires des stations d'épuration urbaines, *Convention ADEME-INRA, ADEME éd.*, 209 p.
- MAGIERA, T. AND STRZYSZCZ, Z. 2004.** Magnetic susceptibility as a new parameter in soil monitoring system, *Institute of Environmental Engineering, polish Academy of sciences*.
- MANNING THOMAS, J. AND GROW WILLIAM, R. 1997.** Inductively Coupled Plasma -Atomic Emission Spectrometry. *The Chemical Educator 4/vol.2, N°1, © Springer-Verlag, New York, INC*.

DIAGNOSTIQUE ET ÉVALUATION DE LA CHARGE POLLUANTE PAR LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES (ETMs) :
CAS DU COMPLEXE MINIER DE KHERZET YOUSSEF (SÉTIF).

- MEDKOUR, N. 1994.** Influence des eaux minières sur les sols et contamination par le plomb et le zinc dans la région d'Aïn Azel (wilaya de Sétif). *Thèse de Magister, INA, Algérie.*
- MICHAEL EVANS, E. AND FRIEDRICH HELLER, COPYRIGHT, 2003.** Elsevier science (USA). Environmental Magnetism, Principles and applications of Enviromagnetics. *Academic Press, An imprint of Elsevier Science.*
- PETROVSKY, E., KAPICKA, A., JORDANOVA, N., KNAB, M. AND HOFFMANN, V. 2000.** Low field magnetic susceptibility: a proxy method of estimating increased pollution of different environmental systems. *Environ. Geol.* 39, 312-318.
- PETROVSKY, E., KAPICKA, A., JORDANOVA AND BORUVKA, L. 2001.** Magnetic Properties of alluvial Soils contaminated with lead, zinc and cadmium. *J. appl. geophys*, vol. 48, n° 2 (29 ref.), pp. 127-136.
- RAMSEY MICHAEL, H. AND THOMPSON, M. 1987.** High-accuracy analysis by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry using the parameter-related internal standard method. *J. Anal. At. Spectrom.* 2, 497 – 502.
- SETLAOUI, M. 2000.** compte rendu de mission à la mine de Kherzet Youssef, recommandations et mesures à prendre. *Rapport interne.*
- SOMMELET, H. 1990.** Compte rendu de mission hydro-géologique N° 02 suite à l'inondation accidentelle survenue dans la mine le 02 Juin 1990. L. *Rapport Interne*
- ZACHARA, J. M. AND SMITH, S.C. 1994.** Edge complexation reactions of cadmium on specimen and soil-derived smectite. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 762-769.