

Evaluation de la pollution métallique dans les sols agricoles irrigués par les eaux usées de la ville de Settat (Maroc)

Tomgouani KAO¹, Khalid EL MEJAHED² & Abderrahim BOUZIDI¹

1. Université Hassan I, Faculté des Sciences et Techniques, B.P. 577, Settat, Maroc. e-mail : kao-tomgouani@hotmail.com

2. Centre Régional de la Recherche Agronomique (CRRRA), B.P. 589, Settat, Maroc.

Résumé. Les concentrations totales de métaux lourds ont été évaluées dans les échantillons de onze terrains agricoles sélectionnés le long de l'oued Boumoussa, drain naturel des eaux usées de la ville de Settat. Sur les huit éléments analysés (As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn), seuls l'arsenic, le plomb et le zinc présentent des concentrations élevées dans les parcelles irriguées par les eaux usées comparativement à celles irriguées avec l'eau souterraine. Les concentrations en plomb sont les plus importantes (178 ppm), dépassant la concentration maximale admise pour un sol normal (100 ppm). Par contre, les teneurs moyennes en arsenic et en zinc sont respectivement de l'ordre de 3,56 ppm et 20,12 ppm. Elles sont en adéquation avec les normes de concentrations pour un sol normal, soit 6 ppm pour As et 90 ppm pour Zn. Sur l'ensemble des terrains échantillonnés, la pollution métallique est décroissante dans le profil du sol.

Mots clés : Maroc, Settat, eaux usées, sol métaux lourds, pollution.

Evaluation of metallic pollution in agriculture soils-amended by sewage sludge of Settat (Morocco).

Abstract. Total concentrations of heavy metals were evaluated in the soil samples of eleven selected fields located along the Oued Boumoussa, which is the natural waste water drain for Settat. Mean total concentrations of 8 elements (As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn) were analysed. Three of which (As, Pb and Zn) showed to be higher in sludge-covered soils than in unaffected soils. Lead concentrations are the most important and reach 178 ppm, exceeding the maximal concentration of 100 ppm admitted for normal soil. In contrast, the mean concentrations of As and Zn are 3.56 ppm and 20.12 ppm respectively. They are in adequation with the recommended concentrations for normal soil, which are 6 ppm for As and 90 ppm for Zn. In all sampled fields, metallic pollution clearly decreases downwards in the soil profile.

Key words: Morocco, Settat, sewage sludge, soil, heavy metals, pollution.

INTRODUCTION

Dans la province de Settat, la faiblesse et la fluctuation des précipitations, ainsi que les coûts élevés associés à l'utilisation des engrais, amènent les agriculteurs à utiliser les eaux usées en irrigation. Ces dernières, riches en matière organique et en éléments fertilisants (Chaney 1988), contiennent cependant des éléments chimiques indésirables, en particulier les polluants métalliques (Moriyama *et al.* 1989, Theissen 1995, TSM 1996), qui peuvent s'accumuler dans le sol et, selon les conditions biogéochimiques, passer dans la solution du sol (Mench *et al.* 2000). Cette solution riche en éléments nutritifs est absorbée par les plantes (Jalil *et al.* 1994a, b) et peut également percoler vers l'eau de la nappe phréatique et y déposer ces contaminants souvent toxiques (Christensen *et al.* 1996). La consommation par les animaux de cette eau polluée ou des produits agricoles contaminés permet le passage immédiat de ces éléments toxiques dans la chaîne alimentaire. C'est pourquoi il est impératif, devant une susceptibilité de pollution telle que l'irrigation agricole des eaux usées brutes de Settat, d'évaluer les teneurs de ces éléments chimiques dans le sol, afin d'apprécier véritablement l'ampleur du risque.

Les eaux usées brutes de Settat sont utilisées en majorité pour la production du maïs en grains, qui avoisine 100 qx/ha. Une telle production nécessite l'usage massif d'eaux usées fertilisantes. Cependant, l'accumulation des polluants dans le maïs peut constituer un risque majeur pour la santé des hommes et des animaux et pour l'écosystème en général. Les études menées par Kholtei (2002) ont révélé des concentrations trop importantes de Cr, Hg, Pb et Zn dans les eaux de puits des zones irriguées par les eaux usées. Ouakki & Fekher-eddine (2001) ont mis en évidence la contamination de certaines cultures comestibles par Cd et

Pb. Il était donc devenu nécessaire d'évaluer les teneurs totales des métaux lourds dans le sol afin de mieux appréhender le processus de contamination métallique et son ampleur.

MATERIEL ET METHODE

Pour l'étude d'impact, onze terrains agricoles irrigués par les eaux usées, ont été sélectionnés au printemps 2004. Ces terrains sont situés de part et d'autre de l'oued Boumoussa dans la région de Sidi El Aïdi, à 7 km de la ville de Settat (Fig. 1, n° 3 à 13). Deux autres terrains (n° 1 et 2) situés à environ 2 km de l'oued et habituellement irrigués par les eaux souterraines ont été intégrés à l'étude en tant que témoins (Fig. 1).

Chaque terrain a été subdivisé en trois petites zones perpendiculaires au sens d'irrigation des eaux usées. Sur chacune de ces zones, le sol est prélevé en zigzag (six points en moyenne) à l'aide d'une tarière hélicoïdale, à deux profondeurs : 0 – 20 cm et 20 – 40 cm. Les sols de même profondeur et de la même zone sont mélangés, mis dans un sachet en plastique et transportés au laboratoire. Ils sont séchés à 40°C pendant trois jours, écrasés au mortier en porcelaine puis tamisés à 2 mm et ensachés pour analyse.

La détermination des métaux lourds totaux a été effectuée à travers l'extraction du sol avec HNO₃, 2 M (sol : acide 1 :10) dans un bain d'eau bouillante pendant 2 h (Anderson 1976). Les fractions des éléments métalliques contenus dans les solutions extraites ont été ensuite lues à l'ICP-AES (Ultima 2) au Centre National de la Recherche Scientifique et Technique (Rabat). Le laboratoire d'analyse utilise des standards (précis de 1000 ppm de

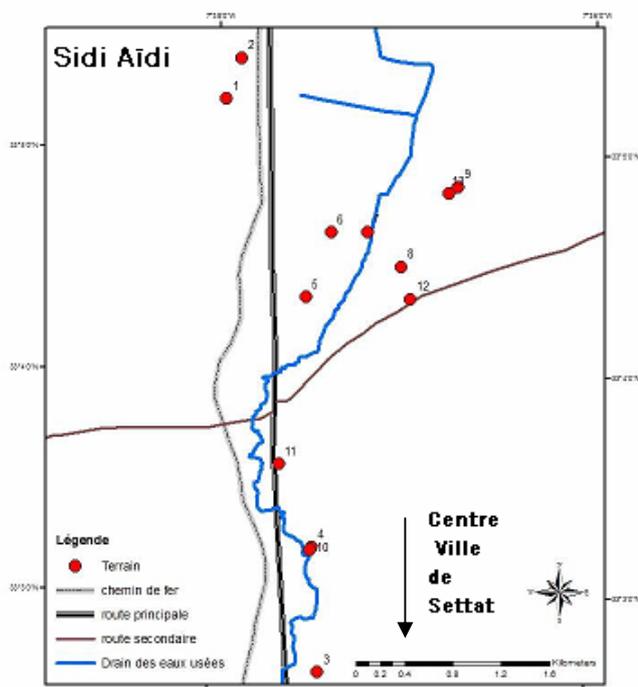


Figure 1. Localisation des terrains échantillonnés.

Jobin Yvon) certifiés par ISO 9001 quality assurance system.

Le degré de pollution des métaux lourds dans les sols affectés a été évalué et comparé à travers l'indice de la charge de pollution (Pollution Load Index) de Tomlinson *et al.* (1980). Cet indice est basé sur les valeurs des facteurs de concentration de chaque métal (CF_i) dans le sol. Le facteur de concentration est le rapport de la concentration de chaque métal dans le sol sur la valeur du fond géochimique (concentration naturelle du métal dans le sol) du même métal. Cette dernière a été assimilée dans notre étude à la concentration moyenne du métal lourd dans les sols irrigués par les eaux souterraines. Pour chaque site échantillonné, l'indice de la charge de pollution (PLI) peut être calculé comme la racine $n^{\text{ième}}$ du produit de n facteurs de concentration. L'Indice de charge de pollution (PLI) supérieur à 1 symbolise une pollution.

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n}$$

avec

$$CF_i = \frac{\text{Concentration du métal } i}{\text{Fond géochimique du métal } i}$$

La normalité des résultats a été vérifiée à travers le diagramme gaussien p-p de régression de résidus standardisés. L'analyse de la variance à un facteur a été effectuée avec SPSS. 13.0 pour Windows au risque $\alpha = 5\%$.

RESULTATS ET DISCUSSION

Caractéristiques du sol

Sur le tableau I, sont figurées les caractéristiques des sols échantillonnés. Le pH est considéré comme le principal paramètre chimique contrôlant la biodisponibilité des métaux lourds dans le sol (Brallier *et al.* 1996). La moyenne

du pH (à 25°C) des terrains irrigués par les eaux souterraines varie de 8,36 à 8,59 alors que celle des terrains irrigués par les eaux usées est de 8,29 à 8,84. Ceci indique que les eaux usées apportées au sol n'ont pas diminué le pH de ce dernier mais, au contraire, elles l'ont significativement augmenté. Le pH alcalin limite le passage des métaux lourds de la phase solide à la solution du sol puis à la plante (Thornton 1996). Elle reflète, au même titre que les argiles et les limons, la nature calcaire de la roche mère. La texture des sols étudiés varie des sols témoins aux sols affectés. Les sols témoins concentrent en effet plus d'argile et de sable grossier que les sols affectés. Ces derniers comptent généralement plus de limon et de sable fin que les sols témoins.

Teneurs de métaux lourds dans le sol.

L'analyse de la variance à un facteur des résultats de métaux lourds montre que les concentrations de As, Pb et Zn dans les sols irrigués par les eaux usées excèdent significativement celles des sols non affectés (Tab. II). L'arsenic est cancérigène (Chen *et al.* 1992) et le seul élément dont la pollution est significative à $\alpha = 10\%$, c'est pourquoi la pollution par cet élément a été exceptionnellement validée au seuil de significativité de 10 %.

As, Pb et Zn peuvent être considérés comme polluants métalliques issus des eaux usées de la ville de Settat. Les résultats reflètent les concentrations élevées de ces métaux lourds dans les eaux de puits de la région (Kholtei 2002). Les concentrations moyennes de ces polluants n'excèdent pas les valeurs maximales fixées par l'OMS dans le sol, qui sont de 40 ppm pour As, 100 ppm pour Pb et 300 ppm pour Zn (Godin 1982). Le plomb est toutefois le polluant métallique principal et sa concentration maximale (178 mg.kg^{-1}) est au-dessus de la valeur critique indiquée par l'OMS (100 ppm). Ce métal est utilisé dans la verrerie (Bunce 1993) et proviendrait donc de ce type d'unité industrielle installée en amont de la ville de Settat. Les eaux usées de Settat sont par contre moyennement pourvues en As et en Zn.

Les concentrations moyennes des métaux lourds (Tab. III) dans les couches [0 – 20 cm] et [20 – 40 cm] des sols affectés sont supérieures à celles obtenues des couches équivalentes des sols témoins. Ces derniers bénéficient de l'apport en As et en Zn à travers les produits chimiques agricoles, d'où la relative accumulation de ces métaux dans la couche [0 – 20 cm]. Par contre, dans ces sols témoins, Pb se rencontre plus dans la couche profonde [20 – 40 cm] et suggère son origine naturelle. L'arsenic, malgré son apport modéré par les eaux usées, se répartit équitablement dans les couches [0 – 20 cm] et [20 – 40 cm]; sa progression dans le profil du sol serait due à sa forme (taille) d'émission par les industries (fonderie). La concentration en Pb, à la différence du Zn, baisse très significativement de la couche [0 – 20 cm] à la couche [20 – 40 cm] des sols affectés. Les valeurs de l'indice de pollution montrent que les terrains affectés sont en moyenne deux fois plus pollués que les terrains témoins. Cette pollution baisse en moyenne de moitié de la couche [0 – 20 cm] à la couche [20 – 40 cm]. La baisse de la pollution dans le profil du sol s'expliquerait par le rôle tampon joué par les caractéristiques physiques

Tableau I. Caractéristiques des sols au nord de Settat.

N° Terrain	Latitude (N)	Longitude (W)	Couche (cm)	pH (eau)	Arg. (%)	Limon (%)	Sable grossier (%)	Sable fin (%)
<i>Terrains non affectés</i>								
1	33°05'13"	7°37'58"	0 - 20	8,53	53,33	8,90	7,63	29,47
			20 - 40	8,59	58,33	7,13	7,60	26,73
2	33°05'25"	7°37'53"	0 - 20	8,36	50,00	5,90	9,93	34,17
			20 - 40	8,43	51,67	8,57	7,73	31,93
<i>Terrains affectés</i>								
3	33°02'39"	7°37'25"	0 - 20	8,40	40,67	12,00	7,23	39,83
			20 - 40	8,39	43,33	14,53	6,30	35,80
4	33°03'13"	7°37'27"	0 - 20	8,29	35,33	6,33	6,00	51,63
			20 - 40	8,57	37,67	8,33	7,07	46,70
5	33°04'20"	7°37'31"	0 - 20	8,53	53,00	11,33	6,40	29,27
			20 - 40	8,70	51,00	9,67	7,53	31,53
6	33°04'38"	7°37'24"	0 - 20	8,53	50,50	10,25	7,15	31,80
			20 - 40	8,73	49,33	9,33	7,30	31,17
7	33°04'38"	7°37'12"	0 - 20	8,50	60,33	10,67	4,83	23,90
			20 - 40	8,68	57,67	8,50	5,47	28,23
8	33°04'29"	7°37'01"	0 - 20	8,38	56,00	8,33	4,07	31,27
			20 - 40	8,56	56,00	5,33	4,77	33,77
9	33°04' 51"	7°36'43"	0 - 20	8,54	50,00	6,33	5,30	38,40
			20 - 40	8,79	55,00	4,33	7,33	33,37
10	33°03'12"	7°37'28"	0 - 20	8,58	39,67	7,67	6,60	46,10
			20 - 40	8,84	46,33	6,67	6,13	40,67
11	33°03'35"	7°37'39"	0 - 20	8,57	43,33	9,33	7,77	39,40
			20 - 40	8,85	42,00	8,33	6,43	43,00
12	33°04'20"	7°36'58"	0 - 20	8,68	48,00	6,67	4,80	39,93
			20 - 40	8,72	51,00	8,00	5,30	35,60
13	33°04'49"	7°36'46"	0 - 20	8,58	48,67	12,67	5,30	33,43
			20 - 40	8,73	50,33	11,67	5,10	33,03

Tableau II. Concentrations totales (mg/kg) de métaux lourds dans les sols étudiés (0 – 40 cm) comparées aux valeurs dans un sol normal. a, valeurs moyennes (Bowen 1979) ; b, concentrations moyennes.

Éléments	Sol normal ^a	T. témoins	T. affectés
As	6	3,31^b	3,56^{bc}
Cd	0,35	0,26	0,21
Co	8	19,09	18,24
Cr	70	4,81	5,25
Cu	30	14,32	10,91
Ni	50	7,58	5,16
Pb	35	7,39	29,66
Zn	90	15,82	20,12

Tableau III. Concentrations moyennes (mg.kg⁻¹) de métaux lourds et les valeurs du PLI (indice de pollution) à différentes profondeurs des sols affectés ou non affectés.

Profondeur (cm)	As	Pb	Zn	PLI
T. témoins				
0 – 20	3,40	6,41	18,30	-
20 – 40	3,22	8,37	13,33	-
T. affectés				
0 – 20	3,58	45,70	24,62	2,18
20 – 40	3,54	13,63	15,62	1,25

du sol, notamment l'argile. Cette dernière est en effet imperméable et se concentre davantage en profondeur.

Si les terrains témoins présentent des valeurs similaires du PLI, une variation de cet indice de pollution apparaît d'un terrain affecté à un autre. Ceci s'explique par la différence de fréquence d'irrigation, du volume d'eaux usées apporté à chaque irrigation, du nombre d'années pendant lesquelles le terrain a été irrigué, de la topographie du terrain et des inondations hivernales. Le terrain 3 est le moins pollué de tous les terrains affectés du fait qu'il se trouve sur le versant d'une colline, donc sujet au lessivage lors des pluies (Fig. 2). Par ailleurs (Fig. 3) les terrains ne conservent pas toujours leur niveau de pollution d'un métal à un autre (exemple des terrains 4, 6, 9 et 12 concernant le Plomb et le Zinc). Ceci pourrait s'expliquer par l'irrigation des terrains à des moments différents (jours et heures). En effet, la composition quotidienne des eaux usées dépend de la mise en activité ou non des industries.

CONCLUSION

Cette étude a particulièrement révélé la pollution au plomb des sols irrigués par les eaux usées au nord de Settat. Certaines valeurs de cet élément excèdent en effet

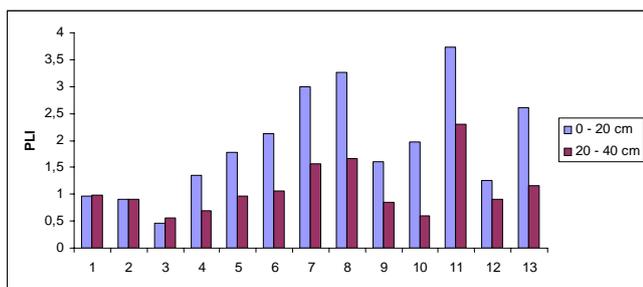


Figure 2. Indices de pollution à travers le profil des sols. 1 et 2, terrains témoins.

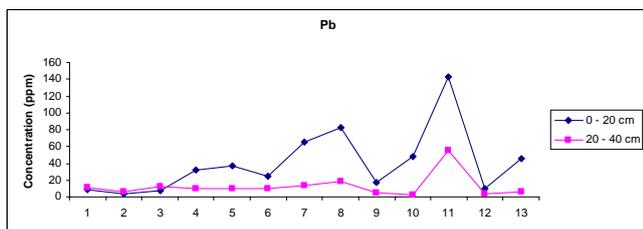
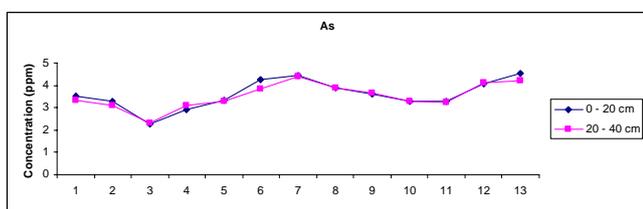
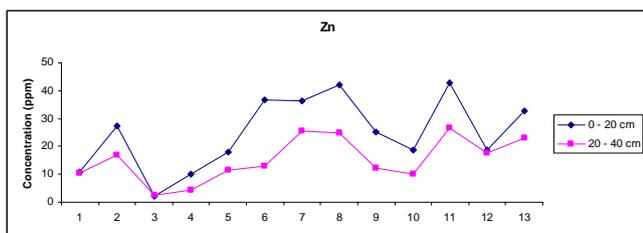


Figure 3. Evolution de la concentration des polluants sur les terrains étudiés.

le seuil critique de 100 ppm fixé par l’OMS. Les eaux usées enrichissent également les sols de zinc et d’arsenic. Ces métaux, de par leur origine externe, s’accumulent majoritairement dans la couche superficielle du sol [0 – 20 cm]. Le sol, grâce à ses propriétés physico-chimiques diminue en moyenne de moitié la migration de la pollution de la couche [0 – 20 cm] à la couche [20 – 40 cm]. La couche [0 – 20 cm] des sols affectés est par ailleurs deux fois plus polluée que celle des sols témoins. Cette pollution varie selon les terrains et selon les polluants. Une grande disponibilité de ces polluants en général et du plomb en particulier dans la solution du sol présenterait un réel risque sanitaire. Le plomb est en effet responsable de nombreuses atteintes néfastes chez l’homme (troubles de cerveau, de reproduction et de métabolisme...).

Remerciements.

Cette étude a été réalisée dans le cadre d’une thèse de Doctorat. Nous remercions les évaluateurs pour leurs remarques qui ont permis d’améliorer la première version du manuscrit.

Références

- Andersson A. 1976. On the determination of ecologically significant fractions of some heavy metals in soils. *Swedish J. Agric. Res.* 6, 19-25.
- Bowen H.J.M. 1979. *Environmental chemistry of elements*. Academic Press, 333 p.
- Brallier S., Harrison R.B., Henry C.L. & Dongsen X. 1996. Liming effects on availability of Cd, Cu, Ni and Zn in a soil amended with sewage sludge 16 years previously. *Water, Air and Soil Pollution*, 86, 195-206.
- Bunce N.J. 1993. *Introduction to Environmental Chemistry*. Wherz publishing Ltd, Winnipeg, pp. 341-522.
- Chaney R.L. 1988. Effective utilisation of sewage sludge on cropland in United States and toxicological considerations for land application. *In: Land Application of Sewage Sludge*. Association for the Utilisation of Sewage Sludge, Tokyo, pp. 77-105.
- Chen C.-J., Chen C.W., Wu, M.-M. & Kuo, T.-L. 1992. Cancer potential in liver, lung, bladder and kidney due to ingested inorganic arsenic in drinking water. *British J. Cancer*, 66, 888-892.
- Christensen J.B., Jensen D.L. & Christensen T.H. 1996. Effect of dissolved organic carbon on the mobility of cadmium, nickel and zinc in leachate polluted groundwater. *Wat. Res.*, 30, 12, 3037-3049.
- Godin P. 1982. Source de contamination et enjeu. Séminaire “Eléments traces et pollution des sols”, 4-5 Mai 1982, Paris, pp. 3-12.
- International Atomic Energy Agency. 1997. *Sewage sludge and wastewater for use in agriculture*. Tech. Doc. 971.
- Jalil A., Selles F. & Clarke J.M. 1994a. Growth and cadmium accumulation in two durum wheat cultivars. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.*, 25, 15 & 16, 2597-2611.
- Jalil A., Selles F. & Clarke J.M. 1994b. Effect of cadmium on growth and uptake of cadmium and other elements by durum wheat. *J. Plant Nutrition*, 17, 11, 1839-1858.
- Kholtei S. 2002. *Plaine de Berrechid : caractérisation des eaux usées de Settat ; évaluation de leur impact sur la qualité des eaux souterraines et risque toxicologique*. Thèse Univ. Casablanca, 162 p.
- Ouakki M. & Fekher-eddine N. 2001. *Etude de l’impact de l’irrigation par les eaux usées sur la qualité des sols : évaluation des risques de contamination du sol et de certaines cultures par les métaux lourds (Cd, Zn, Pb et Cu)*. Projet de fin d’études, MST Protection de l’Environnement, FST de Béni Mellal.
- Mench M.J., Manceau A., Vangronsveld J., Clijsters H. & Mocquot B. 2000. Capacity of soil amendments in lowering the phytoavailability of sludge-borne Zinc. *Agronomics*, 20, 383-397.
- Moriyama K., Mori T., Arayashiki H., Saito H. & Chino M. 1989. The amount of heavy metals derived from domestic wastewater. *Wat. Sci. Tech.*, 21, 1913-1916.
- T.S.M. 1996. La réutilisation des eaux usées après épuration. *Février*, 2, 81-118.
- Theissen G. 1995. Eaux usées et maraîchage. Attention aux métaux lourds et aux exigences sanitaires. *Nouvelles économiques, Afrique Agriculture*, 232, p. 12.
- Thornton I. 1996. Risk assessment related to metals: the role of the geochemist. *Report of the International Workshop on Risk Assessment of Metals and their Inorganic Compounds*, Angers, France, November 1996. International Council on Metals and the Environment.
- Tomlinson D.L., Wilson J.G., Harris C.R., Jeffrey D.W. 1980. Problems in the assessments of heavy metal levels in estuaries and formation of a pollution index. *Helgol Meeresunters.*, 33:566-575.