

# ÉTUDE DE LA BIODISPONIBILITÉ DES MÉTAUX LOURDS DANS DES SOLS AGRICOLES IRRIGUÉS PAR DES EAUX POLLUÉES

El Ass K.\*, Laachach A.\*, Azzi M.\*\*

\* Laboratoire d'analyse physico-chimiques - Ecole nationale de l'industrie minérale (ENIM) Rabat - Maroc

\*\* Laboratoire d'électrochimie et chimie de l'environnement. - Faculté des Sciences Aïn Chock Casablanca - Maroc

La teneur en métaux lourds dans les sols pollués est une donnée relativement accessoire si ce n'est pour déterminer le danger global (concentration maximale mobilisable). L'important est de déterminer la fraction biodisponible, c'est-à-dire la partie accessible au végétal. La biodisponibilité du cuivre, zinc, plomb, nickel et chrome dans des sols agricoles irrigués par des eaux polluées, rejets urbains et industriels de la ville de Fès (Maroc), a été évaluée au travers de deux approches : (i) en mesurant l'extractibilité des éléments métalliques étudiés par des extractions chimiques simples (EDTA) et séquentielles (protocole BCR) et (ii) en analysant les teneurs en ces éléments et/ou quantités de ces éléments bio-accumulés dans quelques plantes.

La subdivision définissant les éléments dans les différentes fractions du sol a montré que tous les éléments étudiés présentent une grande affinité envers la fraction organique. La fraction acido-soluble est dominée par le nickel et le plomb. L'extractibilité à l'EDTA nous a permis de mettre en évidence la fraction potentiellement biodisponible. En effet, le plomb, le cuivre et le zinc sont extraits à ~ 30% ce qui représente des teneurs importantes. Le chrome semble nécessiter des conditions plus agressives pour qu'il présente un risque de contamination. L'analyse de quelques plantes cultivées sur ce sol nous a permis de confirmer en partie les résultats obtenus. En effet, le Cu et le Zn sont les plus mobilisés par les plantes alors que le Pb, Cr et Ni ne dépassent pas les 3 % de leur teneur totale dans le sol. Ces mobilisations restent d'une manière générale faibles mais une certaine vigilance sanitaire vis à vis de la présence de ces éléments dans les sols, notamment pour la prise en considération des risques en développement est nécessaire.

The sequential extraction procedure proposed by the Standard, Measurements and Testing program "SM&T" of the European Union has been applied to evaluate the amounts of Cr, Cu, Ni, Pb and Zn, extracted at each stage of the procedure and indirectly their mobility and bioavailability in agricultural soils

irrigated by a polluted water.

Analysis of the extracts was carried out by flame atomic absorption spectrometry (FAAS). No significant matrix interferences were found except for Cr in the acetic acid and hydroxylammonium chloride extracts, which required determination by the standard additions method.

The results obtained by sequential extraction showed that all the studied elements present a great affinity towards the organic fraction whereas the acido-soluble fraction was dominated by nickel and lead. The extractability with the EDTA showed that lead, copper and zinc are potentially bioavailable ( $\approx 30\%$ ). Chromium seems to require more aggressive conditions to presents a risk of contamination. The results of the analysis of some crop plants on this soil confirm partly the results obtained. Indeed, Cu and Zn are mobilised by the plants whereas Pb, Cr and Ni do not exceed 3 % of their total content in the soil.

## INTRODUCTION

Le bassin de Sebou est l'un des pôles socio-économiques les plus importants du Maroc. En effet, d'importantes activités y sont développées dans les secteurs urbains, agricoles et industriels. La rivière de Sebou, assure entre autres usages de l'eau, l'alimentation en eau potable de certains centres urbains riverains, l'irrigation et la production d'énergie hydroélectrique. Cependant, le réseau hydrographique est sujet à d'importants risques de pollution qui menacent la qualité des eaux en compromettant ainsi ses divers usages.

La rivière de Fès, affluent de Sebou, évacue les résidus liquides, domestiques et industriels (tannerie, traitement de surface, papeterie, ...), et une partie des résidus solides de l'agglomération de Fès. L'utilisation de ces eaux à des fins agricoles entraîne des nuisances pour l'environnement que ce soit par la contamination des eaux souterraines ou bien par une inhibition de la croissance

des végétaux ou encore par transfert dans les plantes cultivées (contamination de la chaîne alimentaire).

La teneur totale des métaux dans le sol ne fournit qu'une information partielle sur les interactions possibles avec les différents constituants du sol. De fait, la détermination de la spéciation des éléments étudiés est nécessaire afin de prédire leur distribution, leur mobilité et donc leur disponibilité biologique. La spéciation d'un élément peut être estimée au moyen des procédures d'extraction. Cette approche suit l'idée selon laquelle les éléments se trouvent dans plusieurs compartiments avec des propriétés différentes qui peuvent être atteints par des réactifs chimiques de réactivités différentes. À cet égard, deux groupes d'extraction doivent être considérés : les extractions simples et les extractions séquentielles.

Les extractions séquentielles sont utilisées pour déterminer la partition géochimique des métaux dans les différents compartiments du sol, elles permettent de quantifier les fractions de métaux liées considérées comme échangeables, carbonatées, liées à la matière organique ou à d'autres fractions constitutives de la matrice du sol (silice, alumine,...).

Un grand nombre de procédures d'extraction séquentielles sont développées [1, 2]. Comme partie d'une tentative récente d'harmoniser une méthodologie pour les essais d'extraction partout dans la Communauté européenne, le BCR (Bureau commun de référence ou Standards, Measurement and Testing Programme) a développé un protocole d'extraction en trois étapes dans lequel les métaux sont subdivisés dans la fraction acido-soluble/échangeable, réductible et oxydable (tableau 1)[3]. La méthode a montré une bonne reproductibilité et un bon recouvrement par rapport à la dissolution totale[4, 5, 6].

Les procédures d'extractions simples (en une seule étape) sont aujourd'hui largement employées dans la science du sol en raison de leur facilité de mise en œuvre. Rauret [7] a présenté dans son étude les extraçants chimiques les plus utilisées et les différentes méthodes proposées pour la certification ou certifiées dans quelques pays européens. On trouve que ces procédures mettent en œuvre une gamme étendue d'extraçants, depuis les acides forts jusqu'aux solutions salines

neutres non tamponnées. D'autres solutions sont également utilisées pour leur capacité à former des complexes hydrosolubles très stables avec de nombreux cations : solutions salines tamponnées, agents complexants (EDTA, DTPA).

Ure[8] considère l'EDTA (éthylène diamine tétraacétique) comme un réactif capable d'extraire les métaux présents dans les phases non liées à la silice, y compris les métaux complexés de manière organique, et susceptible de refléter la disponibilité du métal à la fois à court terme et à relativement long terme. Gupta [9] préconise une extraction par un mélange d'acétate d'ammonium et d'EDTA acidifié ou par une solution d'EDTA à pH 7 pour prédire la fraction métallique active dans le sol.

L'extraction à l'EDTA à pH 7 qui fait partie de la procédure de référence en analyse des sols pour la détermination de la fraction mobilisable[10], a été choisie dans cette étude.

L'objectif de cette étude est de déterminer la répartition et la quantification des différentes formes chimiques de quelques métaux dans un sol pollué afin de prédire leur biodisponibilité et les risques de toxicité. Cette partie de ce travail comprend une évaluation de la pollution métallique des sols irrigués par les eaux de Oued Fès, une étude de spéciation chimique (extractions simple et séquentielle) pour mettre en évidence le rôle joué par les divers constituants des sols dans la rétention et le relargage des métaux étudiés. Et finalement, les résultats de spéciation des éléments étudiés à travers les méthodes d'extraction chimique seront confrontés à la biodisponibilité de ces éléments estimés par l'analyse des teneurs en ces éléments de quelques plantes cultivées sur ces sols.

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

Environ 10 kg de sols de surface sont prélevés chaque fois sur 4 points d'une même parcelle à une profondeur de 0 à 20 cm. L'ensemble est séché à l'air libre, homogénéisé, tamisé à 2 mm et stocké en vue de son analyse. Le pH-eau du sol est mesuré, dans un rapport sol/solution (1/5), dans l'eau déminéralisée (NF X 31-117)[11].

Le taux de carbonate est déterminé par attaque à l'acide chlorhydrique, le volume du gaz carbonique est mesuré à l'aide d'un appareil Scheibler (NF X 31-105)[11].

Le taux de la matière organique est déterminé par calcination à 500°C dans un four à moufle jusqu'au poids constant. Cette méthode a été inspirée de la norme NF 44-041 pour la détermination de la perte au feu.

Parmi les techniques de mise en solution, nous avons choisi celle utilisant l'eau régale (NF X 31-415)[11], à cause de sa simplicité et de sa relative rapidité. De plus elle représente une reproductibilité satisfaisante pour la plupart des métaux que nous étudions[6].

L'analyse des solutions de digestion a été effectuée par un spectromètre d'absorption atomique Perkin-Elmer A.Analyst 300 avec correction deutérium.

**Tableau 1 : Protocole des extractions séquentielles (BCR) [3]**

Étapes	Réactifs	Fractions touchées
1	CH <sub>3</sub> COOH (0,1 mol/l)	Solution de sol, carbonates, Métaux échangeables
2	NH <sub>2</sub> OH.HCL (0,1 mol/l à pH 2)	Oxydes de Fer et de Manganèse
3	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (8,8 mol/l) / CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub> (1 mol/l) à pH 2	Matières organiques/ sulfures

### Protocole des extractions séquentielles (BCR).

Les extractions séquentielles ont été effectuées à l'aide d'un agitateur mécanique par rotation fabriqué au laboratoire, les séparations ont été faites dans une centrifugeuse universelle (55701 Bioblock).

Le protocole de spéciation, issu des travaux du Bureau communautaire des références<sup>[3]</sup> comporte trois étapes :

#### Étape 1 : Fraction échangeable et acido-soluble

2 g de sol sont mélangés avec 80 ml de la solution d'acide acétique (0,11 mol/l) dans un tube à centrifugeur. L'ensemble est agité pendant 16 h à température ambiante. L'extrait est séparé du résidu solide par centrifugation et le culot est lavé avec 20 ml d'eau déminéralisée.

#### Étape 2 : Fraction réductible

80 ml d'une solution d'hydrochlorure d'hydroxylamine à 0,1 mol/l ajusté à pH 2 sont ajoutés au culot de la fraction précédente puis on procède de la même façon que dans l'étape 1.

#### Étape 3 : Fraction oxydable

Au culot de la fraction précédente sont ajoutés 20 ml de solution de peroxyde d'hydrogène à 8,8 mol/l ajusté à pH 2. Le mélange est laissé à température ambiante avec agitation intermittente manuelle pendant 1 heure. La digestion est poursuivie dans un bain-marie à 90°C pour réduire le volume à quelques ml. L'opération est répétée une deuxième fois puis 100 ml d'une solution d'acétate d'ammonium sont ensuite ajoutés au culot. Le mélange est agité puis séparé de la même façon que dans l'étape 1.

#### Étape 4 : Fraction résiduelle

Afin de permettre la comparaison des teneurs extraites par le protocole BCR et le contenu total du sol nous avons réalisé une quatrième étape où le culot de la fraction obtenue à l'étape 3 est soumis à une attaque par l'eau régale (même procédure que dans la digestion totale) pour déterminer la fraction résiduelle.

L'analyse des solutions extraites a été effectuée par un spectromètre d'absorption atomique Perkin-Elmer AAnalyst 300 avec correction deutérium.

### Extraction simple à l'EDTA (sel disodique dihydraté de l'acide éthylène diaminotétracétique).

L'extraction à l'EDTA a été réalisée en adoptant la procédure du Bureau communautaire des références<sup>[10]</sup> :

14,612 ± 0,005 g d'EDTA sont ajoutés à 80 ± 2 ml d'eau déminéralisée et dissoute par l'ajout de 13 ± 0,5 ml de solution d'ammoniaque concentrée (à 25 %). L'addition doit être poursuivie jusqu'à ce que tout l'EDTA soit dissous. La solution obtenue est diluée avec de l'eau déminéralisée jusqu'à pH 9 dans un container de 1 litre. Le pH est ajusté à 7,00 ± 0,05 par ajout d'ammoniaque ou d'acide chlorhydrique puis le volume est ajusté à 1,00 ± 0,01 litre.

Un échantillon de 4 g de sol est transféré dans un tube à centrifuger de 50 ml dans lequel 40 ml de la solution d'EDTA tamponnée à pH 7 sont ajoutés. L'ensemble est agité pendant 1 heure.

Les solutions extraites ont été analysées par un spectromètre d'absorption atomique Perkin-Elmer AAnalyst 300 avec correction deutérium.

### Analyse des plantes

Trois plantes (persil, laitue et betterave) sont collectées à partir de la même parcelle où l'on a collecté le sol. Les deux parties de chaque plante, racines et parties aériennes, sont séchées à 70°C jusqu'au poids constant puis broyées et stockées. La digestion totale des plantes a été effectuée par l'acide nitrique concentré<sup>[12]</sup> selon la procédure ci-dessous :

À 0,5 g d'échantillon sec on ajoute 5 ml d'acide nitrique concentré (à 65 %) dans des récipients en Téflon "bombes", on laisse attaquer le mélange pendant une nuit à température ambiante afin de permettre une oxydation lente de la matière organique des plantes. Les récipients sont fermés puis chauffés dans un four à micro-ondes selon le programme de digestion suivant : 10 min à 400 W, 15 min à 500 W et 5 min à 600 W. Les récipients sont ensuite refroidis puis dilués à un volume de 20 ml. L'analyse des éléments métalliques dans les solutions de digestion a été réalisée par un spectromètre d'émission à plasma induit avec détection de masse (ICP-MS) HP 4500-Hewlett Packard, Yokogawa Analytical System, Japan). La méthode de calibration utilisée est celle des calibrants externes en conjonction avec des standards internes. Cette méthode non seulement compense les multiples bruits mais aussi compense les effets de matrice.

## RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### Caractérisation du sol étudié

La détermination du pH-eau a montré que le sol analysé a un pH légèrement alcalin, de 7,8. Le contenu en carbonate de calcium est de 29,5 %. La teneur en matières organiques est de 11,85 %. Cette forte teneur est expliquée par la forte charge en matière organique des eaux de Oued Fès.

### Digestion totale

Pour la validité de la méthode, un matériel de référence certifié [Sol GXR-2 du Park City, Utah, USA, connu par USGS exploration géochimique de référence] a été analysé simultanément avec l'échantillon de sol étudié. Les valeurs trouvées (moyenne et déviation standard relative, R.S.D.) dans ce travail et les valeurs certifiées ou indicatives du matériel de référence sont données dans le tableau 2 page suivante (en mg/kg de matières sèches). La justesse de la méthode est bonne pour la majorité des éléments. La déviation standard relative,

**Tableau 2 : Résultats de l'analyse du matériel de référence Sol GXR-2, en mg/kg MS.**

Les valeurs entre parenthèses ne sont pas certifiées

	Pb	Ni	Cr	Cu	Zn	Mn
Certifié	690	(21)	36	(76)	530	(1007)
Mesuré (n=3)	651,7	16,5	31,5	75,4	513,4	925,2
R.S.D. (%)	1,9	10,9	5,3	1,7	3,8	2,1

**Tableau 3 : Concentration totale en métaux du sol étudié et les teneurs limites dans les sols (en mg/kg MS)**

	Oued Fès	Teneurs limites dans les sols	
		Norme NF U 44-041	Directive CCE
Zn	206	300	300
Pb	263	100	300
Cu	59	100	140
Cr	84	150	200
Ni	37	50	75

est rangée de 1,7 % (pour Cu) à ~ 11 % (pour Ni). Le contenu total en métaux dans le sol étudié (en mg/kg de matières sèches) est présenté dans le tableau 3. Ce tableau présente aussi les teneurs limites dans les sols<sup>[13]</sup>. La teneur limite est définie comme la limite au-dessus de laquelle la toxicité peut être possible. On remarque la présence des teneurs élevées en zinc et en chrome alors que la teneur en plomb dépasse largement la teneur limite donnée dans la norme française homologuée NF U 44-041. Ces teneurs sont dues essentiellement aux eaux utilisées pour l'irrigation sans aucun traitement, sachant que les métaux se trouvent à l'état soluble et en grande partie liés à la matière en suspension et à la matière organique<sup>[13, 14]</sup>.

### Extractions séquentielles

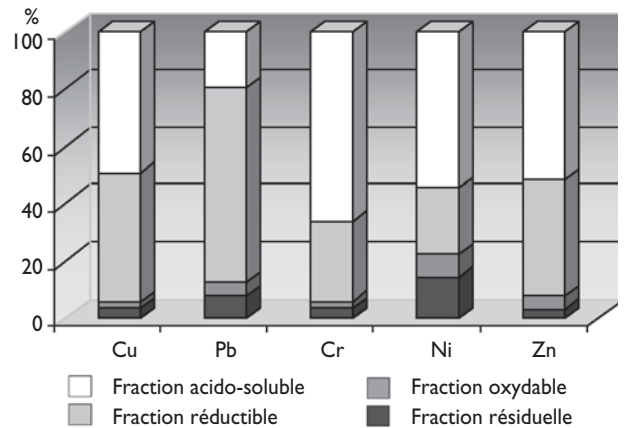
Les interférences chimiques causées par la matrice du sol sont étudiées par comparaison des pentes obtenues en utilisant un étalonnage avec les solutions d'extraction et la méthode des ajouts dosés. De même, la présence des interférences chimiques liées aux agents d'extraction employés dans chaque étape est étudiée par comparaison des pentes obtenues en utilisant un étalonnage avec des standards aqueux et les solutions d'extraction<sup>[15, 16]</sup>.

Des trois solutions d'extraction utilisées, seule l'acétate d'ammonium avait une petite influence sur la sensibilité des éléments. Des interférences inter-élément significatives sont observées seulement pour le Cr dans les extraits par l'acide acétique et le chlorhydrate d'hydroxylamine. L'étalonnage direct avec des étalons préparés dans les solutions d'extraction est convenable pour les autres éléments dans l'acide acétique et le chlorhydrate d'hydroxylamine et pour tous les éléments dans l'acétate d'ammonium.

Pour évaluer correctement la contamination du sol, la quantité totale des métaux doit être subdivisée dans

leurs différentes formes chimiques afin de pouvoir tirer des conclusions : quels métaux sont plus susceptibles d'entrer dans le cycle biologique de l'environnement et quels métaux sont plus solidement liés. Le protocole de spéciation, issu des travaux du Bureau communautaire des références de trois étapes<sup>[3]</sup> a été appliqué au sol étudié.

La distribution en pourcentage des éléments métalliques étudiés dans les différentes fractions du sol est représentée par l'histogramme 1.



**Histogramme 1 : répartition en pourcentage des éléments métalliques étudiés dans les différentes fractions du sol**

#### Cuivre :

les fractions acido-soluble et réductible contiennent des teneurs faibles en cuivre entre 3,63 et 2,18 % respectivement, ce qui montre que ces deux premières phases ne constituent pas un site privilégié pour la concentration de cet élément. Nous le trouvons cependant, essentiellement lié à la fraction organique (44,9 %) et à la fraction résiduelle (49,2 %).

#### Chrome :

Le chrome présente la même répartition que le cuivre, les phases acido-soluble et réductible sont très faiblement représentées en cet élément (< 4 %). La fraction oxydable présente des teneurs de 28 %. La majeure partie du chrome est liée à la fraction résiduelle (> 66%).

#### Plomb :

Le plomb est peu disponible sur la fraction acido-soluble et la fraction associée aux oxydes de fer et de manganèse 7,6 et 4,9 % respectivement. Cependant, il se trouve essentiellement lié à la fraction organique (67,7 %) ce qui confirme la forte contribution de l'apport anthropogénique à leur accumulation dans le sol.

#### Nickel :

Le nickel est présent en majorité dans la fraction résiduelle (> 54 %). Il est présent aussi dans la phase oxydable (22,8 %). Nous constatons, par ailleurs qu'il est assez disponible dans la fraction acido-soluble (14,3 %).

#### Zinc :

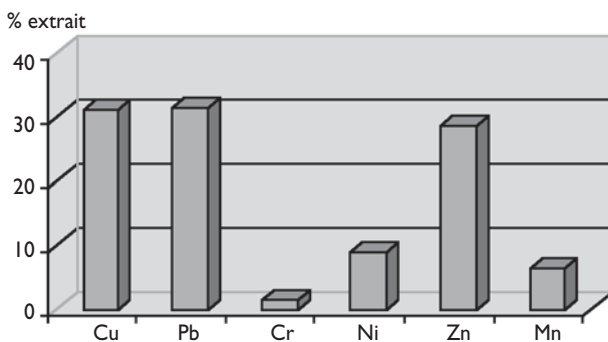
Les fractions acido-soluble et réductible de cet élément

sont très faiblement représentées (< à 5 %), il est partagé entre la phase oxydable et résiduelle (40,5 et 51,8 % respectivement).

On peut conclure que tous les métaux étudiés se trouvent liés à la fraction organique, traduisant ainsi leur grande affinité envers cette phase. En effet J. Baron<sup>[13]</sup> a montré que la quasi-totalité de Cu et Cd (et probablement des autres métaux) présente dans une boue se trouvera sous forme d'associations avec des particules, des colloïdes ou des molécules organiques dissoutes. B. Perez-Cid<sup>[16]</sup> a trouvé que dans les boues d'épuration le Pb, Cr, Ni et Cu sont principalement liés à la fraction oxydable. Ils forment avec elle des complexes dont la stabilité diffère d'un élément à un autre. On notera également que le nickel est le seul élément que l'on trouve en quantité relativement importante dans la fraction acido-soluble (14,3 %), mais vu sa faible teneur totale dans le sol il ne peut présenter un risque de contamination.

### Extraction simple

Afin de permettre une quantification de la fraction maximale biodisponible, des tests d'extraction simples sont appliqués au sol étudié. L'extractant utilisé est l'EDTA, il a été choisi comme agent chélatant pour sa haute affinité pour une large gamme d'espèces cationiques<sup>[8]</sup>. Les teneurs extraites en métaux par rapport au contenu total du sol sont donnés sur l'histogramme 2.



**Histogramme 2 : Teneurs extraites par l'EDTA en pourcentage par rapport au contenu total du sol**

On constate que le cuivre, le plomb et le zinc sont extraits à ~ 30% ce qui représente des teneurs importantes. Cette fraction potentiellement biodisponible peut avoir pour conséquence, à terme, des risques pour le développement des plantes, la santé des hommes et des animaux. L'EDTA semble sans effet sur le relargage du chrome (1,5 %). Le relargage du chrome semble nécessiter des conditions plus agressives ou des temps de contact plus longs. Le nickel, quant à lui, est extrait à 9 % mais vu la faible teneur du sol en cet élément il ne peut présenter un risque de contamination.

### Teneur des métaux dans les plantes

Le contenu total en métaux dans les plantes étudiées (mg/kg de matières sèches) est présenté dans le

tableau 6. Ce tableau présente aussi la gamme des concentrations critiques dans les plantes<sup>[17]</sup>. La gamme des concentrations critiques est définie comme la limite au-dessus de laquelle la toxicité peut être possible.

**Tableau 6 : Concentrations en métaux dans les plantes (en mg/kg MS)**

	Persil racines	Persil parties aériennes	Laitues racines	Laitues parties aériennes	Betterave Racines	Betterave Parties aériennes	Teneurs naturelles
<b>Zn</b>	11,4	15,2	30,6	22,5	12,2	18,3	10-50
<b>Pb</b>	2,3	1,9	3,8	3,1	1,9	3,3	0,01-4
<b>Cu</b>	8,4	4,77	7,4	4,9	2,1	5,9	5-20
<b>Cr</b>	2,5	1,1	1,8	0,70	0,94	2,7	0-3
<b>Ni</b>	0,62	0,55	0,25	0,25	0,17	0,24	0,1-6

On remarque que toutes les teneurs en métaux sont dans les limites de la gamme des teneurs naturelles. Les teneurs dans les racines sont supérieures à celles des parties aériennes pour le persil et la laitue sauf pour le zinc dans le persil où la partie aérienne présente des concentrations plus élevées. Pour la betterave, on constate que les parties aériennes présentent les teneurs les plus élevées. En terme de disponibilité on constate que pour les trois plantes, le cuivre et le zinc sont les plus accumulés. En effet la teneur en Cu est de 3,6 à 14,2 % de la teneur totale en Cu dans le sol et la teneur en Zn est de 5,5 à 14,8 % de la teneur totale en Zn dans le sol. Le Pb, Cr et Ni ne dépassent pas les 3 % de leur teneur totale dans le sol.

### CONCLUSION

À travers cette étude, et à partir des résultats des analyses des sols, nous avons pu enregistrer des degrés de contamination élevés en plomb et en zinc.

L'application des extractions séquentielles au sol irrigué par les eaux de Oued Fès a permis de mettre en évidence la répartition des éléments métalliques dans les différentes fractions du sol. Nous avons pu constater que la phase organique présente un site privilégié pour tous les éléments étudiés. La fraction acido-soluble est dominée par le Ni et le Pb. En terme de mobilité et biodisponibilité, on peut conclure que le nickel et le plomb peuvent être considérés comme modérément disponibles tandis que le cuivre, le zinc et le chrome ont une disponibilité très limitée et seule une destruction de la phase oxydable sous l'effet d'une variation des conditions physico-chimiques ou de l'activité bactérienne peut permettre leur libération. Ces résultats coïncident avec les résultats donnés par I. Maiz et al<sup>[18]</sup> et R.M. Harrison et al<sup>[19]</sup>, sauf pour le zinc, et cela peut être dû à la nature du sol et/ou la source de pollution.

L'extractibilité à l'EDTA nous a permis de mettre en évidence la fraction potentiellement biodisponible. En effet, le plomb, le cuivre et le zinc sont extraits à ~ 30 %, ce

qui représente des teneurs importantes. Pour le nickel, qui présente une teneur de 37 ppm dans le sol dont 55 % sont liés à la fraction résiduelle, il ne semble pas présenter un risque de contamination. L'EDTA semble sans effet sur le relargage du chrome. Cet élément dont 28 % de la teneur totale dans le sol sont liés à la fraction organique semble nécessiter des conditions plus agressives ou des temps de contact plus longs pour sa libération.

L'analyse de quelques plantes cultivées sur ce sol nous a permis de confirmer en partie les résultats obtenus. En effet, le Cu et le Zn sont les plus mobilisés par les plantes alors que la mobilisation des autres éléments reste très limitée. Le plomb, dont 67,7 % de la teneur totale dans le sol ont été trouvés dans la fraction organique, et qui a été extrait à ~ 30 % par l'EDTA, ne semble pas présenter un risque majeur pour les plantes. On peut conclure que la qualité des plantes cultivées n'est pas remise en cause par l'utilisation des eaux polluées pour l'irrigation. Cependant il se pose la question de l'accumulation des métaux dans le sol : jusqu'à quelle teneur dans le sol cette accumulation peut-elle présenter des risques pour les agrosystèmes et les écosystèmes et la chaîne trophique ?

**El Ass K.\*, Laachach A.\*, Azzi M.\*\***

\* Laboratoire d'analyse physico-chimiques  
Ecole nationale de l'industrie minérale (ENIM) Rabat - Maroc  
\*\* Laboratoire d'électrochimie et chimie de l'environnement.  
Faculté des Sciences Aïn Chock Casablanca - Maroc

## Références

- [1] A. Tessier, P.G.C.Campbell, and M.Bisson, (1979), *Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals* - Analytical Chemistry, June, vol. 51, n°7, pp (844-851)
- [2] U. Förstner, in : R. Lechsbere, R.A. Davis, P. L'Hermitte (Eds), (1985), *Chemical Methods for Assessing Bioavailable Metals in Sludges and Soils* - Elsevier, pp. (1-31)
- [3] A.M. Ure, Ph. Quevauviller, H. Muntau, B. Griepink, (1993), *Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonisation of extraction technique*, Intern. Journal. Environ. Anal. Chem. - 51, pp (135-151).
- [4] Caroline Whalley, Alastair Grant, (1994), *Assessment of the phase selectivity of the European Community Bureau of Reference (BCR) sequential extraction procedure for metals in sediment* - Analytica Chimica Acta, vol. 291, pp (287-295)
- [5] B. Marin, M. Valladon, M. Polve, A. Monaco, (1997), *Reproducibility testing of a sequential extraction scheme for the determination of trace metal speciation in a marine reference sediment by inductively coupled plasma-mass spectrometry* - Analytica Chimica Acta, vol. 342, pp (91-112)
- [6] Christine M. Davidson, Ailsa L. Duncan, David Littlejohn, Allan M. Ure, Louise M. Garden, (1998), *A critical evaluation of the three-stage sequential extraction procedure to assess the potential mobility and toxicity of heavy metals in industrially-contaminated land* - Analytica Chimica Acta, vol. 363, pp (45-55)
- [7] Gemma Rauret, (1998), *Extraction procedures for the determination of heavy metals in contaminated soil and sediment* - Talanta, vol 46, pp (449-455)
- [8] A.M. Ure, (1996), *Single extraction schemes for soil analysis and related applications* - The Science of the Total Environment, 179, pp (3-10)
- [9] S.K. Gupta, M.K. Vollmer, R. Krebs, (1996) *The importance of mobile, mobilisable and pseudo-total heavy metal fractions in soil for three-level risk assessment and risk management* - The Science of the Total Environment, 178, pp. (11-20)
- [10] Ph. Quevauviller, (1998), *Operationally defined extraction procedures for soil and sediment analysis, I-Standardization* - Analytical Chemistry, vol. 17, pp. (289-298)
- [11] Afnor, (1999), *Qualités des sols* - Volume I, p. 566
- [12] Shaole Wu, Xinbang Feng, Adolph Wittmeier, (1997), *Microwave digestion of plant and grain reference materials in nitric acid or a mixture of nitric acid and hydrogen peroxide for the determination of multi-elements by ICP-MS* - Journal of Analytical Atomic Spectrometry, vol. 12, pp (797-806)
- [13] Jean Baron, (1991), *Interactions des métaux lourds avec des boues d'épuration et les sols* - collection « Études et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées », p. 147
- [14] J. A. Faby, F. Brissaud, (Mai 1997), *L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation* - Office international de l'eau, p. 92
- [15] R.P. Thomas, A.M. Ure, C.M. Davidson and D. Littlejohn, G. Rauret, R. Rubio and J. F. Lopez-sanchez, (1994), *Three-stage sequential extraction procedure for the determination of metals in river sediments* - Analytica Chimica Acta, vol. 286, pp (423-429)
- [16] B. Pérez-Cid, I. Lavilla and C. Bendicho, (1996), *Analytical Assessment of Two Sequential Extraction Schemes for Metal Partitioning in Sewage Sludges* - Analyst, 121, pp (1479-1484)
- [17] A. Kabata-Pendias and H. Pendias, (1984), *Trace elements in soils and plant* - Boca Raton : CRC Press, p. 315
- [18] I. Maiz, M.V. Esnaola, E. Millan, (1997), *Evaluation of heavy metal availability in contaminated soils by short sequential extraction procedure* - The Science of Total Environment, 206, pp (107-115)
- [19] R.M. Harrison, D.P.H. Laxen, S.J. Wilson, (1981), *Chemical associations of lead, cadmium, copper, and zinc in street dusts and roadside soils* - Environmental Science and Technology, vol. 15, N° 11, pp (1378-1383)