Afrique SCIENCE *15(2) (2019) 226 - 237*
ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.net

Caractérisations physico-chimiques des sols irrigués par les eaux usées brutes d'origines industrielles

Jacques SAWADOGO[1*], Jean Boukari LEGMA[2], Aminata KABORE[1], Pane Jeanne d'Arc COULIBALY[1], Souley Kallo MOUTARI[3] et Moussa BOUGOUMA[4]

[1] *Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST), Département de Gestion des Ressources Naturelles et Systèmes de Productions (GRN-SP), Laboratoire sol eau plante, 01 BP 476 Ouagadougou 01, Burkina Faso*
[2] *Université Saint - Thomas - d'Aquin (USTA), Faculté des Sciences et Technologies, 06 BP 10212 Ouagadougou 06, Burkina Faso*
[3] *Université Abdou Moumouni, Faculté de Sciences et Techniques, Laboratoire des Matériaux, Eaux et Environnements (LAMEE), BP 10662 Niamey, Niger*
[4] *Université Norbert ZONGO, Faculté des Sciences et Techniques, Département de chimie, BP 376 Koudougou, Burkina Faso*

* Correspondance, courriel : *jacques.sawadogo@ulb.ac.be*

Résumé

La présente étude porte sur l'évaluation de l'effet des eaux usées brutes d'origines industrielles sur les paramètres physico-chimiques des sols au Burkina Faso. Pour cela, des échantillons de sols ont été prélevés sur 12 parcelles du site dont 2 parcelles témoins isolées de toute source de pollution. Leurs teneurs en éléments chimiques de traces métalliques suivants : arsenic (As), cadmium (Cd), chrome (Cr), cuivre (Cu), nickel (Ni), cobalt (Co), plomb (Pb) et zinc (Zn) ont été déterminés par la technique de l'ICP-AES précédé de l'extraction des sols dans de l'acide nitrique. L'analyse de la variance montre des différences significatives ($p < 0,05$) sur certains paramètres. Les résultats obtenus révèlent que seuls l'arsenic, le cuivre, le nickel, le plomb, le chrome et le zinc présentent des concentrations élevées dans les parcelles irriguées par les eaux usées d'origine industrielles comparativement aux parcelles témoins. En effet, les concentrations en plomb (193 ppm) dépassent la valeur admise par l'OMS (100 ppm). Par contre les teneurs en cuivre, en nickel, en chrome, en arsenic et en zinc sont respectivement de l'ordre de 3,89 ppm, 7,23 ppm, 5,45 ppm, 2,1 ppm et 27,64 ppm. Celles-ci sont en adéquation avec les normes de concentrations pour un sol normal. La pollution métallique (PLI) de l'ensemble des terrains irrigués par les eaux usées échantillonnées diminue dans le profil du sol.

Mots-clés : *eaux usées, sol, concentrations, métaux lourds, pollution, normes.*

Abstract

Physical-chemical quality assessment of soils irrigated by raw industrial wastewater

This study examines the effect of industrial raw wastewater on the physical-chemical parameters from industrial in soils in Burkina Faso. For this, soil samples were collected from 12 plots of the research site and including 2 plots witnesses isolated from any sources of pollution. The chemical components of arsenic (As),

cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), nickel (Ni), cobalt (Co), lead (Pb) and zinc (Zn) were determined by inductive plasma mass spectrometry. Analysis variance showed significant differences ($p < 0.05$) on some the parameters studied. The results showed that arsenic, copper, nickel, lead, chromium and zinc have high concentrations in industrial wastewater irrigated plots compared with those irrigated with well water. Lead concentrations (193 ppm) exceed the WHO allowable concentration (100 ppm). However, copper, nickel, chromium, arsenic and zinc levels are 3.89 ppm, 7.23 ppm, 5.45 ppm, 2.1 ppm and 27.64 ppm, respectively. They are consistent with normal soil concentration standards. Metal pollution (PLI) of all irrigated sites from sampled wastewater decreases in the soil profite.

Keywords : *wastewater, soil, concentrations, heavy metals, pollution, standards.*

1. Introduction

Au Burkina Faso, dans la province du Kadiogo, la faiblesse, la fluctuation des précipitations et l'intensification agricole amènent les producteurs maraîchers à utiliser des eaux usées d'origines industrielles pour les cultures maraichères. Ces eaux usées d'origines industrielles, riches en matière organique et en éléments fertilisants, contiennent cependant des éléments chimiques indésirables, en particulier les polluants qui peuvent s'accumuler dans le sol et, selon les conditions biogéochimiques, passer dans la solution du sol [1, 2]. En plus, la surexploitation de cette ressource en eaux, couplée au phénomène de la sécheresse, conduit inévitablement à la dégradation des sols en milieu maraicher, qui se traduit par des problèmes de salinisation, de sodification, de détérioration de la structure des sols, de l'engorgement et de la pollution nitrique. Cette solution étant très riche en éléments nutritifs est absorbée par les plantes et peut également percoler vers l'eau de la nappe phréatique et y déposer ces contaminants souvent toxiques [3, 4]. 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 [5, 6]. En effet, il est impératif devant une susceptibilité de pollution d'évaluer les teneurs des éléments chimiques dans le sol, afin d'apprécier véritablement l'ampleur du risque. En outre, certaines études [7 - 9] ont révélé une teneur très importante de métaux lourds dans les puits des zones irriguées et la contamination de certaines cultures comestibles par les eaux usées d'origines industrielles. C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente recherche dont l'objectif est d'évaluer les concentrations totales des métaux lourds dans le sol afin de mieux comprendre le processus de contamination métallique et son ampleur dans un site maraîcher de la ville de Ouagadougou.

2. Matériel et méthodes

2-1. Site de l'étude

Le site d'étude est un site maraîcher ***(Figure 1)*** situé à proximité d'une zone industrielle dans le quartier de Kossodo à la périphérie nord-est de Ouagadougou (Latitude : 12°25'0.1 Nord et longitude : 1°27'42.74 Ouest). Il est localisé près d'une station d'épuration (STEP) par lagunage à microphytes couvrant un vaste site maraîcher de 35 hectares, prévu pour valoriser les eaux usées traitées [10, 11].

Figure 1 : *Zone de l'étude*

2-2. Échantillonnages et collecte de données

L'échantillonnage des sols a été fait de manière à couvrir la variabilité spatiale de chaque parcelle de production. Pour la caractérisation physico-chimique du sol du site expérimental, douze parcelles agricoles (numérotée de III à XIV) irriguées par les eaux usées d'origines industrielles ont été sélectionnées. Ces parcelles ont été choisies sur la base de la vivacité de leurs pratiques maraichères, et de manière à couvrir la variabilité spatiale du site maraîcher. Deux autres parcelles (numérotée de I à II) situées près du barrage et habituellement irriguées par les eaux de puits ont été intégrées à l'étude comme témoins ***(Figure 2)***. En effet, les ressources en eaux utilisées dans le cadre de cette étude proviennent des canaux d'eaux usées industrielles qui longent le bord de la forêt classée et qui collectent les eaux usées de la tannerie TAN-ALIZ, de la Société de brasserie du Burkina (SOBBRA), de la Société National d'Électricité Burkinabé (SONABEL), des industriels de peinture (HAGE Industrie), du marché central Rood-Woko et aussi de l'abattoir [12, 13].

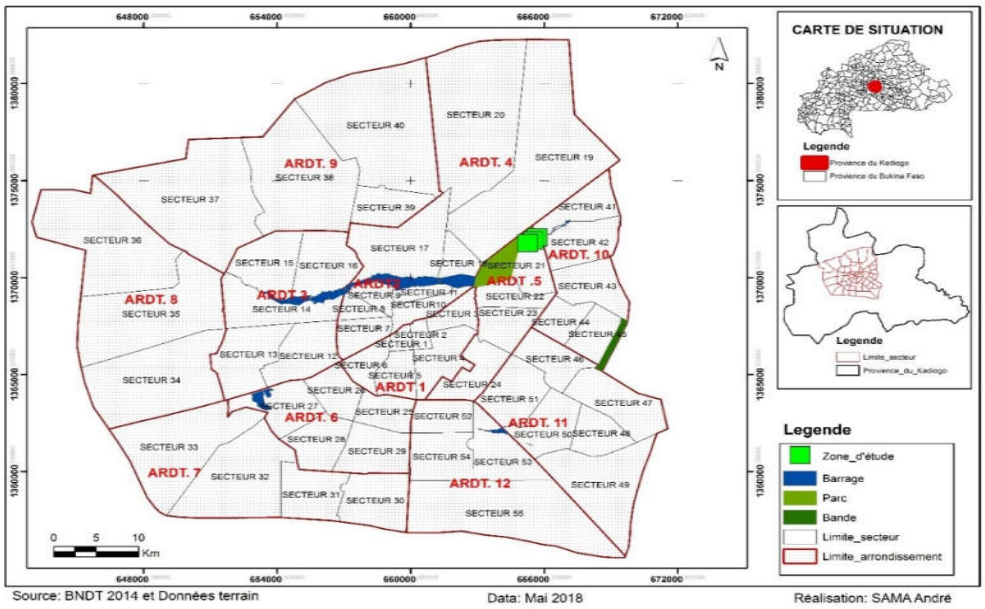

Figure 2 : *Carte de localisation de la zone d'étude (source : Carte du Burkina Faso, source BNDT, 2014)*

2-3. Caractérisation du sol du site expérimental

Pour la caractérisation physico-chimique des sols du site expérimental, des échantillons composites de sol à deux niveaux de profondeur (0 - 20 et 20 - 40 cm) ont été prélevés à l'aide d'une tarière hélicoïdale. Ces échantillons de sols ont été séchés à 40°C pendant quatre jours dans une étuve de marque SHIMADZU et de type STAC S-50M, puis broyés à l'aide d'un appareil mécanique de type TM-25S et tamisés à 0,1 mm et ensachés pour analyse.

2-4. Préparation des échantillons pour analyse chimique

La détermination des métaux lourds totaux a été effectuée selon la technique d'Anderson [14, 15], à travers l'extraction du sol avec l'acide nitrique HNO_3, 2 M (sol : acide 1 : 10) dans un bain d'eau bouillante (100°C) pendant 2 heures. Les fractions des éléments métalliques contenus dans les solutions extraites ont été ensuite lues à l'ICP-AES et par Spectrométrie d'Absorption Atomique à la flamme oxydante de Japan International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS) du Japon.

2-5. Technique de Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectroscopy (ICP - AES)

L'analyse de métaux par ICP-AES repose sur la spectrométrie d'émission atomique. Les échantillons sont placés sous le passeur dans des tubes polypropylènes et chaque valeur est une moyenne de trois lectures. La solution de rinçage est un mélange d'une solution d'acide nitrique et d'acide chlorhydrique à 5 %. Le logiciel utilisé pour le traitement des données est ICP Expert. Les résultats des échantillons sont vérifiés dans le domaine d'analyse à l'aide de la courbe d'étalonnage. Le RSD (Relative Standard Deviation en anglais) est également vérifié et la valeur considérée est inférieure ou égale à 10 %. Le RSD correspond au pourcentage d'erreur entre les trois lectures. Le RSD est défini selon ***l'Expression (1)*** suivante :

$$\mathrm{RSD}\,(\%) = \frac{\sigma\,(\mathrm{mg.L^{-1}})}{\mathrm{M}\,(\mathrm{mg.L^{-1}})}.100 \qquad (1)$$

σ Étant l'écart type sur le signal et M la valeur moyenne des 3 trois mesures.

Les différentes concentrations sont calculées de deux manières selon ***les Équations (2 & 3)*** ci-dessous. On a l'expression en produit brut (PB) définie comme :

$$\mathrm{C(échantillon)(mg.kg^{-1}\ PB)} = \frac{\mathrm{C(échantillon)(mg.L^{-1}).V(minéralisation)(L)}}{\mathrm{masse\ de\ la\ prise\ d'éssai\ (kg)}} \qquad (2)$$

Et l'expression en matière sèche (MS) :

$$\mathrm{C(échantillon)(mg.kg^{-1}\ MS)} = \frac{\mathrm{C(échantillon)(mg.kg^{-1}\ PB).100}}{\mathrm{MS}\,(\%)} \qquad (3)$$

2-6. Paramètre suivi : degré de pollution (PLI)

Le degré de pollution des sols par les métaux lourds dans les sols pollués a été évalué et comparé à travers l'indice de la charge de pollution de Tomlinson et al., [16] ***(Équation 4)***. Cet indice est basé sur les valeurs des facteurs de concentration de chaque métal (CFi) contenu dans le sol.

$$PLI = \sqrt[n]{CF_i \times CF_j \times ... \times CF_n} \quad (4)$$

Le facteur de contamination ***(Équation 5)*** est le rapport de la concentration de chaque métal dans le sol sur la valeur de la concentration naturelle du métal dans le sol du même métal [17 - 19].

$$CF_i = \frac{\text{Concentration du metal i}}{\text{Concentration naturelle du metal i dans le sol}} \quad (5)$$

Cette dernière a été assimilée dans notre étude à la concentration moyenne du métal lourd dans les sols irrigués par les eaux de puits. Pour chaque site échantillonné, l'indice de la charge de pollution peut être calculé comme la racine $n^{ième}$ du produit de n facteurs de concentration. En effet, l'Indice de charge de pollution supérieur à 1 symbolise une pollution.

2-7. Paramètres analysés

Les métaux lourds analysés dans les échantillons de sol prélevés dans le cadre de cette étude sont : Cu, Ni, As, Zn, Pb, Cd, Co, Cr. Une mesure du $pH_{(eau)}$ et de la texture par un test simple a été effectuée au laboratoire.

2-8. Analyses statistiques

Les données collectées ont été saisies à l'aide du logiciel Microsoft Office Excel 2016. L'approche statistique utilisée, est une analyse de la variance (ANOVA) à un facteur du logiciel R version 3.4.3 avec le package Rcommander. La comparaison des concentrations par rapport au témoin, a été rendue possible grâce au test de comparaison des concentrations par la méthode de Newman-Keuls au seuil de probabilité de 5 % [20 - 22]. Les diagrammes ont été réalisés à l'aide du logiciel Rstudio 1.1.463 combiné avec le logiciel R 3.5.2. La valeur X de chaque échantillon est assignée d'une lettre en exposant ($X^{(i)}$ où i = a, b, c, ...). En outre, une analyse de corrélation utilisant XLSTAT version 2017 a été réalisée pour évaluer l'effet de l'argile, des limons, du sable fin, du sable grossier sur certaines propriétés physico-chimiques des sols étudiés et le degré de pollution.

3. Résultats et discussion

3-1. Caractéristiques physiques du sol de l'étude

Le ***Tableau 1*** et la ***Figure 1*** présentent les caractéristiques physiques des sols échantillonnés dans la zone maraîchère. Le pH est considéré comme le principal paramètre chimique contrôlant la biodisponibilité des métaux lourds dans le sol [23 - 25]. Il ressort de l'analyse de la variance une différence significative ($P < 0,001$) entre le pH des sols du site maraicher de Kossodo ***(Tableau 1 et Figure 3)***. En effet, la moyenne du pH (à 25°C) des sols irrigués par les eaux de puits varie de 8,43 à 8,62 contrairement à celles des terrains irrigués avec les eaux usées d'origine industrielle qui est de 7,98 à 8,97. Les sols de ce site maraicher sont donc alcalins. Ceci indique que les eaux usées d'origine industrielle apportées aux sols ont significativement augmenté le pH. Le pH alcalin limite le passage des métaux lourds de la phase solide à la solution du sol puis à la plante [26 - 28]. Elle reflète, au même titre que les argiles et les limons, la nature calcaire de la roche mère ***(Tableau 1)***. La texture des sols étudiés varie des sols témoins aux sols affectés. Les sols témoins (I et II) 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.

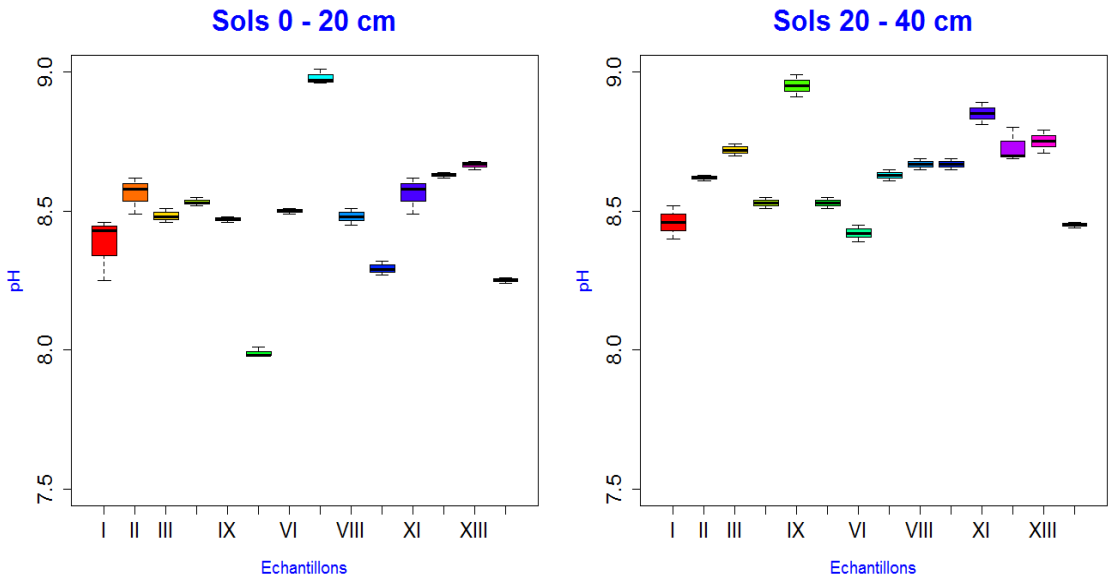

Figure 3 : *Diagrammes en boîtes de moustaches de l'évolution du pH à différentes profondeurs*

Tableau 1 : *Caractéristiques physiques des sols maraîchers de Kossodo*

Parcelles	Horizons (Cm)	pH à 25 °C	Argile	Limon	Sable fin	Sable grossier
			(%)			
I	0-20	8,38^{c}	51,33^{h}	5,80^{b}	9,92^{i}	32,96^{h}
	20-40	8,46^{a}	52,70^{g}	8,44^{h}	7,63^{l}	31,23^{d}
II	0-20	8,56^{de}	52,35^{i}	8,95^{h}	7,83^{i}	30,86^{c}
	20-40	8,62^{c}	57,35^{m}	7,33^{e}	7,74^{m}	27,58^{a}
III	0-20	8,48^{d}	61,25^{n}	10,55^{k}	4,83^{b}	23,37^{a}
	20-40	8,72^{de}	56,65^{l}	8,70^{i}	5,57^{d}	29,08^{b}
IV	0-20	8,53^{d}	49,65^{f}	12,93^{n}	5,35^{c}	32,07^{f}
	20-40	8,53^{b}	52,69^{g}	11,64^{l}	5,15^{b}	30,32^{c}
V	0-20	7,99^{a}	51,02^{g}	7,80^{e}	5,32^{c}	35,86^{i}
	20-40	8,53^{b}	55,05^{i}	4,36^{a}	7,38^{i}	33,21^{e}
VI	0-20	8,50^{d}	41,67^{c}	12,45^{m}	7,43^{h}	38,47^{k}
	20-40	8,42^{a}	43,23^{c}	14,63^{m}	6,45^{e}	35,69^{g}
VII	0-20	8,98^{g}	51,49^{i}	10,27^{i}	7,15^{g}	31,49^{e}
	20-40	8,63^{c}	50,63^{e}	9,95^{k}	7,95^{n}	31,47^{d}
VIII	0-20	8,48^{d}	56,32^{m}	8,33^{g}	4,05^{a}	31,3^{d}
	20-40	8,67^{cd}	56,33^{k}	5,65^{b}	5,02^{a}	33,00^{e}
IX	0-20	8,47^{d}	44,57^{d}	9,33^{i}	7,87^{i}	38,23^{i}
	0-20	8,95^{g}	43,02^{b}	8,33^{g}	6,92^{g}	41,73^{i}
X	0-20	8,29^{b}	36,02^{a}	6,35^{c}	6,40^{d}	51,25^{n}
	20-40	8,67^{cd}	37,68^{a}	8,33^{g}	7,23^{h}	46,76^{i}
XI	0-20	8,56^{de}	39,75^{b}	7,89^{f}	6,87^{f}	45,49^{m}
	20-40	8,85^{f}	46,38^{d}	7,02^{d}	6,60^{f}	40,00^{h}
XII	0-20	8,63^{ef}	54,25^{l}	11,33^{l}	6,65^{e}	27,77^{b}
	20-40	8,70^{de}	53,20^{h}	9,87^{i}	7,53^{k}	29,4^{b}
XIII	0-20	8,67^{f}	49,23^{e}	6,75^{d}	4,89^{b}	39,13^{l}
	20-40	8,75^{e}	51,25^{f}	8,10^{f}	5,45^{c}	35,20^{f}
XIV	0-20	8,25^{b}	54,12^{k}	5,25^{a}	7,85^{i}	32,78^{g}
	20-40	8,45^{a}	53,26^{i}	6,35^{c}	7,33^{i}	33,06^{e}
ddl		13	13	13	13	13
Pr > F		0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Lsd	0-20	0,072	0,068	0,073	0,064	0,108
	20-40	0,056	0,050	0,045	0,036	0,455
Signification (5%)		***	***	***	***	***

les résultats sont les moyennes de 3 répétitions ; * = très hautement significatif ; Test Student Newman-Keuls au seuil de 5 % ; la différence n'est pas significative entre les valeurs affectées par une même lettre dans une même colonne et profondeur.*

3-2. Teneurs de métaux lourds dans les sols irrigués par les eaux usées

L'analyse de la variance à un facteur des résultats de métaux lourds montre que les concentrations de Pb, As, Cu, Cr, Ni et Zn dans les sols irrigués par les eaux usées d'origine industrielle excèdent significativement celles des sols non affectés ***(Figure 4)***. L'arsenic est un élément cancérigène [3, 29 - 31] et est 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 %.

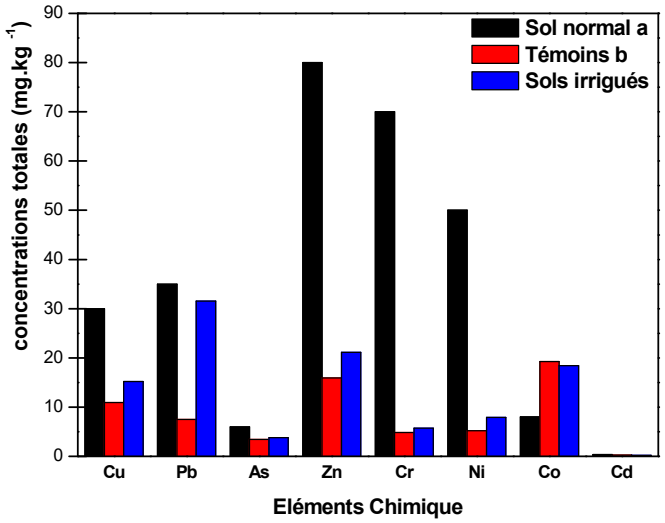

Figure 4 : *Comparaison des concentrations totales (mg. L^{-1}) des éléments dans les sols du site maraîcher de Kossodo (0 - 40 cm) selon Bowen* [32]
a : valeurs moyennes, b : concentrations moyennes
Les résultats sont les moyennes de 3 répétitions avec une erreur comprise de 2,3 %

L'analyse des résultats ***(Figure 4)*** obtenus montre que les métaux lourds issus des eaux usées d'origines industrielles du site maraîcher de Kossodo selon leur teneur peuvent être considérés comme polluants métalliques. En effet, les concentrations moyennes de ces polluants n'excèdent pas les valeurs maximales fixées par l'OMS [33] ; mais toutefois, le plomb est le principal polluant métallique (193 $mg.kg^{-1}$) avec une valeur critique supérieure à celle de l'OMS (100 ppm) [34]. Ce métal est utilisé dans la verrerie [35, 36] et proviendrait donc d'une unité industrielle d'aluminium (JESSI-Alu) installée dans la zone industrielle de Kossodo. Suivi du zinc avec une teneur peu élevée qui peut former un amalgame avec le plomb. Cette valeur élevée peut provoquer une baisse de fertilité des sols voir menacer exponentiellement la santé humaine [35]. Les sols du site maraîcher irrigués par les eaux usées sont par contre moyennement pourvus en Cu, Cr, As, Ni et Zn.

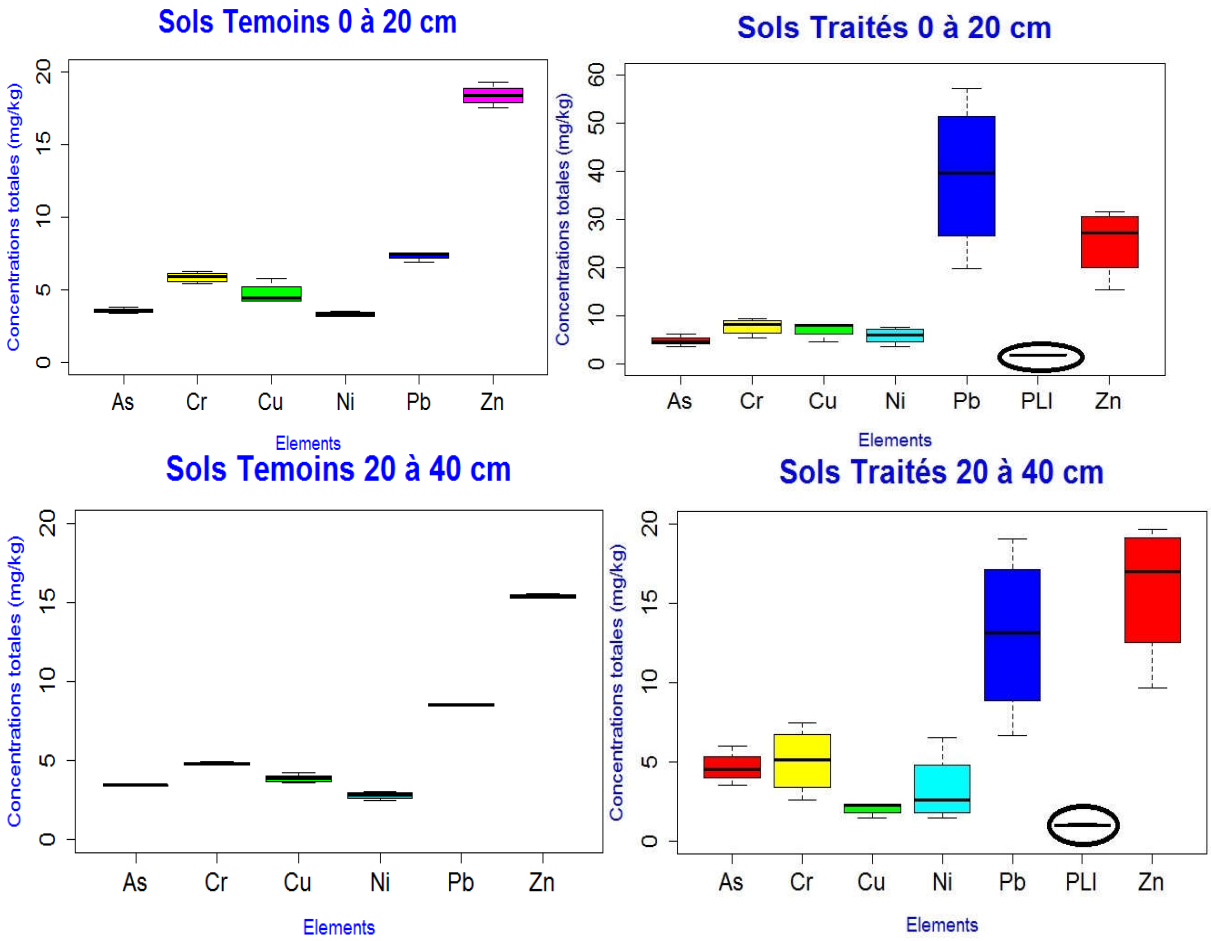

Figure 5 : *Diagrammes en boîtes de moustaches des concentrations moyennes (mg.L^{-1}) des métaux lourds et oligo-éléments et les valeurs de PLI à différentes profondeurs des sols affectés ou témoins, teneurs moyennes de trois répétitions*

Les concentrations moyennes des métaux lourds ***(Figure 5)*** dans les deux types de couches de sols affectés sont supérieures à celles obtenues des couches équivalentes des sols témoins. La lecture de cette même figure montre que les sols analysés (irrigués par les eaux usées) sont affectés par les métaux As, Cu, Ni, Cr et Zn, provenant probablement des produits chimiques industriels, d'où la relative accumulation de ces métaux dans la couche (0 - 20 cm). Par contre, dans les sols témoins, le plomb 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 industrielles, se répartit équitablement dans les couches (0 - 20 cm) et (20 - 40 cm) ; sa progression dans le profil du sol serait due à sa taille d'émission par les fonderies. La concentration en Pb, à la différence du Zn, reste constante 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 trois fois plus polluée que les terrains témoins. Cette pollution (1,77) baisse significativement 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 du sol, notamment l'argile. Cette dernière est en effet imperméable et se concentre davantage en profondeur.

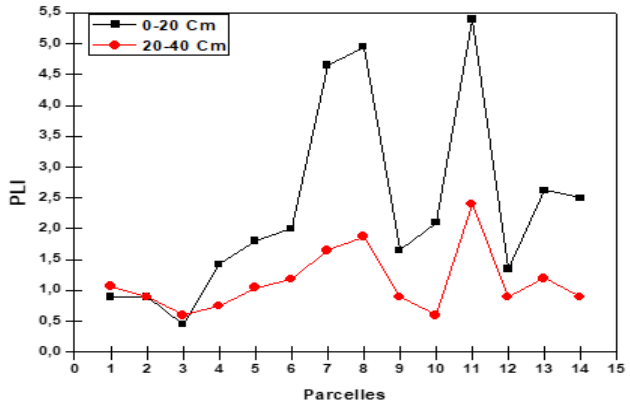

Figure 6 : *Indices de pollution des parcelles étudiées. 1 et 2, parcelles témoins*

Les résultats ***(Figure 6)*** du degré de pollution (PLI) des parcelles témoins (1 et 2) obtenus présentent des valeurs similaires, mais une variation de cet indice de pollution apparaît d'une parcelle affectée à une autre. En effet, cette variation s'explique par la différence de fréquence d'irrigation, du volume d'eau usée industrielle apporté à chaque irrigation, du nombre d'années pendant lesquelles le terrain a été irrigué, de la topographie du terrain et des inondations. La parcelle 3 est le moins pollué de tous les terrains affectés du fait qu'il sujet au lessivage lors des pluies. L'analyse des résultats de la ***Figure 7*** montre que les parcelles irriguées par les eaux usées d'origine industrielle ne conservent pas toujours leur niveau de pollution d'un métal à un autre. Ceci pourrait aussi s'expliquer par l'irrigation des terrains à des moments différents. En effet, la composition quotidienne des eaux industrielles dépend de la mise en activité ou non des industries de la zone d'étude.

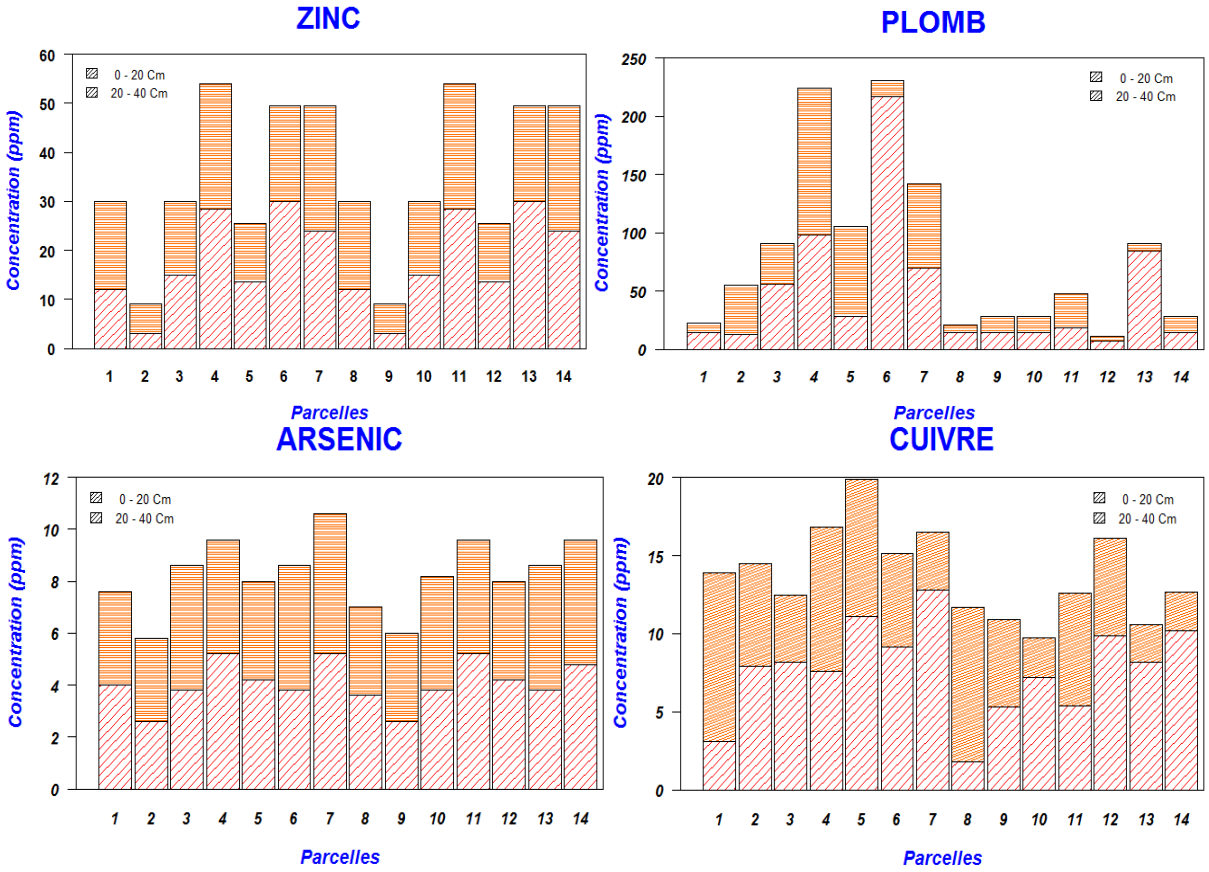

Figure 7 : *Digrammes à barres cumulées de l'évolution de la concentration des polluants sur les parcelles étudiées. 1 et 2, parcelles témoins*

3-3. Propriétés physico-chimiques des sols à la fin des expériences

Les résultats des analyses de corrélation sont consignés dans le ***Tableau 2*** ci-dessous.

Tableau 2 : *Matrix de corrélation de Bravais-Pearson entre l'argile, le limon, le sable fin, le sable grossier et les métaux lourds dans le sol*

Variables	Argile	Limon	Sable fin	Sable grossie	pH	As	Pb	Cu	Zn	Co	Ni	Cr	Cd	PLI
Argile	**1**													
Limon	-0,137	**1**												
Sable fin	-0,234	-0,097	**1**											
Sable grossie	**-0,919**	-0,218	0,079	**1**										
pH	-0,421	-0,036	0,304	0,383	**1**									
As	-0,124	-0,049	0,207	0,109	**0,627**	**1**								
Pb	-0,276	-0,284	-0,208	0,431	0,275	0,137	**1**							
Cu	-0,107	-0,260	-0,380	0,281	0,165	-0,129	0,220	**1**						
Zn	-0,173	-0,230	0,046	0,257	**0,618**	**0,714**	**0,661**	0,212	**1**					
Co	-0,319	-0,141	0,439	0,292	0,233	0,268	-0,105	-0,277	-0,048	**1**				
Ni	-0,043	-0,490	0,425	0,141	0,331	0,254	0,021	0,003	0,234	0,373	**1**			
Cr	0,150	-0,372	0,306	-0,076	-0,077	0,115	-0,069	-0,372	0,031	0,163	**0,695**	**1**		
Cd	-0,200	-0,199	0,002	0,278	0,192	0,023	0,083	0,415	0,102	**-0,555**	-0,217	-0,200	**1**	
PLI	-0,195	-0,206	-0,204	0,320	0,444	0,452	**0,886**	0,209	**0,831**	-0,148	-0,124	-0,224	0,174	**1**

Les valeurs en gras indiquent que la corrélation est significative au seuil de 5% (test bilatéral). As : Arsenic ; Pb : plomb ; Zn : zinc ; co : cobalt ; Ni : Nickel ; Cr : chrome ; Cd : cadmium ; Cu : cuivre ; PLI : degré de pollution

L'analyse du ***Tableau 2*** montre une influence positive de l'argile, mais non significative sur les métaux lourds polluants du sol. À l'exception du chrome, elle entraîne une diminution de ces métaux dans le sol. La présence du limon dans le sol entraîne également une légère diminution de la teneur de ces métaux dans le sol et une diminution significative dans la teneur du Nickel. Sur ce même tableau, tandis que la teneur du Pb, du Cu, du Zn et le PLI dans les sols irrigués est légèrement influencée par le sable fin, il accroît la teneur des autres propriétés chimiques dans le sol. Par contre, le sable grossier entraîne une légère augmentation de la teneur de ces éléments dans le sol à l'exception du Chrome dont la teneur est en baisse. Le pH étant basique, l'argile et le limon contribuent à diminuer la basicité du sol. Par contre le sable fin et le sable grossier augmentent cette basicité.

4. Conclusion

Ce travail sur l'évaluation de l'effet des eaux usées brutes d'origines industrielles sur les paramètres physico-chimiques des sols a particulièrement révélé une pollution au plomb des sols irrigués par les eaux usées du site maraicher de Kossodo. Il revient de dire d'après cette étude que certaines valeurs de cet élément excèdent en effet le seuil critique de 100 ppm fixé par l'OMS. Les eaux usées enrichissent également les sols de zinc, de cuivre, de chrome, d'arsenic et de Nickel. 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 environ 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. 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. Cette pollution varie selon les parcelles et selon les polluants. D'une manière générale, le système de maraîchage par l'utilisation des eaux usées d'origines industrielles a eu des impacts plus ou moins différents sur les paramètres physico-chimiques des sols et a fortement contribué à la détérioration de la qualité physico-chimique des sols.

Remerciements

L'auteur correspondant exprime sa gratitude au professeur émérite de chimie analytique Jean Boukari LEGMA, de l'USTA qui malgré son âge ne cesse de toujours accompagner les jeunes chercheurs.

Références

[1] - M. MENCH, A. MANCEAU, J. VANGRONSVELD, H. CLIJSTERS, B. MOCQUOT, *Agronomie,* 20 (4) (2000) 383 - 397, 10.1051/agro:2000135

[2] - Y. GUERO, A. TIDJANI, K. AMBOUTA, C. FEIDT, T. STERCKEMAN, G. ECHEVARRIA, *Revue des Bioressources,* 257 (1622) (2013) 1 - 14, 10.12816/0008874

[3] - A. B. EL MOSTAFA HASSOUNE, Y. KOULALI, D. HADARBACH, *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat,* (28) (2006) 61 - 71

[4] - H. SCHERZ, E. KIRCHHOFF, *Journal of Food Composition and Analysis,* 19 (5) (2006) 420 - 433, https://doi.org/10.1016/j.jfca.2005.10.004

[5] - ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE, Utilisation des eaux usées en agriculture, *OMS*, 1ère Edition, (2012) 26

[6] - R. ADJIA, "*Métaux lourds dans les légumes des jardins maraîchères de Ngaoundéré: niveau de toxicité et source de contamination*", Thèse de Doctorat PhD, Université de Ngaoundéré, (2010) 212 p.

[7] - O. B. SMITH, P. MOUSTIER, L. J. MOUGEOT, A. FALL, Développement durable de l'agriculture urbaine en Afrique francophone : enjeux, concepts et méthodes, *CRDI, Ottawa, ON, CA*, (2004) 145

[8] - D. F. BEZDICEK, R.I. PAPENDICK, R. LAL, in : J.W. Doran, A.J. Jones (Eds.) Methods for assessing soil quality, *Soil Science Society of America, Madison, WI*, (1996) 1 - 8

[9] - M. OUAKKI, N. FEKHER-EDDINE, *Projet de fin d'études, MST Protection de l'Environnement, FST de Béni Mellal.*, (2001) 45 p.

[10] - C. K. M. G. KEDOWIDE, "*SIG et analyse multicritère pour l'aide à la Décision en agriculture urbaine dans les pays en développement cas de Ouagadougou au Burkina Faso*", Université Paris 8, Vincennes - Saint Denis, (2011) 300 p.

[11] - A. M. ABDOULKADRI, G. BOUBIÉ, *International Journal of Biological and Chemical Sciences,* 9 (1) (2015) 517 - 533, http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v9i1.44

[12] - K. KABOOSI, *Applied Water Science,* 7 (5) (2017) 2385 - 2396, 10.1007/s13201-016-0420-5.

[13] - J. SAWADOGO, D. BAMBARA, A. KABORE, K. M. SOULEY, P. J. D. A. COULIBALY, M. BOUGOUMA, J. B. LEGMA, *International Journal of Innovation and Applied Studies,* 24 (2) (2018) 534 - 545, http://www.ijias.issr-journals.org/

[14] - A. ANDERSSON, *Swed. J. Agric. Res.; (Sweden),* 6 (1976) 19 - 25

[15] - Š. BAVEC, H. BIESTER, M. GOSAR, *Journal of Geochemical Exploration,* 187 (2018) 131 - 140, https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.05.005

[16] - D. TOMLINSON, J. WILSON, C. HARRIS, D. JEFFREY, *Helgoländer meeresuntersuchungen,* 33 (1) (1980) 566

[17] - B. BENDRA, S. FETOUANI, X. LAFFRAY, M. VANCLOOSTER, M. SBAA, L. ALEYA, *Irrigation and Drainage,* 61 (4) (2012) 507 - 519, https://doi.org/10.1002/ird.688

[18] - M. IRANDOOST, A.S. TABRIZ, *SOLID EARTH DISCUSS,* (2017) 1 - 13, 10.5194/se-2017-6, 2017

[19] - R. FUGE, K. JAMES, *MARINE POLLUTION BULLETIN,* 5 (1) (1974) 9 - 12, https://doi.org/10.1016/0025-326X(74)90026-5

[20] - J. SAWADOGO, M. BOUGOUMA, A. A. MAHAMANE, M. A. MAMAN, A. KABORE, M. B. POUYA, J. B. LEGMA, M. P. SEDOGO, *Afrique SCIENCE,* 12 (3) (2016) 160 - 170, http://www.afriquescience.info

[21] - K. COULIBALY, A. P. K. GOMGNIMBOU, M. TRAORE, J. F. K. SANON, H.B. NACRO, *Science et technique, Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique,* 1 (1) (2018) 273 - 282
[22] - M. A. MAMAN, J. SAWADOGO, D. BAMBARA, M. BOUGOUMA, J. B. LEGMA, *International Journal of Biological and Chemical Sciences,* 11 (5) (2017) 2521 - 2536, https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v11i5.45
[23] - S. BRALLIER, R. B. HARRISON, C. L. HENRY, X. DONGSEN, *Water, Air, and Soil Pollution,* 86 (1 - 4) (1996) 195 - 206
[24] - P. JONAS, G. MILLWARD, *Marine Pollution Bulletin,* 61 (1 - 3) (2010) 52 - 67, https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.12.013
[25] - J. ÁRVAY, L. DEMKOVÁ, M. HAUPTVOGL, M. MICHALKO, D. BAJČAN, R. STANOVIČ, J. TOMÁŠ, M. HRSTKOVÁ, P. TREBICHALSKÝ, *Ecotoxicology and environmental safety,* 144 (1) (2017) 236 - 244, https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.020
[26] - G. THEISSEN, *Nouvelles économiques, Afrique Agriculture,* 232 (1) (1995) 12
[27] - I. THORNTON, *International Council on Metals and the Environment,* 1 (1) (1996) 1 - 4
[28] - ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE, Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excreta et des eaux ménagères, Volume IV: utilisation des excreta et des eaux ménagères en agriculture, *Bibliothèque de l'OMS*, (2012) 22
[29] - C. J. CHEN, C. CHEN, M. WU, T. KUO, *British journal of cancer,* 66 (5) (1992) 888, https://doi.org/10.1038/bjc.1992.380
[30] - S. H. CHIEN, F. J. SIKORA, R. J. GILKES, M. J. MCLAUGHLIN, *Nutrient Cycling in Agroecosystems,* 92 (1) (2012) 1 - 8, 10.1007/s10705-011-9467-8
[31] - ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE, Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excreta et des eaux ménagères, Volume I : considérations d'ordre politique, *Bibliothèque de l'OMS*, (2012) 128
[32] - H. J. M. BOWEN, Environmental chemistry of the elements, *New York : Academic Press.*, (1979) 333
[33] - ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE, Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excreta et des eaux ménagères, Volume II : utilisation es eaux usées en agriculture, *Bibliothèque de l'OMS*, (2012) 254
[34] - ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE, Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, excreta et des eaux ménagères, Volume III: Utilisation des eaux usées et des excreta en aquaculture, *Bibliothèque de l'OMS*, (2012) 182
[35] - E. TEMGOUA, H. N. TSAFACK, H. PFEIFER, T. NJINE, *African crop science journal,* 23 (1) (2015) 35 - 44
[36] - R. HÄNSCH, R. R. MENDEL, *Current opinion in plant biology,* 12 (3) (2009) 259 - 266, https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.05.006