

Impacts des métaux toxiques sur la végétation de la mine de Djebel Hallouf dans la région de Sidi Bouaouane à Bou Salem dans le Nord-Ouest de la Tunisie

Impacts of toxic metals on vegetation of the Djebel Hallouf mine in the area of Sidi Bouaouane in Bou Salem, Northwestern Tunisia

BEN GHNAYA¹⁻² A., HAMROUNI² L., MASTOURI^{Y2}., HANANA³ M. & CHARLES⁴ G.

Abstract: Metallic trace elements (ETMs) are hard pollutants that have a toxic impact on plants, consumption products and human health. These ETMs include especially heavy metals, such as Lead, Zinc and Mercury. Their contamination has several origins; one of these, being extremely important, is mining activities. The concept of "phytoremediation" covers a lot of the methods for the management of mining and industrial sites. One of these, is the use of green plants and their associated microbiota to slow down toxic environmental contaminants. The technique of "phytoextraction" concerns the use of plants able to concentrate the pollutants in their stems and leaves. However its effectiveness remains limited by the absorption capacity and the biomass of the plants. Our work is interested in the study of the variability of the Djebel Hallouf vegetation depending of the nature of the soil in Bou Salem mine. Within this framework of activity, we have applied the method of "Point quadrat" for sampling the vegetation of the site. Determination of Pb and Zn concentrations from the ground and from the most abundant plants of the area was determined. Analyses were made to estimate the ability of plants to accumulate ETMs. The study showed that the soil was highly contaminated, exceeding even the contamination threshold assessed globally. Also, analyses have shown that some plants can be used as metals accumulators with future prospects in that way.

Key words: Tunisia, Djebel Hallouf mine, ETMs, Pb,/ Zn toxicity, "Phytoremediation", "Phytoextraction"

Résumé : Les éléments-traces métalliques (ETMs), sont des polluants incisés qui ont un impact toxique sur les végétaux, les produits de consommation courante et sur la santé humaine. Parmi ces ETMs, on peut citer surtout le Plomb, le Zinc et le Mercure. Leur contamination a plusieurs origines dont, entre autres, l'activité minière est de première importance. Le concept de «phytoremédiation» recouvre l'ensemble des méthodes permettant la gestion de sites miniers et des sols industriels ou fortement anthropisés grâce à l'utilisation des plantes vertes et de leurs microbiotes associés, pour éliminer ou rendre moins toxiques les contaminants environnementaux. Cette technique peut faire l'objet de diverses stratégies dont la phytoextraction, qui exploite des plantes capables de concentrer les polluants dans leurs parties aériennes. Néanmoins son efficacité reste limitée par la capacité d'extraction et par la biomasse des plantes.

Dans ce travail, on s'est intéressé à l'étude de la diversité de la végétation de la mine de Djebel Hallouf à Bou Salem en fonction de la nature du sol. Dans ce cadre d'activité, on a appliqué la méthode du point quadrat pour l'échantillonnage de la végétation et on a effectué un dosage du Pb et du Zn du sol et dans les plantes les plus abondantes analysant ainsi leur capacité d'accumulation des ETMs. Cette étude a bien démontré que le sol était fortement contaminé, dépassant même le seuil de contamination évalué à l'échelle mondiale. Les analyses ont montré également qu'on peut qualifier les plantes étudiées comme étant des plantes accumulatrices, ce qui ouvre des perspectives d'application de la phytoremédiation.

Mots-clés: Tunisie, mine de Djebel Hallouf, ETMs, Toxicité, Point quadrat, Echantillonnage, Phytoremédiation.

¹Laboratoire de Microorganismes et Biomolécules Actives, Faculté des Sciences de Tunis. Campus Universitaire, 2092, Tunis, Tunisie. Correspondance : benghnaya_asma@yahoo.fr

²Laboratoire d'Ecologie Forestière, Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts. PB 10, 2080 Ariana, Tunisie.

³Laboratoire de Physiologie Moléculaire des Plantes, Centre de Biotechnologie de Borj-Cédria, BP 901, 2050 Hammam-Lif, Tunisie.

⁴Université de Bretagne Occidentale, Laboratoire d'Ecophysiologie et Biotechnologie des Halophytes et Algues Marines (LEBHAM), IUEM, Technopole Brest Iroise, Place Nicolas Copernic, 29280 Plouzané, France.

INTRODUCTION

Les principaux micropolluants impliqués dans les phénomènes de pollutions chimiques sont les éléments-traces métalliques (ETMs : cuivre, zinc, plomb, cadmium). Leurs cycles biogéochimiques, sont influencés à la fois par les phénomènes naturels et par les activités humaines. A l'inverse de la plupart des contaminants organiques, les ETMs sont des substances non biodégradables. L'estimation des émissions en ETMs et leur répartition dans les différents compartiments de l'environnement a fait l'objet de diverses études (GUILLET *et al.*, 1980 ; BLANCHARD, 2000, ALGAN *et al.*, 2004).

L'activité humaine a fortement perturbé le cycle biogéochimique global des ETMs. NRIAGU et PACYNA (1988) ont démontré que cette activité entraîne une forte pollution de l'air et des sols. Ce dernier, récepteur pour toutes les pollutions d'origine industrielle ou urbaine, fonctionne comme un système accumulateur vis-à-vis des ETMs (ROBERT, 1996). Donc la présence diffuse ou localisée de ces ETMs dans les sols représente un risque potentiel pour les écosystèmes et la santé humaine. C'est ainsi que les notions de pollution de la biosphère et d'extinction d'espèces végétales et animales sont devenues des préoccupations tout aussi importantes qu'urgentes, afin de trouver des solutions raisonnables et efficaces pour rétablir l'équilibre des écosystèmes détruits ou menacés de disparition. Parmi les pollutions impliquées dans le déséquilibre de l'environnement on distingue les pollutions liées à l'activité minière.

Toute exploitation minière implique inévitablement une altération physico-chimique du sol, une contamination des eaux de surface et des sédiments par les ETMs des résidus miniers ce qui rend ces derniers susceptibles d'agir comme des contaminants chimiques de la chaîne biologique. Les ETMs sont naturellement fixés dans les roches mais sont libérés par les activités humaines ; les rejets industriels et urbains polluent les sols, les eaux et l'atmosphère. La présence diffuse ou localisée des ETMs dans les sols représente un risque potentiel pour les écosystèmes et la santé humaine. Le traitement des sols pollués par les ETMs constitue un problème complexe et difficile à résoudre. Afin de préserver les personnes et l'environnement des nuisances et risques possibles, il devient nécessaire aujourd'hui de développer des technologies de dépollution du sol. Bien que les techniques physico-chimiques (confinement des sites pollués, mise en place de barrières réactives) soient nombreuses et variées, elles requièrent des équipements spéciaux et leur coût reste très élevé. De plus, ces techniques perturbent profondément l'activité biologique et la structure physique des sols traités. A côté de ces techniques physico-chimiques, on distingue les méthodes biologiques de biodégradation qui ont été développées par l'utilisation de microorganismes dégradant les polluants organiques. Pour les ETMs, une nouvelle technique a été proposée, s'appuyant sur l'utilisation des végétaux qui peuvent contribuer à stabiliser les sols pollués par extraction. Il s'agit d'utiliser des plantes hypertolérantes et hyperaccumulatrices susceptibles d'améliorer le substratum.

Ainsi, vers les années 80, des plantes habituellement utilisées dans la prospection minière et présentant la particularité de croître sur des milieux métallifères ont été proposées pour la réhabilitation de sols pollués. Cette nouvelle approche biologique appelée «phytoremédiation» est définie par CUNNINGHAM et BERT (1993) comme étant l'utilisation de plantes supérieures pour extraire, stabiliser ou dégrader des substances polluant l'environnement.

Le terme d'« hyperaccumulateur », utilisé pour la première fois par JAFFRE *et al.*, 1976 puis par BROOKS *et al.* (1977), correspond à un niveau extrême de tolérance des végétaux aux ETMs. Il désigne des végétaux supérieurs capables d'atteindre, dans leurs parties aériennes, des teneurs de 0,01 % de Cd, 0,1 % de Pb et de Cu ou encore 1% de Zn par rapport à la masse de matière sèche. Le principe de la « phytoextraction » se base sur l'utilisation de potentiel d'hyperaccumulation pour extraire les polluants du sol et les transférer vers les parties aériennes de plantes supérieures (KAMBHAMPATI *et al.*, 2003). La majorité des études réalisées se sont focalisées sur quelques espèces végétales: *Thlaspi caerulescens* (LASAT *et al.*, 1998; SHEN *et al.*, 1997; KÜPPER *et al.*, 1999), *Brassica napus* (BEN GHAYYA *et al.*, 2006, 2007, 2009) et d'autres espèces appartenant à la famille des Brassicacées. La caractérisation d'autres espèces végétales hyperaccumulatrices permettrait de multiplier et de compléter les modèles d'études des mécanismes d'hyperaccumulation.

Planche 1

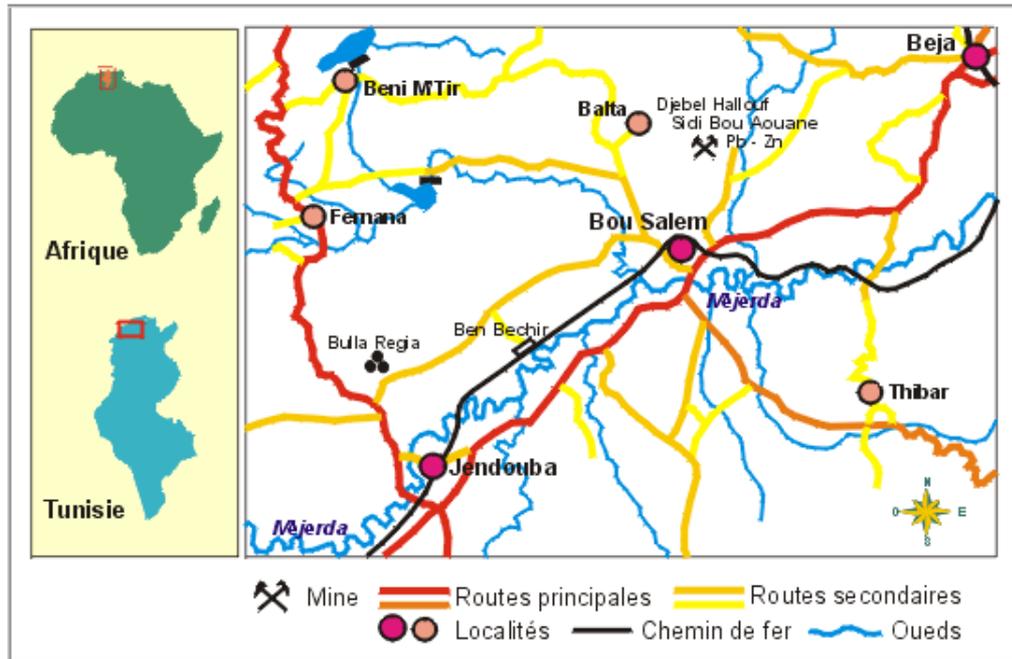


Figure 1: Carte de situation



Figure 2: Image satellitaire du site de Sidi Bou Aouane (Google Earth).
A: la mine - B: le déchet minier (terrain mort)



Figure 3: Les résidus miniers de la mine de Djebel Hallouf-Sidi Bou Aouane
(Photo: A. BEN GHNAYA)

Planche 2

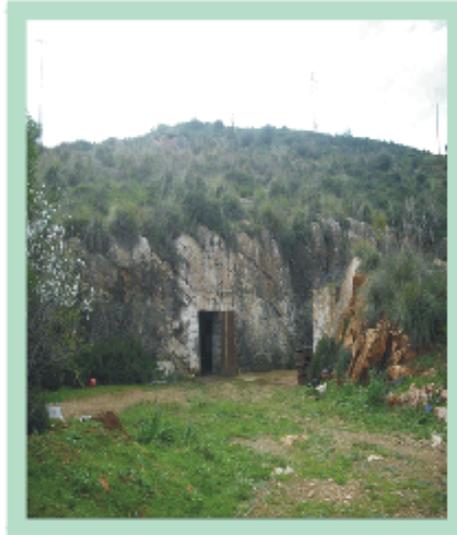


Figure 4 : Entrée de la mine de Djebel Hallouf



Figure 5 : Relevés botaniques selon des transects (tr) situés sur le djebel de la mine
 A : deux transects (tr.1 et tr.2) placés perpendiculairement
 B : un troisième transect de 20 m (tr.3)
 Plantes dominantes : Calicotome (buissons à fleurs jaunes) et Carex



Figure 6 : Principales espèces identifiées sur le site minier de Djebel Hallouf
 1. *Anagallis arvensis* (Primulaceae) - 2. *Crataegus azarolus* (Rosaceae) - 3. *Thymus algeriensis* (Lamiaceae)
 4. *Olea europea* (Oleaceae) - 5. *Ruta chalepensis* (Rutaceae).

Dans cette optique, les objectifs du présent travail visent en premier lieu à étudier les impacts des ETMs sur la végétation de la mine de Djebel Hallouf dans la région de Sidi Bouaouane à Bou Salem, puis d'évaluer les potentialités de nouvelles plantes susceptibles d'extraire les ETMs dans ce site, tout en suivant la variation de la végétation en fonction de la nature du sol et de son degré de contamination par les métaux toxiques.

SITE D'ETUDE

Présentation de la mine

Géographiquement

La mine de Djebel Hallouf-Sidi Bouaouane est située au nord de la Tunisie, dans la partie amont du bassin versant de la Medjerda (Fig.1). Cette mine qui était exploitée essentiellement pour le Plomb et le Zinc, représente un complexe de minéralisation formé par des gîtes distants de 1Km l'un de l'autre. Elle est localisée dans la partie méridionale de la zone géologique dite « des nappes » (OULD BAGGA *et al*, 2006).

Dans cette région, le relief est très peu accentué avec une altitude moyenne de l'ordre de 300 m. Le réseau hydrographique est très dense, représenté par de nombreux petits oueds se trouvant à sec en dehors des saisons pluvieuses et dont un grand nombre se déverse dans l'oued Kassab.

Le cadre du gisement du Jebel Hallouf est le domaine externe de la chaîne nord-africaine. Les cavités qui se sont développées à partir de fractures ont été en partie colmatées par des dépôts chimiques ou par des produits de leur remaniement. La source des métaux lourds participant au remplissage des cavités doit être recherchée dans l'altération superficielle de minéralisation plombo-zincifères liées aux strates d'âge Miocène.

Historiquement

La mine de Djebel Hallouf (Fig. 2-4) est abandonnée depuis 1986. Cette mine se caractérisait par la présence des produits métalliques (Plomb et Zinc essentiellement), ainsi que d'autres minéraux mineurs comme : l'Anglésite, la Galène, la Pyrite, la Sphalérite.

Les déchets miniers

Pour la plupart des projets miniers, la quantité de morts terrains (déchets d'exploitation) générée par l'activité minière est énorme. Bien que les minerais métalliques contiennent des niveaux élevés de métaux, ils produisent aussi de grandes quantités de résidus.

La méthode adaptée dans l'exploitation minière est le concassage (ou broyage) du minerai suivi de la séparation de quantités relativement faibles de métaux du matériau non métallique au cours d'un processus de traitement dénommé «Enrichissement». Ce dernier inclut des techniques diverses de séparation physique ou chimique (magnétique, électrolytique, flottation, extraction par solvant, précipitation) Le broyage, une des étapes les plus coûteuses de l'enrichissement, a comme résultat la production de très fines particules qui facilitent une meilleure extraction du métal mais dégage aussi des éléments toxiques (notamment le Pb) qui se retrouvent dans les gros volumes de résidus accumulés à proximité des lieux d'extraction (Fig. 3).

Impacts environnementaux

Les impacts des résidus miniers peuvent persister pendant des décennies voire même des siècles. La décharge à l'air libre des résidus peut générer les pires conséquences environnementales par la libération de matières toxiques provenant de puits à ciel ouvert abandonnés et des bassins de décantation des installations minières.

Les substances dangereuses résultant de déchets libérées dans l'eau, l'air et le sol peuvent avoir des répercussions graves sur la santé publique. Elles peuvent entraîner l'apparition de maladies spécifiques et même contribuer à une augmentation de la mortalité. Elles présentent un risque substantiel pour la santé humaine et l'environnement si elles sont improprement stockées et traitées.

Toute exploitation minière implique inévitablement une altération de l'environnement naturel. Le contenu en matières toxiques rend les résidus susceptibles d'agir comme contaminants chimiques des sols, des eaux de surface ou des nappes phréatiques et la biodiversité est menacée dans son ensemble. La dégradation de la flore des sites miniers provoque une rupture de la chaîne alimentaire, entraînant une raréfaction de la faune dans un milieu altéré difficile à restaurer.

MATERIEL ET METHODES

Matériel

La zone d'étude concerne un site minier de la région de Sidi Bou Aouane à Bou Salem dans le gouvernorat du Jendouba. Des échantillons de sol (mine et déchets miniers) et de plantes ont été prélevés par l'utilisation d'une technique spécifique appelée le «Point quadrat». Un herbier rassemblant une collection des plantes de la région a été réalisé ; ensuite on a effectué un dosage de métaux (Zn et Pb) présents dans le sol et dans les plantes les plus abondantes du secteur.

Méthodes

Technique d'échantillonnage

Le Point quadrat, est une méthode d'échantillonnage introduite par LEVY et MADDEN en 1933 (Fig.5, a.b.) ; cette méthode consiste à quantifier la composition floristique d'un parcours en mesurant la fréquence des espèces recensées et en exprimant ces fréquences en terme de recouvrement. Cette méthode écologique peut être utilisée pour cartographier la distribution de l'endroit où les plantes se trouvent. Selon cette procédure, des transects sont installés selon un gradient longitudinal et l'abondance de la végétation. Un transect se compose de deux piquets en fer enfoncés dans le sol à chaque extrémité. Le long de cette bande, la végétation est repérée à l'aide de tiges en fer situées tous les 20cm. La méthode se base sur la loi du hasard, car seules les plantes effectivement touchées par les tiges sont relevées et collectionnées.

Au cours des sorties réalisées à la mine de Djebel Hallouf, des échantillons de sol ont été prélevés dans cinq directions: le nord, le sud, l'est, l'ouest ainsi qu'au sommet de la mine. Chaque échantillon de sol a été prélevé à trois niveaux de profondeur (0 cm, 20 cm et 40 cm) à l'aide d'une tarière manuelle. Des échantillons d'espèces de plantes, les plus abondantes du secteur ont été également prélevés. Une analyse quantitative des métaux lourds présents (Pb et Zn) dans l'ensemble de l'échantillonnage (sol et plantes) a été ensuite réalisée. Pour les déchets miniers, des échantillons de sol ainsi que de l'eau stagnante ont été prélevés afin d'appliquer les mêmes analyses que pour les échantillons précédents.

Herbier

Au cours de ce travail, un herbier a été réalisé, comportant une collection de plantes repérées dans le site minier. Ces plantes, une fois identifiées, constituent un matériel indispensable à la typification du milieu (MORAT *et al.*, 2004).

Techniques d'analyse

Dosage des métaux par spectrophotomètre d'absorption atomique

Les plantes ont été récoltées puis subdivisées en Partie Aérienne (PA) et Partie Racinaire (PR). Ces différentes parties sont par la suite rincées avec de l'eau distillée. Une fraction de ces plantes est séchée à l'étuve à 80°C pendant 72h pour doser les ETMs (Pb et Zn). Par la suite, ces échantillons ont été finement broyés à l'aide d'un broyeur à billes de type « Danguomeau » et 200 mg de chaque

échantillon sont pesés dans des pots de téflon où sont ajoutés 4 ml d'acide nitrique, 2 ml d'acide fluorhydrique et 2 ml d'eau oxygénée. Les pots sont placés dans un bloc chauffant Stuart à environ 100°C. Les échantillons sont évaporés à sec sous une hotte aspirante. Le minéralisat est ensuite dilué par de l'eau déminéralisée jusqu'à un volume final de 30 ml. Le dosage est effectué par un spectromètre d'absorption atomique à four graphite SIMAA 6100 de marque Perkin Elmer en utilisant le programme électrothermique recommandé par le constructeur.

Des échantillons du sol ont été prélevés également et préparés de la même manière que les échantillons de plantes pour le dosage des ETMs. L'absorption atomique a été effectuée à 217 pour le Pb et à 213,9 pour le Zn.

Calculs

Après le dosage du Pb et du Zn dans les échantillons de sol, de plantes (PA et PR) et de l'eau, une formule a été utilisée pour permettre l'obtention des résultats en mg/kg de matière sèche ou en ppm, afin de les comparer aux valeurs de références prescrites par la norme AFNOR (1985), déterminant ainsi le degré de contamination des échantillons. Cette norme mentionne que les valeurs seuil sont de 100 ppm pour le Pb et de 300 ppm pour le Zn. La formule appliquée est la suivante :

$$R \times \text{Facteur de dilution} \times 50/\text{Poids} = R'$$

R : résultat de la lecture par spectromètre d'absorption atomique, en mg/L.

Facteur de dilution : il est de 100 pour le Pb, et de 10 pour le Zn.

Poids : poids de l'échantillon exprimé en g.

R' : résultat final exprimé en ppm (= mg/kg de matière sèche).

RESULTATS ET DISCUSSION

Identification des espèces

Les espèces recueillies au cours de nos prospections du terrain dans la région du Djebel Hallouf ont été identifiées. Cette identification a montré que certaines espèces récoltées sont connues pour leurs qualités phytosanitaires, ainsi que pour leurs vertus médicinales et thérapeutiques très intéressantes en vertu des activités pharmacologiques des composés phytochimiques qu'elles contiennent (tanins, alcaloïdes...). Seules ces plantes sont représentées à la figure 6.

La méthode du point quadrat nous a également aidés à avoir une idée sur la dispersion des espèces selon les orientations choisies. Par exemple, *Eryngium sp* atteint 24% de représentativité au nord de la mine alors qu'il est moins abondant au sud et à l'ouest. En revanche, *Asphodelus microcarpa* est plus abondante au nord à raison de 72% et moins abondante à l'ouest (3%). En outre, *Teucrium polium*, *Crataegus azarolus*, *Thymus algeriensis*, *Reseda alba* et *Ruta chalepensis* n'ont pas été rencontrées au sud, alors que cet ensemble domine à l'ouest. Au sud de la mine on rencontre principalement *Plantago albicans* (58%) et *Jasminum fruticosum* (50%). Le sommet, du fait de sa nature rocheuse, n'est pas caractérisé par une importante végétation, nous y avons trouvé des basses fréquences en *Anagallis arvensis* et *Teucrium polium*.

Cette diversification de la végétation de la mine pourrait être due à la nature du sol qui connaîtrait des degrés de contamination variables selon les orientations.

Analyses des échantillons des sols, de l'eau stagnante et des végétaux

Sol du déchet minier et de l'eau stagnante

Les valeurs obtenues pour le sol du déchet minier marquent un degré de contamination très important en Pb et en Zn dépassant même les normes admises (Tableau 1). De même, les échantillons de l'eau stagnante ont montré que cette dernière est contaminée par les ETMs en question. En effet, la teneur en Pb dépasse fortement les seuils prescrits (100ppm), et on note également la présence de Zn mais avec une valeur dépassant légèrement la valeur seuil qui est égale à 300ppm. En ayant recours à

ces résultats, il est évident que le contenu en éléments toxiques rend le résidu susceptible d’agir comme source de contamination chimique de la chaîne biologique.

Tableau 1 : Teneurs de Zn et de Pb présents dans le sol des résidus minier et dans l’eau stagnante exprimées en ppm.

	Zn en ppm	Pb en ppm	Normes internationales	
			(Zn en ppm)	(Pb en ppm)
Sol des résidus miniers	6240	3.000.000	300	100
Eau stagnante	347	1230	300	100

Sol de la mine

Les résultats obtenus montrent que le sol est contaminé par le Zn et le Pb (Tableau 2). En effet, les valeurs de la teneur en métaux lourds dépassent fortement les seuils admis par la norme AFNOR (100ppm pour le Pb et 300ppm pour le Zn). Le Pb marque des teneurs très élevées dans le sol des cinq directions. Par contre le Zn, en comparaison avec le Pb, est moins abondant dans le sol de la mine, mais ses teneurs ne sont pas négligeables du fait qu’elles dépassent en importance le seuil de contamination prescrit. On constate cependant que plus la profondeur du sol augmente, plus la teneur en Zn diminue. Ainsi, les valeurs obtenues à 0 cm sont plus importantes que celles obtenues à 20 et à 40cm.

Ces résultats révèlent que le sol de la mine de Djebel Hallouf est fortement pollué et que la contamination est généralement plus significative en surface. Cela peut entraîner des répercussions néfastes sur la végétation, surtout en ce qui concerne des plantes particulièrement utiles qui peuvent être consommées telles que l’*Anagallis arvensis* et l’*Olea europaea*. Dans ce cas, ces ETMs présents dans le sol peuvent passer dans la chaîne alimentaire et menacer à court et à long terme la santé des êtres vivants.

Tableau 2 : Variation de la teneur en Zn et en Pb en ppm dans les différents horizons du sol, en fonction de l’orientation

Horizons	Orientation de l’échantillon du sol prélevé									
	Nord		Sud		Est		Ouest		Sommet	
	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb
Métaux										
Profondeurs										
0cm	658	3465	1521	20508	863	32208	1027	23870	8610	15606
20cm	601	4476	1071	13861	2018	29376	901	11875	7598	10730
40cm	529	3198	1245	11947	643	32458	710	3405	-	-

Espèces végétales présentes près du site minier

Des analyses ont été effectuées sur les parties racinaires (PR) et les parties aériennes (PA) de l’échantillonnage des espèces récoltées auprès du site minier. Les échantillons ont été prélevés au mois de Mars et au mois de Mai 2012. En premier lieu, les résultats montrent que les échantillons du mois de Mars accumulent plus de Pb et de Zn dans leurs PA que ceux du mois de Mai (Tableau 3). Cela pourrait être expliqué par le fait qu’au mois de Mars les pluies sont plus abondantes que celles du mois de Mai, ce qui facilite l’infiltration de ces métaux dans les sols et par la suite l’absorption de l’eau contaminée par les plantes. En deuxième lieu, nous avons remarqué qu’en Mars, les échantillons accumulent dans leurs PA des teneurs élevées en Pb qui dépasse le seuil (100 ppm) en comparaison avec leurs PR (Tableau 3). Ces résultats ont montré que les plantes accumulent plus de Pb que de Zn quel que soit le climat environnant. En outre, en se référant aux teneurs du Pb et du Zn obtenues dans

les échantillons du sol du site minier, on remarque que ces derniers sont encore globalement plus importants que ceux contenus dans les parties racinaires et aériennes des plantes.

Tableau 3: Variation de la teneur en Zn et en Pb chez les espèces végétales collectées près du site minier.

	Mars		Mai	
	Zn (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Pb (ppm)
PA	1441	42268	161	306
PR	203	12080	1113	1627

Espèces dominantes sur le site

Espèce 1 : *Calicotome villosa* (Fabacées)

Le dosage des ETMs étudiés chez cette espèce a montré qu'elle accumule plus de Pb et de Zn en Mars qu'en Mai (Tableau 4). Ce dernier n'est pas caractérisé par une importante pluviométrie ce qui ne facilite pas l'infiltration du Pb et de Zn dans le sol, d'où une absorption réduite de ces métaux par la plante. Par ailleurs, en Mars, cette plante a pu dépasser le seuil d'accumulation en Pb (Tableau 4) qui est supérieur à 100 ppm ; de ce fait elle peut être décrite comme étant une plante accumulatrice de Pb. De plus, étant donné que *Calicotome villosa* est parmi les espèces les plus abondantes de la mine, elle est présente dans toutes les directions ce qui peut permet de comparer ses teneurs en ETMs avec celles dans les différents échantillons du sol. Ces derniers contiennent toutefois toujours plus de Zn et de Pb que la plante considérée.

Tableau 4 : Variation de la teneur en Zn et Pb chez *Calicotome villosa*

	Mars		Mai	
	Zn (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Pb (ppm)
Partie aérienne	700	1470	88	297
Partie racinaire	47,8	705	1065	436

Espèce 2 : *Carex pendula* (Cyperacées)

Pour *Carex pendula*, on a constaté qu'il accumule plus de Pb et de Zn dans ses PA que dans ses PR au mois de Mars (Tableau 5). Cependant, cette espèce ne peut pas être qualifiée de plante hyperaccumulatrice puisque la teneur en ETMs dans ses parties aériennes ne dépasse pas 1000 ppm. Toutefois, sur base des analyses, on peut lui reconnaître certaines capacités accumulatrices ; surtout pour le plomb.

Tableau 5 : Variation de la teneur en Zn et en Pb chez *Carex pendula*

	Mars		Mai	
	Zn (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Pb (ppm)
PA	8,55	745	24	467
PR	5,65	130	106	1700

CONCLUSIONS

L'étude de la végétation de la mine de Djebel Hallouf dans la région de Sidi Bouaouane à Bou Salem dans le nord-ouest de la Tunisie, a montré une certaine diversité d'espèces végétales dans le site étudié. Les résultats ont montré que les espèces recensées sont, pour une part, connues pour leur qualité phytosanitaire et pour leurs vertus médicinales et thérapeutiques. D'où une nécessité de mettre en place une méthode bien adaptée pour la protection de ces espèces, la valorisation et l'exploitation de leurs qualités surtout pour la préservation de l'environnement. Pour le dosage des ETMs, le sol de la mine est fortement contaminé par le Pb et le Zn dépassant même le seuil admis à l'échelle internationale. Les plantes analysées ont montré une variabilité d'accumulation des ETMs dans leurs PA, surtout pour le Pb ; l'accumulation est plus importante au mois de mars caractérisé par une pluviométrie importante. Certaines espèces accumulent plus de ETMs dans leurs PA plus que leurs PR, dépassant le seuil de 100 ppm. Ainsi ces plantes peuvent être considérées comme accumulatrices des ETMs et utilisées pour la phytoextraction.

Ce travail de recherche ayant pour objectif la durabilité de la protection et de l'amélioration du site minier de Djebel Hallouf, a montré la présence d'une variété de plantes accumulatrices des ETMs, en particulier de *Calicotome villosa* et dans une moindre mesure de *Carex pendula*, les plus fréquentes sur l'ensemble du site. Ces plantes identifiées comme tolérantes à la présence de fortes teneurs de Pb et de Zn peuvent faire l'objet d'une étude plus approfondie, en particulier pour opérer une sélection en vue d'améliorer le mode d'accumulation.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR, 1985. Norme NFU 44041 Matières fertilisantes. Boues des ouvrages de traitement des eaux usées urbaines.
- ALGAN, O., BALKIS, N., NAMIKCAGATAY, M. & SARI, E., 2004. The source of metal content in the shelf sediments from the Marmara sea, Turkey. *Environmental Geology*. 94: 932-950.
- BAKER, A. J. M. & BROOKS R. R., 1989. Terrestrial higher plants which hyper accumulate metallic elements- a review of their distribution. *J. Ecol. Phytochemistry. Biorecovery*. 1: 81-86.
- BEN GHNAYA, A., CHARLES G., BEN HAMIDA, J. & BRANCHARD, M., 2006. Phytoremediation: *in vitro* selection of rapeseed tolerant of toxic metals. *International Journal of Tropical Geology, Geography and Ecology*. 30, 2: 69-86.
- BEN GHNAYA, A., CHARLES G., HOURMANT A., BEN HAMIDA J. & BRANCHARD, M., 2007. Morphological and physiological characteristics of rapeseed plants regenerated *in vitro* from thin cell layers in the presence of zinc. *Plant biology and pathology. Comptes Rendus Biologie*. 330: 728-734.
- BEN GHNAYA, A., CHARLES G., HOURMANT A., BEN HAMIDA J. & BRANCHARD, M., 2009. Physiological behaviour of four rapeseed cultivar (*Brassica napus* L.) submitted to metal stress. *Physiology. Comptes Rendus Biologie*. 332, (4): 363-370.
- BLANCHARD, C., 2000. Caractérisation de la mobilisation potentielle des polluants inorganiques dans les sols pollués. Th. Doct. Institut National des Sciences appliqués de Lyon. p241.
- BROOKS, R. R., REEVES, R. D. & JAFFRÉ, T. 1977. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants, *Journal of Geochemical Exploration*, 7 : 49-57.
- CUNNINGHAM, S. D. & BERTI, W. R., 1993. Remediation of contaminated soils with green plants : An overview. *In vitro cellular and Development Biology* : 207-212.
- GUILLET, B., JEANROY, E., ROUILLER, J. & SOUCHEIR, B., 1980. Le cycle biogéochimique et la dynamique du comportement des éléments-traces (Cu, Pb, Zn, Ni, Co et Cr) dans les pédogenèses organiques acides. Note technique et scientifique du C.P.B. Nancy n°27. p55.
- JAFFRE, T., BROOKS, R. R., LEE, J., & REEVES, R. D., 1976. *Sebertia acuminata* : a hyperaccumulator of Nickel from New Caledonia. *Science*, 193: 579-580.
- KAMBHAMPATI, M. S., BEGONIA, G. B., BEGONIA, M. F. T., & BUFFORD, Y., 2003. Phytoremediation of a lead-contaminated soil using Morning Glory (*Ipomoea lacunosa* L.): effects of a synthetic chelate, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 71, (2): 379-386.
- KÜPPER, H., ZHAO, F. J. & MCGRATH S.P., 1999. Cellular compartmentation of zinc in leaves of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*, *Plant Physiology*, 119: 305-311.
- LASAT, M. M., BAKER, A. J. M. & KOCHIAN, L.V., 1996. Physiological characterization of root Zn²⁺ absorption and translocation to shoots in Zn hyperaccumulator and non accumulator species *Thlaspi*, *Plant Physiology*, 112 : 1715-1722.
- LEVY, E.B., & MADDEN E.A., 1933. The point method of pasture analysis. *New Zealand Journal of Agronomy*. 46: 267-279.

- MORAT P., AYMONIN G., G., & JOLINON J.C. 2004. L'Herbier du monde. Cinq siècles d'aventures et de passions botaniques au Muséum national d'Histoire naturelle, Muséum national d'histoire naturelle de Paris et Les Arènes/L'iconoclaste (Paris). P. 240.
- NIRAGU, J. O & PACYNA, J. M., 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air and soils with traces elements. *Nature*, 333: 134-139.
- OULD BAGGA, M., SAADI, A. & MERCIER, E. 2006. T.177, N°3 (FRA) *Bull. Soc. Géol. Fr.* : La zone des nappes de Tunisie
- ROBERT, M., 1996. Le sol: interface de l'Environnement ressource pour le développement. Edition Masson, 244 pp.
- SHEN, Z. G., ZHAO, F. J. & MCGRATH, S. P., 1997. Uptake and transport of zinc in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and the non hyperaccumulator *Thlaspi ochroleucum*. *Plant Cell and Environment*, 20 : 898-906.

