

Impact des rejets miniers liquides de l'usine Chemical of Africa (CHEMAF) en activité sur la qualité des eaux souterraines au Quartier Tshamilemba à Lubumbashi (Katanga/R.D. Congo)

[Impact of liquid tailings of Chemical Plant of Africa (CHEMAF) in activity on groundwater quality in the area Tshamilemba in Lubumbashi (Katanga/DR. Congo)]

S. Kashimbo Kalala¹, B. Mongoli Mwanga¹, P. Kazadi Kanyama², and M. Mpundu Mubemba¹

¹Département de Phytotechnie, Faculté des Sciences Agronomiques, Université de Lubumbashi, BP 1825, R.D. Congo

²Département de Biochimie, Faculté de Médecine Vétérinaire, Université de Lubumbashi (2012), B.P 1825, R.D. Congo

Copyright © 2015 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Hydrometallurgical Plant Chemical of Africa (CHEMAF) is causing high concentrations of ETM found today in soils and water wells, due to its liquid effluent discharges out of its site. Indeed, two transects were established at district summers Tshamilemba to collect soil and water samples in the wells distributed along the two transects. The first has 7 GW1 point, GW2, GW3, GW4 GW 11, GW12, GW13 and the second six points GW5 GW6, GW7, GW8, GW9 and GW10. Laboratory test results indicate the presence of high concentrations of trace elements in the water with 4.112 mg/L at 13 wells, 90.551mg/L in well 1 for lead. These values exceed the WHO limit value of 2 mg/L (Cu) and 0.1mg/L (Pb). Cd presents 5.234 mg/L in 1, while the threshold value is set to 0.003 mg/L. In soil, there are also copper grades ranging from 140.8mg / kg in point 11, 945.2mg/kg in 3, these values are higher than the limit value of 100 mg/kg. Copper in high contents are encountered in the sample wells on the first transect nearby CHEMAF plant. The high contents of Cu, Pb, Cd are therefore responsible for the extinction of some plant families of different skin and respiratory diseases encountered in many people (especially young people) living in this area and especially Tshamilemba pollution Environment.

KEYWORDS: Groundwater, wells, transfer, Groundwater, ETM, Environment, Tshamilemba.

RÉSUMÉ: L'usine Hydrométallurgique Chemical of Africa (CHEMAF) est à l'origine de fortes concentrations en ETM constatées de nos jours dans les sols et les eaux des puits, du fait de ses rejets d'effluents liquides hors de son site. En effet, deux transects ont été établis au quartier Tshamilemba afin de prélever les échantillons de sols et d'eaux dans les puits repartis le long de ces deux transects. Le premier a 7 points GW1, GW2, GW3, GW4, GW 11, GW12 et GW13 et le deuxième 6 points GW5, GW6, GW7, GW8, GW9 et GW10. Les résultats d'analyse de laboratoire indiquent la présence de fortes teneurs en éléments traces dans l'eau avec 4.112 mg/L au puits 13, 90.551mg/L au puits 1 pour le plomb. Ces valeurs dépassent la valeur limite de l'OMS fixée à 2 mg/L (Cu) et 0.1mg/L (Pb). Le Cd présente 5.234 mg/L au point 1 alors que la valeur seuil est fixée à 0.003 mg/L. Dans le sol, on note également des teneurs en cuivre variant entre 140.8mg/Kg au point 11, 945.2mg/Kg au point 3, ces valeurs sont supérieures à la valeur limite fixée à 100mg/Kg. Les teneurs élevées en cuivre sont rencontrées dans les échantillons des puits situés sur le premier transect à proximité de l'usine CHEMAF. Les fortes teneurs en Cu, Pb, Cd sont donc responsables de l'extinction de certaines familles des plantes, de différentes maladies dermatologiques et respiratoires rencontrées chez plusieurs personnes (surtout chez les jeunes) vivant dans ce quartier Tshamilemba et surtout de la pollution de l'Environnement.

MOTS-CLEFS: Eaux souterraines, puits, transfert, Nappe phréatique, ETM, Environnement, Tshamilemba.

1 INTRODUCTION

L'exploitation minière de métaux de base (Cu, Co, Pb, Zn) au Katanga est comptée parmi les activités industrielles génératrices de sérieux problèmes de pollution métallique des ressources en eau [1, 2]. L'on a recensé une dizaine d'usines hydrométallurgiques en province n'étant pas dotées d'un système de recyclage des effluents liquides, déchets finaux des procédés métallurgiques. Ces déchets toxiques résultant des activités minières et métallurgiques sont massivement déversés sans traitement préalable dans le milieu (Rivières) et entraînent la contamination des eaux de surface, des sédiments, des sols et des eaux souterraines avec comme conséquences la contamination de la chaîne alimentaire et la perte de la biodiversité aquatique [3]. En plus de leur charge en métaux lourds, les résidus qui résultent des procédés métallurgiques de l'usine CHEMAF sont enrichis en sulfures de fer qui restent sous forme des remblais non exploitables [4, 5]. L'oxydation de ces minéraux sous l'action de l'eau et de l'oxygène atmosphérique permet aux résidus de produire, en absence des minéraux neutralisants, des effluents dont les eaux sont généralement acides et chargées en micropolluants minéraux et en ions majeurs, notamment les sulfates [6, 7]. Ces lixiviats appelés drainage minier acide (DMA) ou neutre (DMN), dont les processus chimiques et biologiques de formation sont largement décrits dans la littérature [8, 9], constituent une source de nuisance pour l'environnement en général. Dans le cas des écosystèmes aquatiques souterrains, ce phénomène a été remarqué dans plusieurs pays où il y avait des exploitations minières des gisements sulfurés [2, 10, 11]. Les effets des rejets de ces usines de production de cuivre au Katanga se révèlent être négatifs pour l'environnement dans toutes les parties du district ou la Gécamines a fonctionné. En plus des contaminations en éléments traces métalliques, la pression anthropique est en pleine croissance, ce qui renforce les effets sur l'environnement [12].

Le quartier Tshamilemba, situé en aval du complexe industriel Chemical of Africa (CHEMAF) reçoit des quantités énormes d'effluents liquides chargés en substances dangereuses depuis plusieurs années. L'hydrogéologie indique que les eaux souterraines coulent de l'amont, au niveau du quartier Kigoma en passant par l'usine CHEMAF vers l'aval dans les habitations du quartier Tshamilemba suivant la topographie et terminent sur les sols et dans les puits d'eaux utilisés pour la réalisation des besoins primaires. Les résultats de l'étude indiquent que les ETM à l'instar du Cu, Co, Cd, Pb ont été trouvés en quantités excessives dans les échantillons d'eau et de sols prélevés à Tshamilemba. Ils forment différentes associations sous forme des groupes lorsqu'on réalise une ACP. Les groupes 1, 2 et 3 représentant respectivement les puits P1, P2, P3, P4, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13 présentent un danger au regard des résultats de la concentration en ETM dans l'eau souterraine, le sol des jardins ainsi qu'au regard des résultats sur les paramètres physico-chimiques.

L'objectif de cette étude était de déterminer les niveaux des teneurs en ETM dans les eaux des puits et les sols du quartier Tshamilemba, ainsi que les différents paramètres physico-chimiques impliqués dans les mécanismes de transfert de ceux-ci à travers les couches du sol jusqu'à la nappe phréatique afin d'évaluer le risque de contamination de l'environnement et surtout de la chaîne alimentaire par l'intermédiaire de cette eau polluée prélevée au regard des valeurs en ETM trouvées.

2 MILIEU, MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 SITE D'ÉTUDE

Le site d'étude retenu dans la présente recherche est le quartier Tshamilemba, situé non loin du centre ville de Lubumbashi, dans la commune annexe de la chefferie Kaponda. Il est entouré au Sud par l'école Djandja, à l'Est par l'entreprise CHEMAF, usine hydrométallurgiques de traitement et d'enrichissement des minerais et à l'Ouest par la rivière qui porte son nom. La figure ci-dessous présente une vue sur le site d'étude et la localisation de 13 points d'échantillonnage de l'eau et des sols (**Figure 3**).



Figure 1: Localisation de la zone d'étude et des points de collecte (GW1 à GW13)

Le site d'étude est situé à 1257 m d'altitude, à 11°39'00.67" de Latitude Sud et à 27° 29'57.72" de Longitude Est. Du point de vue topographique, elle est située sur une pente légèrement faible par rapport au site de CHEMAF. Ce qui explique le débordement des eaux des pluies ainsi que celles usées de l'enceinte de l'usine de CHEMAF, emportant tout au passage jusque dans les parcelles de la population du quartier Tshamilemba malgré le système de drainage construit par celle-ci. Le tableau suivant donne les coordonnées de la zone, le niveau de l'eau dans chacun des puits, ainsi que la situation particulière autour de ces différents puits à observer (**Tableau 1**).

Tableau 1: Situation géographique, caractérisation floristique et Niveau d'eau dans les puits

Identific ation	Coordonnées géographiques		Végétation	Niveau de l'eau Dans les puits	Situation autour du puits
	Latitude(S)	Longitude(O)			
GW001	11°30'47.0"	27°38'17.5"	Petit jardin.	30Cm	Moins protégé Loin de la toilette.
GW002	11°38'47.2"	27°30'14.6"	Petit jardin et des bananiers.	30cm	Protégé et loin de la toilette
GW003	11°38'49.2"	27°30'09.9"	Presque pas de végétation.	178Cm	Protégé mais, non loin de la toilette.
GW004	11° 38' 51.9"	27° 30' 39.09"	<i>Manihot esculenta</i> , <i>Hyparrhenia rufa</i> <i>Euphorbia hista</i> .		Protégé, toilette , poubelle à coté.
GW005	11°38'50.9"	27°30'09.9"	<i>Hyparrhenia</i> , <i>Saccharum officinarum</i> , <i>Euphorbia hista</i> .	30Cm	Toilette éloignée. A coté de la poubelle
GW006	11°38'51.4"	27°30'19.4"	Fleurs ornementales.	20Cm	Protégé, toilette moins éloignée.
GW007	11°38'53.5"	27°30'11.4"	<i>Elais guinneensis</i> <i>Paspalum notatum</i> , <i>Hyparrhenia rufa</i> .	40Cm	Loin de la toilette et bien protégé
GW008	11°39'03.2"	27°30'03.7"	Jardin, fleurs ornementales.	75Cm	Protégé, avec tranchées.
GW009	11°39'08.4"	27°29'57.7"	<i>Tithonia diversifolia</i> , fleurs ornementales.	150Cm	Protégé et loin de la toilette.
GW010	11°39'08.4"	27°29'50.9"	<i>Imperata cylindrica</i> , <i>hyparrhenia rufa</i> , <i>Euphorbia hista</i> .	155Cm	Protégé et loin de la toilette.
GW011	11°39'00.7"	27°29'47.9"	<i>Citrus</i> et <i>Persea americana</i> , <i>Imperata cylindrica</i>	130Cm	Protégé et loin de la toilette.
GW0012	11°38'59.4"	27°29'53.6"	<i>Persea americana</i> , fleurs ornementales.	1Cm	Moins éloigné.
GW0013	11°38'54.0"	27°30'03.3"	Presque pas de végétation.	60Cm	Bien protégé et éloigné.

2.2 MATÉRIELS

2.2.1 MATÉRIELS À ANALYSER

2.2.1.1 LE SOL

Les sols de ce quartier appartiennent au groupe de ferralsol tel que spécifié en séries selon la description de Van Wambeke [13]. Les échantillons des sols ont été récoltés chaque fois à coté du puits ou l'on a prélevé l'échantillon d'eau, à l'aide de la tarière et à 30 cm de profondeur.

2.2.1.2 L'EAU

Tshamilemba demeure parmi les quartiers de la ville de Lubumbashi à avoir de sérieux problèmes concernant la desserte en eau potable, car pour tout ce quartier, on ne trouve qu'un seul point d'eau estimée potable (eau de robinet) où elle ne coule qu'à des heures bien établies. Situé au centre du quartier à coté du terrain de football, cette denrée (Eau potable) est

rare dans ce quartier, cela justifie l'usage abondant de l'eau de puits pour tous les travaux ménagers. L'on note presque dans chaque parcelle la présence d'un puits d'eau.

2.2.2 MATÉRIELS DE TERRAIN

2.2.2.1 MATÉRIELS SERVANT A LA RECOLTE DES ÉCHANTILLONS DE SOLS ET DE L'EAU

Les matériels ci-dessous ont servi à la récolte des échantillons d'eau et de sols sur le terrain, au quartier Tshamilemba. Il s'agit de:

- Bouteilles plastiques;
- Sachets en polyéthylène;
- Gants en latex sans talc;
- Formulaire de prise des paramètres de terrain;
- Eau distillée;
- Détergent;
- Sac plastique dur pour le transport des échantillons;
- Pinceau;
- Bidon de 2 litre;
- Mètre ruban d'environ 3m.

2.2.2.2 LES APPAREILS

Le travail sur le terrain exige pour son bon déroulement, un ensemble d'appareils permettant le prélèvement des paramètres de terrain ainsi que les coordonnées géographiques. Il s'agit d':

- Un multi probe HACH HQ40 pour la détermination de certains paramètres tel que le pH et la conductivité de l'eau;
- Un GPS pour les coordonnées géographiques;
- Une montre pour préciser l'heure de prélèvement;
- Un appareil photo.

2.3 METHODOLOGIE DE TERRAIN POUR LE PRELEVEMENT DES ÉCHANTILLONS D'EAU ET DE SOLS

Deux transects parallèles ont été établis le long du mur séparant l'usine CHEMAF du quartier Tshamilemba. Le premier situé à 2 m du mur de CHEMAF est long d'environ 200m et a comporté 7 points de prélèvement à savoir GW1, GW2, GW3, GW4, GW13, GW12, GW11. Le second transect, ayant la même longueur que le premier se trouve à une distance d'à peu près 70m du mur de CHEMAF. Il comporte 6 points de prélèvement espacés l'un de l'autre de 10 à 20m : il s'agit des points GW5, GW6, GW7, GW8, GW9, GW10. Il convient de signaler que dans la partie couverte par le second transect, l'usage de l'eau de puits est généralisé: la vaisselle, la lessive sans omettre le bain pour certains ménages n'ayant pas la possibilité de parcourir de longs trajets afin d'avoir l'eau de robinet.

2.3.1 ÉCHANTILLONNAGE DE L'EAU

Les échantillons d'eau ont été prélevés dans les différents puits au moyen d'un bidon plastique préalablement nettoyé à l'eau distillée. Sur le premier transect, 7 puits ont fait l'objet d'un prélèvement d'eau, qui sera ensuite envoyé au laboratoire pour analyse. Des bouteilles plastiques ont servi à recevoir de l'eau, après avoir été puisée du puits à l'aide d'un bidon auquel est attaché une corde. Le rinçage de ce bidon à l'eau distillée se fait chaque fois que l'on passe d'un point à un autre. Ceci pour réduire le temps soit peu, l'apparition d'une source de contamination externe des échantillons pouvant conduire finalement à des résultats faussés et erronés [14].

2.3.2 ÉCHANTILLONNAGE DE SOL

Les échantillons de sol ont été prélevés selon la méthode aléatoire à l'aide de la tarière et chaque fois à une profondeur de 30cm. Il a été convenu de choisir un endroit non loin du puits et, qui n'a pas été perturbé par les activités anthropiques.

2.4 MÉTHODE DE LABORATOIRE

2.4.1 PRÉPARATION DE L'ÉCHANTILLON

Après l'étape de terrain, les 13 échantillons de sols ont été séchés à l'air libre (au soleil). Vient ensuite, le broyage des échantillons, qui a consisté à réduire les grosses mottes en fraction plus petites avant de les soumettre au tamis de 2mm afin d'obtenir la partie fine(Argile), matière de base sur laquelle les analyses physico-chimiques peuvent être réalisées.

Les échantillons d'eau passeront par une digestion d'acide simple pour l'examen des Eaux potables et usées [15] : un volume de 10 ml de chaque échantillon d'eau préalablement acidifié est placé dans une éprouvette à laquelle est ajoutée un volume de 0,5 ml d'acide nitrique ultra pur(concentration résiduelle en ETM < 10 ppm), puis les éprouvettes sont mises dans un bloc chauffant à 105°C sous une hotte pendant 2 h Sans atteindre l'ébullition. Une fois refroidies, les éprouvettes sont diluées à 10 ml avec de l'eau ultra-pure type IASTM puis stockées à 4°C en attendant les analyses.

2.4.2 LES ANALYSES DEMANDÉES

2.4.2.1 LA CONCENTRATION EN ETM DANS L'EAU

L'eau ainsi échantillonnée sera analysée à " l'Inductively Coupled Plasma" (*ICP*) autrement dit « plasma à couple inductif » (*PCI*). L'objectif étant de déterminer les concentrations en ETM dans l'eau en tenant compte des limites de détection de l'appareil, fixées pour chaque élément métallique. Il s'agit: du Cu, du Co, du Cd, du Pb et de l'U. On peut aussi ajouter d'autres paramètres physico-chimiques comme: le pH, la C.E. ainsi que la Turbidité.

2.4.2.2 LA CONCENTRATION EN ETM DANS LES SOLS

Dans les mêmes conditions, sur l'ICP, les échantillons de sol subiront aussi la même analyse par le principe de la "spectrométrie d'émission atomique" afin de déterminer la concentration en Cu, Co, Cd, Pb, U, Fe, Mn ainsi que le pH.

2.5 TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNÉES

Pour les échantillons d'eaux et des sols, les résultats de laboratoire seront comparés aux normes internationales déterminées par l'organisation mondiale de la santé (OMS) reprises ici dans le tableau 5. Les quelles normes sont utilisées par beaucoup des pays à travers le monde [16].

Palaeontological statistics (PAST) est le logiciel statistique naturaliste qui permettra les traitements des résultats des analyses des échantillons d'eaux et des sols par l'aval de l'analyse en composantes principales (ACP), pour la détermination des corrélations entre les facteurs étudiés d'une part et les paramètres chimique, physiques et physicochimique d'autre part. Cette analyse permettra aussi de réduire le nombre des variables et de détecter les structures dans les relations entre variables.

3 RÉSULTATS

Les tableaux 2, 3, 4 ci-dessous présentent les résultats de terrain et d'analyse de laboratoire des eaux prélevées dans les puits du quartier Tshamilemba. Cinq éléments traces métalliques ont fait l'objet d'analyse de laboratoire Cu, Co, Pb, Cd, U (Tableau 2).

3.1 LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DANS L'EAU PRELEVEE DANS LES PUIITS

Tableau 2: Paramètres physico-chimiques dans les échantillons d'eau pris sur terrain

Site	Date	Time	pH	C.E	ORP	Temp/pH	Temp/C.E	Identités
ID	(M/J/A)	(24h)	S.U	$\mu\text{S}/\text{Cm}$	mV	(°C)	(°C)	échantillons
GW001	04.18.2014	07:45	5.9	1556	84	20.6	20.5	04182014GW001
GW002	04.18.2014	08:45	5.89	2172	84.6	20.3	20.8	04182014GW002
GW003	04.18.2014	09:10	5.73	1990	94.2	22.3	22.4	04182014GW003
GW004	04.18.2014	09:35	5.39	2051	114.4	23.7	23.3	04182014GW004
GW005	04.18.2014	10:00	5.37	1395	115.8	23.8	24.2	04182014GW005
GW006	04.18.2014	10:25	5.35	1480	117.2	24.9	25.4	04182014GW006
GW007	04.18.2014	10:50	6	2910	78.7	24.8	25.2	04182014GW007
GW008	04.18.2014	11:25	6.43	2290	53.7	26.2	24	04182014GW008
GW009	04.18.2014	12:00	6.68	3670	38.8	24.4	24.5	04182014GW009
GW010	04.18.2014	12:25	5.1	5290	32.9	28.4	30.9	04182014GW010
GW011	04.18.2014	12:55	4.94	3990	140.8	24.6	25.2	04182014GW011
GW012	04.18.2014	13:30	6.62	4840	42.7	25	24.7	04182014GW012
GW013	04.18.2014	14:00	6.28	3690	62.9	25.7	26.6	04182014GW013

Il ressort du tableau 2 présentant les paramètres physico-chimiques pris sur le terrain que les valeurs de pH varient entre la gamme de légèrement acide à très acide. Ces valeurs oscillent entre 4.94 à 6.68. Le pH faible (très acide) de 4.94 a été observé dans le puits 11, situé sur le premier transect, à proximité de l'usine CHEMAF. *L'Imperata cylindrica* indicatrice de l'acidité du sol [17] est parmi les espèces végétales rencontrées dans les 100 mètres près du puits. L'eau a été prélevée à une hauteur piézométrique de 155 cm. Tandis que la valeur de pH élevée de 6.68 bien que légèrement acide a été trouvée au niveau du puits 9, situé sur le deuxième transect, à proximité d'un champ de maïs. L'espèce *tithonia diversifolia* est la plus rencontrée autour de ce puits. L'eau a été prélevée à une hauteur piézométrique de 150 cm. Au regard des valeurs de pH reprises dans le tableau 2. S'agissant de la conductivité électrique, les valeurs dans l'ensemble sont très élevées et dépassent la valeur limite fixée dans l'intervalle de 300 à 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'eau douce selon l'OMS. La valeur la plus élevée de la conductivité a été observée dans le puits 10 avec 5920 $\mu\text{S}/\text{Cm}$, tandis que la faible valeur mais qui dépasse la limite est de 1395 $\mu\text{S}/\text{Cm}$, observée au cinquième puits. Une eau dont la conductivité est supérieure à 1.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ne peut plus être considérée comme une eau douce. Considérant le potentiel d'oxydo-réduction (ORP) qui est fonction de l'équilibre entre les formes réduites et les formes oxydées des composés chimiques présents, les valeurs mesurées au niveau de toutes les stations pour ce paramètre sont positives et oscillent entre 32.9 (GW10) et 140.8 mV (GW11). Les deux températures (celle liée au pH et celle liée à la conductivité) ont varié de la même façon avec des valeurs moyennes oscillant entre 20.3 et 30.9°C. Les basses températures ont été observées au niveau des puits 1 et 2 et celles élevées (28.4 et 30.9°C) dans le puits 10. En résumé, les eaux souterraines prélevées dans les puits au quartier Tshamilemba ne sont pas de bonne qualité et peuvent induire des conséquences néfastes sur la santé du consommateur [18] (Figure 2).

3.1.1 CORRELATIONS ENTRE PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES TOUS PUIITS CONFONDUS

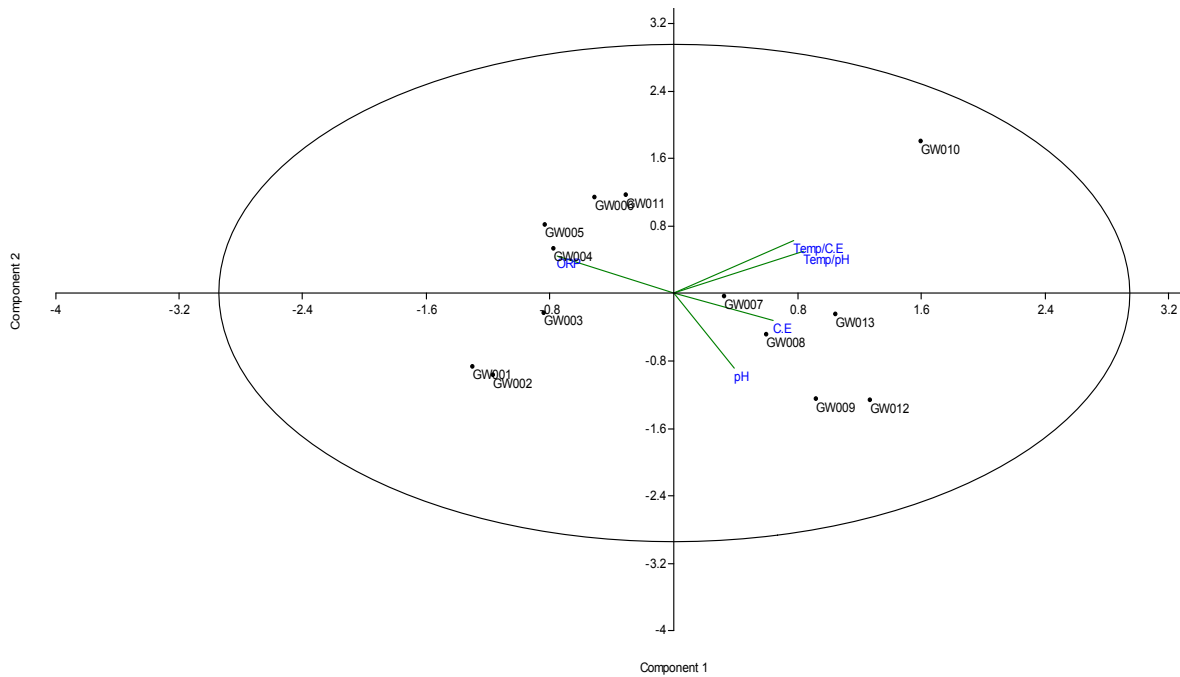


Figure 2 : Graphique des corrélations entre Paramètres physico-chimiques tous puits confondus

Au regard du graphique 2, des corrélations entre paramètres physico-chimiques, il apparait clairement que les deux températures sont positivement, significativement corrélées et cela s’observe dans le puits 10 suivis des puits 7, 8, 9, 12 et 13. Dans ces puits on note aussi une corrélation entre les paramètres physico-chimiques, c’est-à-dire entre les températures, la conductivité électrique et le pH. Par contre le potentiel d’oxydo-réduction regroupe un nuage des points constitué des puits ayant des valeurs élevées concernant ce paramètre, il s’agit des puits 4 (114.4mV), 5 (115.8mV), 6 (117.2mV) et 11 (140.8mV) ou la gamme de pH reste acide, les valeurs de la conductivité électrique gravitent entre 1330 et 3990 µS/Cm et ou les températures ne dépassent pas les 25°C [18].

3.2 CONCENTRATION DES ETM DANS L’EAU SOUTERRAINE DES PUIITS

Tableau 3 : Concentration d’ETM dans l’eau prélevée dans les puits au Quartier Tshamilemba (mg/L)

ID	Cu	Co	Pb	Cd	U	pH
GW001	3,53	10,935	90,551	5,234	0,098	6,08
GW002	3,41	6,716	35,456	3,273	0,095	6,34
GW003	2,88	8,8	15,567	2,756	0,006	6,37
GW004	1,117	0,931	7,535	2,045	0,003	5,62
GW005	0,579	0,048	13,305	4,854	0,005	6,09
GW006	1,447	7,9	15,232	3,763	0,001	4,9
GW007	0,382	0,048	5,476	3,925	0,002	6,79
GW008	0,765	1,337	2,75	1,674	0,001	6,89
GW009	1,235	3,127	9,853	2,564	0,002	6,49
GW010	0,81	0,098	3,456	0,924	0,001	4,08
GW011	1,832	0,069	3,453	0,825	0,024	4,02
GW012	0,233	2,543	3,525	1,084	0,001	7,21
GW013	4,112	8,462	27,037	2,003	0,001	6,83
TMA(OMS)	2	-	0,1	0,003	0,015	6.5-9.5

*TMA: Teneur Maximale Acceptée par l’OMS (2005)

Les résultats d'analyses de laboratoire que présente le tableau 3 ci-dessus indique que le pH de l'eau varie dans les différents puits inspectés à Tshamilemba. En général, les valeurs de pH varient de 4.02 dans le puits 11 à 7.21 dans le douzième. La tendance générale par rapport au pH évolue d'une gamme de pH très acide à acide, puis d'acide au pH neutre. La concentration du cuivre dans l'eau reste en général inférieure au seuil de toxicité fixé à 2mg/L dans les puits de GW4 à GW12. Par contre, l'on note des valeurs supérieures à la norme pour les puits GW1, GW2, GW3 et GW13 respectivement 3.53, 3.41, 2.48 et 4.112mg/L de Cu. Ces 4 puits sont situés sur le premier transect où les conséquences liées au débordement des effluents de CHEMAF s'observent sur le sol et la végétation [19]. La concentration en cobalt est relativement élevée dans certains puits et reste inférieure au seuil de toxicité. Comme le cuivre, les trois premiers points ainsi que le dernier présentent des valeurs élevées par rapport aux autres. Ceci peut être justifié par l'éloignement de la source de pollution. Ces points sont sur le premier transect donc proches de la source de pollution. La teneur en Plomb est élevée et dépasse le seuil acceptable fixé à 0.1mg/L. Les valeurs sont très élevées sur les quatre points précédemment évoqués ci haut (GW1, GW2, GW3 et GW13). La teneur en cadmium varie de 0.81mg/L au point GW12 à 5.234mg/L au point GW1 donc, supérieure à la norme de toxicité fixée à 0.1mg/L. Cette concentration élevée s'explique naturellement comme anthropiquement. Naturellement c'est une espèce ionique (Cd^{2+}) dominante dans les sols à pH inférieur ou égale à 6.5, anthropiquement, il vient de l'entreprise qui fabrique des sulfates et des chlorures pour la préparation de l'acide sulfurique et chlorhydrique. A $pH \leq 6.5$ l'ion cadmium (Cd^{2+}) en présence de sulfate(SO_4) et chlorure(Cl_2) forme des complexes tels que le sulfate de cadmium ($CdSO_4$) et chlorure de cadmium ($CdCl_2$) [20] (Figure 3).

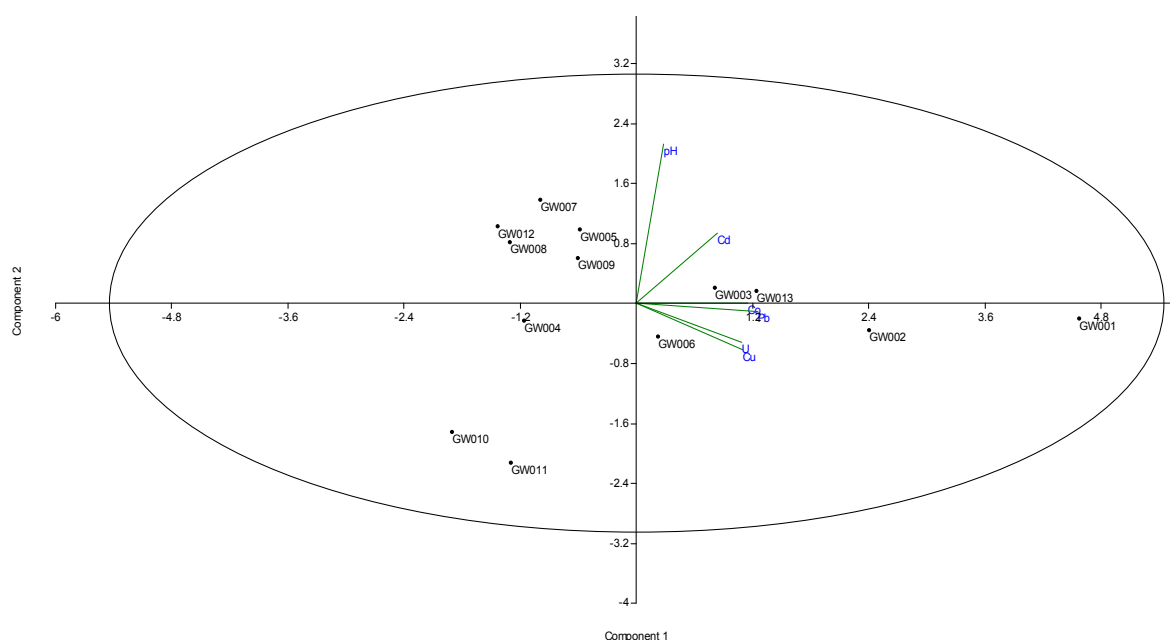


Figure 3: Graphique des corrélations entre ETM tous puits confondus

En se référant à la matrice des corrélations, on observe que le cobalt, le plomb et l'uranium présentent une corrélation positive hautement significative avec le cuivre. Pour le Co-Cu l'ordre de grandeur est de 0.81752, 0.68615 pour le Pb-Cu et 0.60202 pour l'U-Cu. On observe aussi une corrélation très significative entre le Cadmium et le plomb puis, l'uranium et le Plomb dont l'ordre des grandeurs est successivement de 0.62104 et 0.81927. Par contre, le cadmium présente une corrélation positive faible successivement avec le cuivre et le cobalt. Les ETM toxiques sont plus concentrés dans les puits 1, 2, 3, 5 et 13 où on observe des valeurs de pH inférieures ou égales à 6,5. Ces puits sont proches entre eux et surtout proches de la source de pollution, plus précisément du canal d'évacuation des effluents liquides chargés en ETM. Ils sont situés sur le même transect, excepté le cinquième qui partage les deux transects. Dans les autres puits restants, les ETM ne présentent pas des relations avec un degré de significativité important. Néanmoins, on note une corrélation positive, significative entre les puits GW3 et GW13 puis une corrélation légèrement significative entre GW6, GW2 et GW1. Le premier groupe constitué de GW3 et GW13 se trouve corrélé positivement au Cd, Co, Pb et légèrement corrélé au pH, par contre le deuxième groupe présente une corrélation positive mais légèrement significative avec le cuivre et l'uranium. Ces corrélations ou non corrélations entre les

deux groupes phares se justifient par les différences qu'ils partagent sur le pH. Cette variation de pH peut être expliquée par la topographie.

3.2.1 RELATIONS ENTRE ETM ET LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

Le Cu présente trois corrélations positives avec le pH, l'ORP et la conductivité. L'indice de corrélation entre Cu-pH étant de 0,60995, Cu-ORP: 0,6704 et enfin Cu-CE: 0,822440. En résumé, le Cu a une corrélation positive, hautement significative avec la conductivité électrique dans l'eau au regard du degré de significativité de la corrélation, deux corrélations positives significatives du cuivre et de l'ORP et enfin du cuivre et du pH (Figure 4)

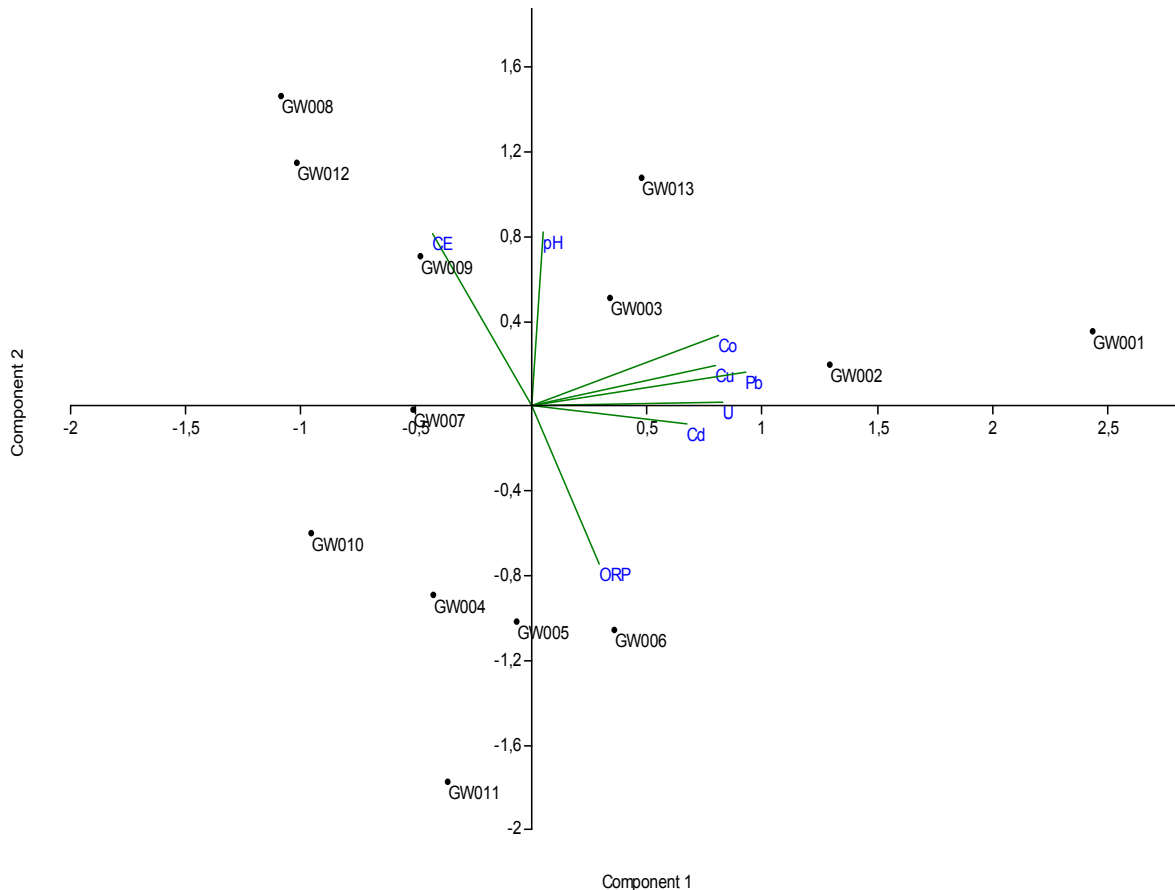


Figure 4 : Graphique des corrélations entre ETM et les paramètres physico-chimiques

Le plomb présente une corrélation positive significative avec le pH, l'indice étant de 0,68659, ensuite une corrélation positive très significative avec l'ORP, de 0,735 enfin une corrélation positive significative avec la CE de 0,69024. Au sommet de la pente, les ETM présentent des corrélations positives significatives avec le pH car à la sortie des effluents, les eaux qui arrivent sont chargées en produits issus des procédés métallurgiques de l'usine CHEMAF à l'instar du soufre sous forme soluble, qui au contact de l'eau cause le phénomène de drainage minier acide (DMA) qui contribue à la mobilité et à la distribution des ETM dans le sol, dans les eaux de surface ainsi que celles souterraines. Le DMA facilite les réactions d'oxydo-réduction en aval là où la pente est nulle (bas-fond), les ETM contenus dans les déchets peuvent être lixivés à travers les couches du sol durant leur parcours en augmentant la conductivité et en réduisant probablement le pH [21].

3.3 CONCENTRATION DES ETM DANS LE SOL AUTOUR DES PUIITS

Tableau 4 : Concentration d'ETM dans le sol autour des puits au quartier Tshamilemba (mg/kg)

Sols	pH	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	K	Cu	Co	Pb	Cd	U
1	6,88	27.3	10.54	1086	6,4	16,994	0.492	485,7	48	60	3,8	0,742
2	6,32	2.524	6.2	440	30	20,2	0.419	583,5	32	40	1,6	0,788
3	6,98	15.69	8	1186	94	17,424	0.322	945,2	60	60	3,2	0,634
4	6	3.538	6.6	762	56	25,26	0.325	261,8	14	0,2	2,8	0,89
5	6,25	4.692	7.6	406	38	14,964	0.378	760,6	40	1,4	2,4	0,764
6	6	11.93	9.42	752	10	16,084	0.414	800,5	26	1	4,4	0,902
7	6,85	5.608	7	512	5,8	16,732	0.271	388,2	38	86	4,6	0,5
8	6,3	7.17	6.2	222	3,2	14,072	0.309	827	94	0,4	4,6	0,74
9	5,94	8.688	7.6	878	6	24,12	0.405	360,7	22	0,8	4,0	0,95
10	6,85	3.986	7	728	8,6	26,14	0.42	560,3	66	1	6,4	1,014
11	6,53	5.874	6.2	994	4,2	27,3	0.521	140,8	60	0,4	5,6	1,052
12	6,3	5.018	7.4	502	62	22,02	0.485	150,2	36	0	1,8	0,98
13	6,72	2.45	6.4	1186	51,4	21,64	0.499	180,5	84	0,04	4	0,992
TMA	6.5- 8.5	200	-	-	-	-	-	200	-	-	2	-

Il ressort du tableau 4 ci-dessus que la teneur du cuivre dans le sol montre une même tendance dans les échantillons de sols prélevés à Tshamilemba. Les valeurs sont très élevées aux points 3, 6, 8, 7, 2, et 1 respectivement 945.2, 800.5, 827, 388.2, 583 et 485.7mg/Kg et dépassent la valeur seuil fixé à 100mg/Kg pour le sol agricole selon la norme Française [22]. On note la valeur la plus élevée au point 3 avec respectivement 945.2mg/Kg de Cu et la plus faible au point 11 avec 140.8mg/Kg. Les fortes concentrations en cet élément rend défavorable la pratique des cultures sur ces sols du fait de leur toxicité métallique [23]. Cette toxicité du sol est due à sa position topographique, Tshamilemba constituant un point de chute des déchets enrichis en cuivre provenant de la source de pollution (CHEMAF) [24]. L'analyse du plomb montre une concentration inférieure au seuil requis dans les échantillons de sols. Cela s'explique par le fait que le plomb est l'un des éléments le moins mobile dans le sol. Il est 100 fois moins mobile que le cadmium (Perrono, 1999). Seul le point 7 frôle le seuil avec 86 mg/kg suivis des points 1, 2 et 3 titrant successivement 60, 40 et 60 mg/Kg. Le sol de Tshamilemba est caractérisé par une texture sablo-argileuse, ce genre de texture présente les phases d'adsorption dominante du plomb à pH acide ou neutre. Les points 1, 2, 3 et 13 marquent une grande différence puisqu'ils sont situés à coté des routes. Le point 7 sur le premier transect au bord de la route non asphaltée à coté de l'usine CHEMAF et les points 2 et 3 situés sur le deuxième transect à coté de la route Kiwele. Ces points reçoivent des particules métalliques venant des retombées atmosphériques des fumées issues des tuyaux d'échappement des véhicules, qui sont des sources probables du plomb dans les sols longeant les routes et les voies ferrées [25]. La concentration en cadmium varie entre 1,6mg/Kg au point 2 et 6,4mg/Kg au dixième point. Les points 2 et 12 présentent une teneur en Cd inférieure à la teneur normale acceptée par l'union européenne (2mg/kg) tandis que les 11 restants ont des teneurs en Cd supérieures à la teneur normale. Comme dit ci haut, le Cd²⁺ est l'espèce ionique dominante dans les solutions du sol à pH inférieur ou égale à 6, 5 ou il forme des complexes tels que le sulfate de cadmium et le chlorure de cadmium. Les points 2: 400mg/Kg, 5: 406mg/kg, 7: 512mg/Kg, 8: 222mg/Kg et 12: 502mg/Kg montrent une concentration normale en fer (200 -500mg/Kg) alors que le reste d'éléments (Cd, Pb et Cu) présentent des teneurs très élevées que la norme de l'OMS. Cela justifie le ralentissement de la croissance des cultures vivrières suite à un niveau de translocation élevé d'ETM du sol vers les parties comestibles (Bioaccumulation).

Les analyses de laboratoire montrent également des teneurs en Ca, K et Mg infiniment petites comparativement aux teneurs requises pour les éléments majeurs dans les sols à vocation agricole, néanmoins ils présentent un potentiel hydrogène avoisinant la neutralité. Les éléments majeurs faiblement concentrés dans le sol de Tshamilemba confirment l'hypothèse émise ci-haut, celle de la toxicité métallique des sols du Quartier Tshamilemba. Etant un des trois éléments indispensables pour la croissance des plantes, les faibles teneurs en calcium, potassium et magnésium dans les sols du quartier Tshamilemba ne lui permettent pas d'assurer la croissance des plantes. (Figure 5)

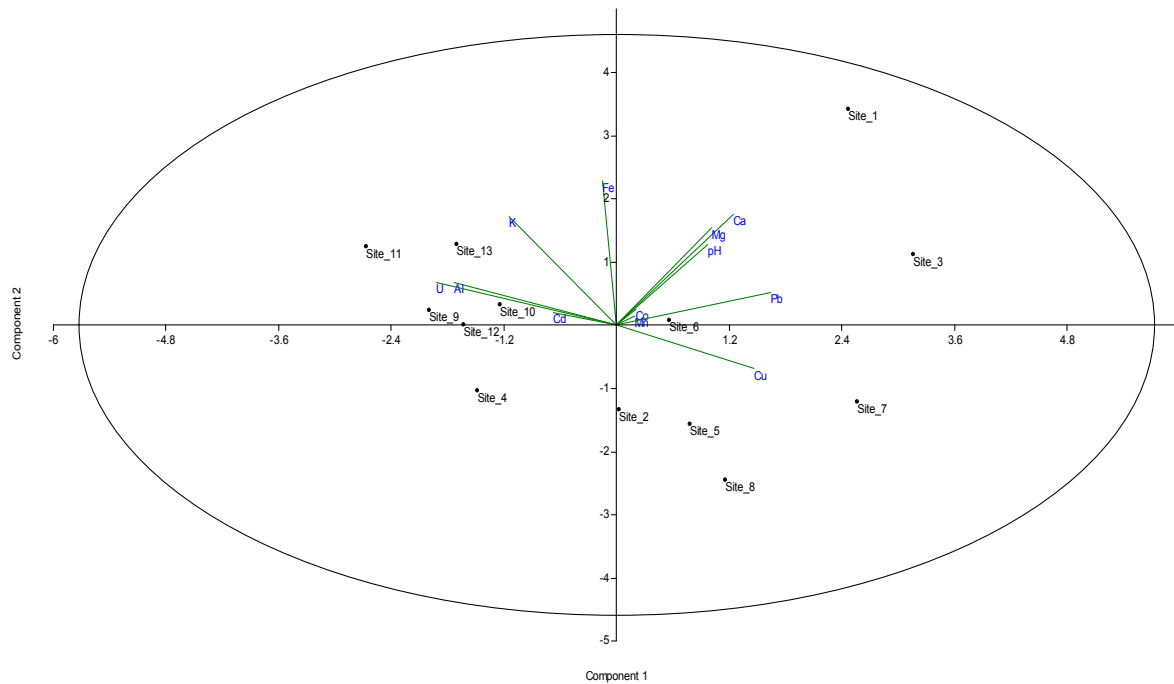


Figure 5 : Graphique des corrélations entre les ETM et les éléments majeurs dans le sol

Dans le sol, différents ETM produisent diverses corrélations entre eux. C'est entre autre le Cu ayant une corrélation positive significative corrélé au Co, au Fe, au Mn et à l'Al avec respectivement 0.603838, 0.7194, 0.5978, 0.5766 et 0.83605. Les corrélations du Cu s'expliquent par sa mobilité lorsque les complexes avec la matière organique sont rares, il montre la plus forte propension à être complexé par les substances humiques qui peuvent le précipiter dans les minéraux de fraction argileuse. Le Pb est positivement significativement corrélé au Cd au Mn et à l'Al avec comme indice 0.52377, 0.72633 et 0.735245. Sa concentration soluble est régulée par les précipitations des sels de plomb, par l'adsorption d'échanges spécifiques et par la formation des complexes stables avec la matière organique. Il faut dire qu'ensemble avec le Cu et le Co dans ce site, ils constituent une menace d'extinction pour les végétaux. La figure ci-dessous laisse voir les corrélations entre divers ETM et éléments majeurs En présence de la matière organique, le Fe opère un processus de transfert depuis la surface du sol vers les horizons profonds d'accumulation (horizon Bph) mais dans ce cas, à l'absence de la matière organique, les meilleures corrélations du Fe sont obtenues qu'avec le Mn et le K à cause d'une couche de sesquioxyde de fer trouvée déjà avant 30cm de profondeur aux points 1 et 13 [26].

Les trois groupes verticalement repartis sont caractérisés par des fortes teneurs en Al, Mn, Fe, Cu, Mg, Pb et Ca. On remarque une corrélation positive entre le Ca et le Mg au point 7 à pH acide. Ce point particulier sépare les deux transects. Voilà pourquoi ce point se distingue par la présence des *elais guinnéensis*, les *hypparrhénia* et les *paspalum notatum* qui ne sont pas faciles à cultiver dans ce quartier. De l'autre côté, les points 13, 8, 11 et 12 donnent une concentration considérable en U, Cd et Co car étant sur le même transect caractérisé par un éloignement moins significatif de la source de pollution.

4 DISCUSSION

4.1 LES NIVEAUX DE TENEURS EN ETM DANS LES EAUX DES PUITA TSHAMILEMBA

Du tableau des résultats des eaux présentés précédemment, on note des niveaux des teneurs très élevés en ETM dans les échantillons d'eau prélevés dans les puits au quartier Tshamilemba. D'un point de vue général, les eaux présentent un pH variant entre la gamme acide à légèrement acide, ou avoisinant la neutralité. Ces fortes teneurs en éléments traces dans l'eau dont le minimum est de 0.233mg/L au puits 12, le maximum de 4.112 mg/L au puits 13 dépassent la valeur limite fixée à 2mg/L pour le cuivre. Le minimum de 2.75 mg/L au puits 8 et le maximum de 90.551mg/L au puits 1 pour le plomb, ces valeurs dépassent largement la valeur limite dans l'eau fixée à 0.1mg/L. Le cadmium a un minimum de 0.82mg/L au puits 11, et un maximum de 5.234 mg/L au puits 1 alors que la valeur seuil est fixée à 0.003 mg/L. Ces résultats corroborent avec ceux d'une étude menée sur le même site par [3], celle-ci a débouché sur la modification physico-chimique des eaux de la nappe en aval de l'usine CHEMAF due à une contamination probable liée à la lixiviation des rejets d'effluents liquides qui débordent

les limites de la concessions depuis des dizaines d'années . Les lixiviats naturels percolant de ces résidus au moment des pluies ont montré le relargage de quantités importantes d'éléments traces métalliques dans les eaux souterraines [4]. Ces lixiviats se sont, s'infiltrés vers les eaux souterraines en plus de leur lessivage vers les sols et les eaux de surface. On note la diminution de cet impact plus loin en aval de l'usine CHEMAF expliquée par l'éloignement de la source de pollution ainsi que par l'effet de la dilution [27].

Les résultats des analyses physico-chimiques des échantillons d'eaux de puits montrent que le pH varie d'une gamme acide, cela s'observe dans les puits 1, 2, 3, 4, 5, 6, et 7 à celle proche de la neutralité dans les puits 8, 9 et devient très acide dans les puits 10 et 11. Par contre dans les derniers puits, le pH approche la neutralité. La conductivité électrique laisse voir des valeurs dans l'ensemble très élevées, qui dépassent le seuil acceptable par les normes de l'OMS pour l'alimentation humaine. Celle-ci montre une augmentation importante de l'amont à l'aval de l'usine CHEMAF. Elle passe d'une valeur moyenne de $1552 \mu\text{S cm}^{-1}$ et $2172 \mu\text{S cm}^{-1}$ respectivement dans P1 et P2 à $1990 \mu\text{S cm}^{-1}$ dans P3 et $2051 \mu\text{S cm}^{-1}$ dans P4. Ces valeurs diminuent légèrement dans P5 ($1395 \mu\text{S cm}^{-1}$) et P6 ($1480 \mu\text{S cm}^{-1}$). Au niveau du P7 jusqu'au P13, la conductivité électrique atteint des valeurs très élevées qui dépassent largement la limite acceptable de l'OMS. Considérant le potentiel d'oxydo-réduction (ORP) qui est fonction de l'équilibre entre les formes réduites et les formes oxydées des composés chimiques présents, les valeurs mesurées au niveau de toutes les stations pour ce paramètre sont positives et oscillent entre 32.9 (P10) et 140.8 mV (P11), ce qui traduit la présence des ETM dans les puits sous forme oxydée. Ces formes oxydées d'ETM dans l'eau ne sont pas mobiles que celles réduites et peuvent être liées aux phénomènes de fixation, de précipitation et de chélation entre les divers agents chimiques [28]. Les deux températures (celle liée au pH et celle liée à la conductivité) ont varié de la même façon avec des valeurs moyennes oscillant entre 20.3 et 30.9°C. Les basses températures ont été observées au niveau des puits 1 et 2 et celles élevées (28.4 et 30.9°C) dans le puits 10. Etant un facteur important qui régule plusieurs réactions biochimiques dans l'eau, on note que les hautes températures entraineraient le réchauffement de l'eau, avec comme conséquence une dissolution et une dissociation de certaines formes d'éléments chimiques présents, la diminution de la quantité d'oxygène dissous nécessaire pour les êtres aquatiques [29]. Au regard des niveaux de concentration d'ETM associé aux paramètres physico-chimiques, on conclut que les eaux des puits du quartier Tshamilemba n'ont pas de qualité requise pour un quelconque usage selon les normes de l'OMS pour l'alimentation humaine (Figure 6).

4.2 LES CORRELATIONS, PARAMETRES EXPLICATIFS DES ASSOCIATIONS D'ETM DANS L'EAU

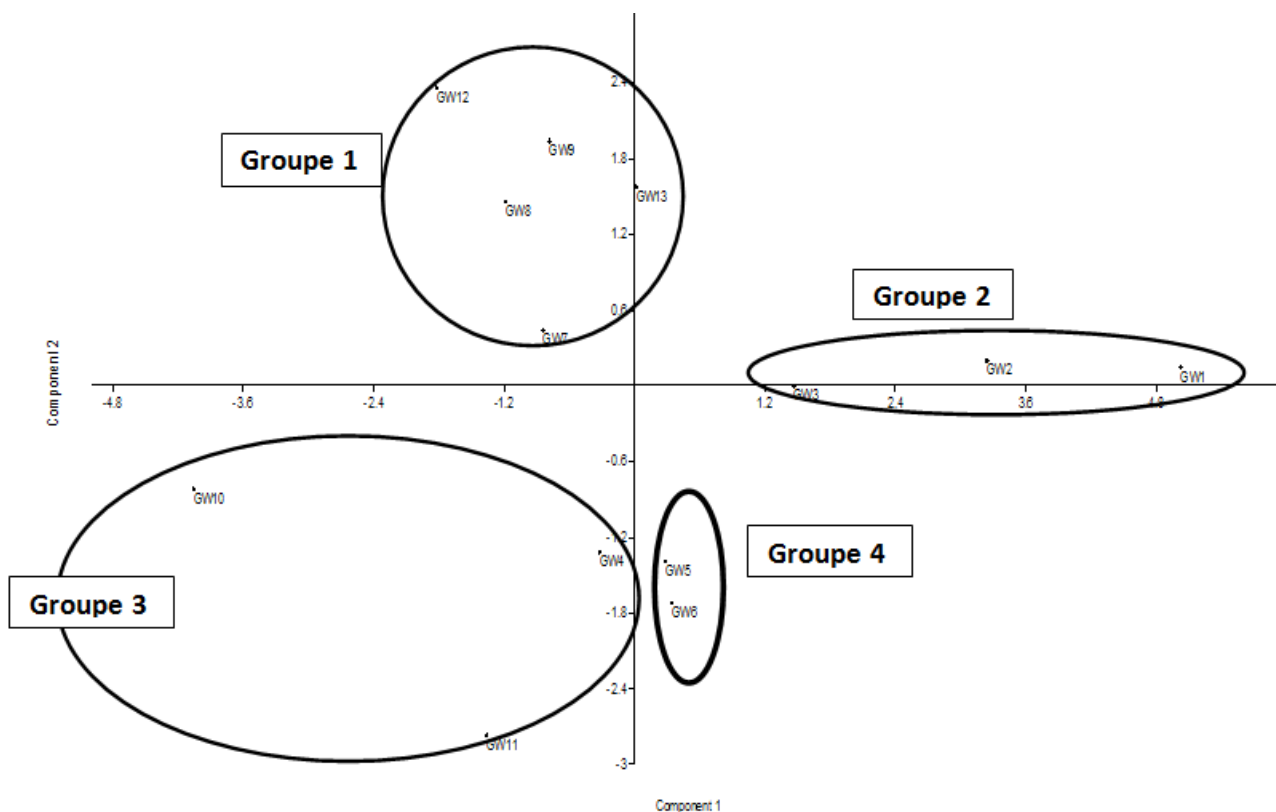


Figure 6 : Représentation en nuages des points des corrélations entre puits

Au regard du graphique 6, présentant les corrélations d'une part entre les ETM et les paramètres physico-chimiques et d'autre part entre les différents puits, il ressort la formation des nuages des points représentés sous forme des groupes (Groupe 1, 2, 3, 4.) influencés chacun soit par la concentration en ETM, soit par les paramètres physico-chimique, soit enfin par la distance par rapport à la source de pollution.

Le groupe 1 influencé fortement par la conductivité et le pH est constitué des puits 12, 9, 8, 7 et 13.

On observe dans ceux-ci une faible concentration en Cu, Co et U, avec de fortes concentrations en Cd et Pb. Le pH en général acide dans ces puits se trouve positivement corrélé aux valeurs élevées de la conductivité électrique. Les fortes concentrations en Cd et Pb sont le fait de la forte application des engrais chimiques sur les cultures effectuées dans le jardin pour espérer une croissance favorable des légumes mais aussi la proximité d'une route au passage très intense des véhicules, qui rejettent des fumées source probable de l'accroissement du taux de plomb dans le sol, eau, et l'air [30]. Les eaux dans ces différents puits ne peuvent faire l'objet d'aucun usage aux risques de provoquer des maladies diverses [31].

Le groupe 2 constitué des puits 1, 2, 3, 13 (étant à cheval entre le premier groupe et le deuxième) présente un danger dû à la présence très marquée des ETM tels le Cu, Co, Pb et une faible teneur en Cd, U. Ceux-ci sont présentement une corrélation positive significative avec le pH qui affiche une valeur moyenne de 6. La présence très marquée de ces ETM dans les eaux des puits 1, 2, 3 et 13 est justifiée par leurs proximités par rapport à l'usine CHEMAF étant situés tous sur le premier transect et étant les premiers à recevoir les eaux de ruissellement chargées en substances dangereuses. Ces eaux nécessitent un traitement préalable avant leurs utilisations, ceci dans le but d'éliminer tous les éléments dangereux contenus dans celles-ci.

Le groupe 3 constitué des puits 4, 10 et 11 se trouve sous l'influence de la température et du pH. C'est là qu'on note un niveau très élevé d'acidité constaté dans tous les puits avec un pH de 4.1 dans le puits 11. Les ETM ne sont pas très concentrés à l'exception du Cd et du Pb. Enfin le groupe 4, constitué des puits 5 et 6 se trouve sur une forte influence du potentiel d'oxydo-réduction. Dans ces puits situés l'un à cheval entre les deux transects (P 5) et l'autre sur le deuxième (6) présentent une corrélation avec le Cd et l'U.

4.3 LES NIVEAUX DES TENEURS EN ETM DANS LES SOLS A TSHAMILEMBA

Dans le sol, on note des teneurs en cuivre variant entre 140.8mg/Kg au point 11, 945.2mg/Kg au point 3. Celles-ci sont supérieures à la valeur limite fixée à 100 mg/Kg pour le cuivre [22]. Ces teneurs élevées en cuivre se rencontrent aux trois premiers points. Les teneurs en cadmium sont deux ou trois fois plus élevées que la valeur limite fixée à 2mg/Kg. Les points 6, 7, 8, 9, 10, 11, ont respectivement 4, 4.6, 4.6, 4, 6.4, 5.6 mg/kg. Le plomb présente de fortes teneurs dans presque tous les puits, surtout dans le premier, le deuxième, le troisième, le sixième et le treizième où les valeurs sont successivement de 90.55mg/L, 35.45mg/L, 15 mg/L, 15 mg/L et 27 mg/L. Pour le cadmium, la teneur varie entre 2.045 mg/L et 5.234 mg/L, ces valeurs dépassent le seuil fixé à 0.003 mg/L dans les sept premiers puits, puis dans le neuvième et le treizième. La concentration du cuivre dans les trois premiers puits est toujours supérieure au seuil (2 mg/L). Au treizième puits, la concentration du cuivre est 2 fois plus élevée que la valeur seuil, 4.112mg/L tandis que, les puits 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 et 12 présentent une concentration en cuivre inférieure à 2 mg/L. A ce niveau de concentration, il convient de parler d'une pollution polymétallique. Celle-ci s'observe dans les puits se situant sur le premier transect, proches de la source de pollution étant les premiers à recevoir le débordement des effluents chargés en substances diverses. Cette pollution métallique est liée aux activités de traitement et d'enrichissement des minerais par l'entreprise CHEMAF qui cause des dommages environnementaux sans aucune politique de gestion. Les résultats du premier transect démontrent que l'usine CHEMAF est responsable des concentrations élevées en ETM rencontrées actuellement dans les sols et l'eau du quartier Tshamilemba [32]. Une étude a été menée en 2012, sur le même site et a abouti aux résultats qui confirment la pollution des sols dans ce quartier ainsi que sa source. Elle précise que le niveau des teneurs dans le sol des jardins au quartier Tshamilemba est très élevé et dépasse la limite selon l'OMS, le cuivre titre 1321 mg/kg, le cobalt 190 mg/kg et le plomb 530 mg/kg [Banza]. L'étude passée et présente affirme que les effluents liquides de l'usine CHEMAF qui ont débordés la limite pendant longtemps vers le quartier Tshamilemba sont souvent chargés en substances dangereuses et perturbent les équilibres écosystémiques, nuisent à la santé humaine et menacent d'extinction certaines espèces aquatiques [33].

4.4 LES FACTEURS EXPLICATIFS DE LA CONCENTRATION DES ETM DANS LE SOL

Le pH est neutre aux points 1, 3, 7 et 10. La concentration du Cu, Co, et Pb dans le sol est très élevée. La teneur en cuivre, cobalt et la carence en éléments majeurs (Mg, Ca et K) aux points précités dans le sol peuvent se justifier par leurs proximités de la source de contamination (CHEMAF), ce qui justifie la répartition horizontale des ETM par rapport au pH [34]. Un autre phénomène vient de l'entreposage au sol des stériles après les procédés de traitement métallurgique par l'entreprise CHEMAF, ceci explique en partie la répartition des ETM dans l'espace. Le ruissellement de l'eau pendant la

saison des pluies contribue à la libération des substances chimiques toxiques contenues dans les stériles qui, par transport, lixiviation et drainage chutent dans les parcelles et se déposent dans les puits mal protégés (GW1, GW4, GW6, GW12). Au regard de la matrice des corrélations, on note l'existence d'une corrélation positive mais faible entre le Cu et les Ca, Mg, Mn, par contre il présente une corrélation négative légèrement significative avec le Fe, l'Al et le K. On note également des corrélations positives très hautement significatives entre certains ETM avec les éléments majeurs, il s'agit de Ca-Co : 0.97121, Ca-Cd: 0.90654 ; Fe-Co: 0.76152, Fe-Cu: 0.4592 ; Mg-Mn: 0.77678, Mg-Cd: 0.8921 ; K-Co: 0.7232, K-Cd: 0.97929. La formation des liaisons entre les ETM et ces éléments expliquent leurs indisponibilités pour les plantes, ce qui explique une faible croissance de celles-ci cultivées sur le sol de ce quartier caractérisé par la présence des zones nues dues à un excès de la concentration d'ETM dans le sol [35]. On observe enfin une corrélation positive très hautement significative entre l'Al-Mn, ceci traduit la dégradation des sols argileux Katangais, riches en ces éléments, carencés en calcium et magnésium emportés par érosion et exportation de l'horizon de surface. Ainsi, le pH devient acide et le drainage minier acide élevé. Ce déséquilibre Mg/K s'observe dans le sol du quartier Tshamilemba, cette situation est similaire à celle de [36] qui dans sa recherche effectuée à Kolwezi dans un sol sablo-argileux, à côté d'un site de traitement métallurgique démontre aussi que l'acidité du sol est liée à la perte de calcium et magnésium par lessivage et érosion caractérisant une toxicité manganique et aluminique. Les résultats démontrent que les trois premiers puits sont les plus concentrés en ETM cars situés sur le même transect. On note que la distance entre les canaux d'évacuation des rejets et ces points (GW1, GW2 et GW3) est courte par rapport au deuxième transect (Proximité de la source). De fortes concentrations en ETM pour les puits se situant à une petite distance de l'usine CHEMAF, celles-ci diminuent lorsqu'on s'éloigne de l'usine. Les points 9, 10 en sont des exemples concrets.

5 CONCLUSION

A la suite de cette étude menée à l'échelle d'une nappe phréatique du quartier Tshamilemba, il apparaît que le chimisme de l'eau souterraine subit une évolution de l'amont vers l'aval. Les eaux souterraines en aval de l'usine CHEMAF sont de mauvaise qualité. Leur pollution est due essentiellement aux éléments traces métalliques (ETM). Ces ions proviennent, en partie, des lixiviats des résidus miniers déposés à l'air libre au sein de la concession ainsi que du débordement de ceux-ci vers le quartier Tshamilemba situé en aval de l'usine CHEMAF. Ces ETM à l'instar du Cu, Co, Cd, Pb sont en quantités excessives dans les échantillons d'eau et de sols prélevés à Tshamilemba. Ils forment différentes associations entre eux sous forme des nuages des points (groupes) lorsqu'on réalise une ACP. Les groupes 1, 2 et 3 représentant respectivement les puits P1, P2, P3, P4, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13 sont dangereux, au regard des résultats obtenus par rapport à la concentration des ETM dans l'eau souterraine et le sol des jardins mais aussi et surtout par rapport aux paramètres de qualité (pH, conductivité, ORP) qui entrent en ligne de compte pour déterminer la potabilité d'une eau.

S'agissant des paramètres physico-chimiques qui déterminent la qualité d'une eau potable destinée à l'alimentation humaine, en se référant au règlement minier qui régit les normes sur la qualité des effluents avant leurs relâchements dans la nature, à l'OMS qui fixe les critères de qualité d'une eau destinée à la boisson pour une bonne santé de l'homme, il se dégage que les eaux des puits sur lesquelles un examen minutieux a été mené présentent une gamme de pH acide, une conductivité très élevée et un potentiel redox susceptible de disponibiliser les formes oxydées d'ETM capables de séjourner pendant longtemps dans l'eau ne répondent pas aux normes d'usage recommandées par bon nombre d'organisations dans le monde.

Il ressort de cette étude qualitative que les effluents liquides rejetés par l'usine CHEMAF, hors de sa concession présentent un risque potentiel et réel pour la population du quartier Tshamilemba et pour l'environnement. Deux recommandations urgentes sont à mettre en place par l'entreprise CHEMAF:

- La mise en place d'un dispositif de recyclage des effluents liquides en évitant au tant que possible leurs relâchements dans la nature (rivières) ;
- Le traitement rigoureux de ces effluents en s'assurant de la qualité de ceux-ci par une surveillance environnementale permanente.

REFERENCES

- [1] Maqués M.J., Martínez-conde E, Rovira J.V. et Ordóñez S., Heavy metals pollution of aquatic ecosystem in the vicinity of a recently closed underground lead-zinc mine (Basque Country, Spain). *Environ. Geol.*, **40**, 1125-1137 (2001).
- [2] Denimal S., Tribouillard N., Barbecot F. et Dever L., Leaching of coal-mine tips (Nord-Pas-de-Calais coal basin, France) and sulphate transfer to the chalk aquifer: example of acid mine drainage in biffered environment. *Environ. Geol.*, **42**, 966- 981 (2002).
- [3] Banza, C.L.N., Nawrot, T.S., Haufroid, V., Decree, S., De Putter, T., Smolders, E., Kabyla, B.I., Luboya, O.N., Ilunga, A.N., Mutombo, A.M., Nemery, B., 2009. High human exposure to cobalt and other metals in Katanga. *Environ. Res.* 109, 745–752.
- [4] Holmstrom H., Salmon U.J., Carlsson E., Petrov P. et Ohlander B., Geochemical investigations of sulfide-bearing tailings at Kristineberg, north Sweden, a few years after remediation. *Sci. Tot. Environ.*, **273**, 111-133 (2001).
- [5] El Gharmali A., Rada A., El Adnani M., Tahlil N., El Meray M. et Nejmeddine A. Impact du drainage minier acide sur les écosystèmes aquatiques superficiels dans la région de Marrakech, Maroc. *Environ. Technol.*, **25**,1431-1442 (2004).
- [6] Gray N.F. Acid mine drainage composition and the implications for its impact on lotic systems. *Water Res.*, **32**, 2122-2134 (1998).
- [7] Nordstrom D.K., Alpers C.N., Ptacek C.J. et Blowes D.W., Negative waters from iron mountain, California. *Environ. Sci. Technol.*, **34**, 254-258 (2000).
- [8] Stromberg B. et Banwart S., Weathering of waste rock from the Aitik copper mine, Sweden: scale dependent rate factors and pH controls in large column experiments. *J. Contam. Hydrol.*, **39**, 59-8 (1999).
- [9] Dinelli E., Lucchini F., Fabbri M. and Cortecci G., Metal distribution and environmental problems related to sulphide oxidation in the Libiola copper mine area (Ligurian Apennines, Italy). *J. Geochim. Explor.*, **74**, 141-152 (2001).
- [10] Lee C.H., Lee H.K. et Lee J.C. Hydrogeochemistry of mine, surface and groundwaters from the Sanggok mine creek in the upper Chungju Lake, Republic of Korea. *Environ. Geol.*, **40**, 482-494 (2001).
- [11] Heikkinen P.M., Korkka-Niemi K., Lahti M. et Salonen V.P. Groundwater and surface water contamination in the area of the Hitura nickel mine, Western Finland. *Environ. Geol.*, **42**, 313-329 (2002).
- [12] Bruneau J.C., 1983. « Cartographie de l'environnement et aménagement urbain à Lubumbashi » dans *Revue internationale d'écologie et de géographie tropicales* 1(4): 19-47.
- [13] Van Wanbeke, 1991. *Soil of the tropic: properties and appraisal* sal Mac graw-hill, Inc. 343pp.
- [14] Chapman, D., 1992, *Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring*, Londres, UK, Chapman & Hall Ltd, 584 p.
- [15] APHA, AWWA et WPC, 1999, *Standard methods for the examination of water and wastewater*, Washington DC, USA, APHA , 20^eéd., 1368 p.
- [16] W.H.O. 1998. *Guideline for drinking water quality*, 2nd ed., vol. 2, health criteria and other supporting information. World Health Organisation, Geneva.
- [17] Assani L. M., Mwangalalo A., Ekondo O. A., Mutomb M.M., and Kanyenga L.A., 2014. La combinaison d'engrais minéraux et de l'herbicide sur un Ferralsol est-elle une alternative pour accroître le rendement du haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) par une gestion des mauvaises herbes à Lubumbashi R.D. Congo. ISSN 2028-9324 Vol. 9 No. 4 Dec. 2014, pp. 1765-1772.
- [18] BREMOND R., PERRODON C. (1979). Paramètres de la qualité des eaux. Ministère de l'environnement et cadre de vie. Prévention des pollutions. 2ème éd: 259 p.
- [19] SHENGO, L., MANSOJ, M., *The Pollution of the Surface Waters and Its Impact on the Quality of the Vegetables Cultivated and Consumed in the City of Lubumbashi*, in *Environmental Health*, Vol. 8, n°2, 2008, pp. 50-67.
- [20] Dudley, L.M. ; McLean, J.E. ; Sims, R.C. ; Jurinak J.J. (1988). Sorption of copper and cadmium from the watersoluble fraction of an acid mine waste by two calcareous soils. *Soil Sci.*, 145, 207- 214.
- [21] El Gharmali A., Rada A., El Adnani M., Tahlil N., El Meray M. et Nejmeddine A. Impact du drainage minier acide sur les écosystèmes aquatiques superficiels dans la région de Marrakech, Maroc. *Environ. Technol.*, **25**,1431-1442 (2004).
- [22] AFNOR, (1997). *Qualité de l'eau. Recueil des Normes Françaises Environnement. Tomes 1, 2, 3 et 4.* 1372 p. [23] DUCHAUFOR, P., 1983. *Pédologie I : Pédogénèse et classification.* 2eme édition. Masson. Paris, 491 pp.
- [24] Nordberg G. F., Fowler B. A., Nordberg M. , Friberg L. T. **Handbook on the toxicology of metals.** Third édition; Elsevier; 2007;
- [25] Perrono, 1999. *Les micropolluants métalliques des boues des stations d'épuration urbaine et l'épandage agricole.* Thèse de doctorat, Université de Picardie
- [26] Semlali R.M., Denaix L. et van Oort F., 2002, *Estimation des stocks et des flux dans un Andosol jeune* In BAIZE et TERCE coord. *Sci. Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales.* INRA, 565p.

- [27] Yu J.Y. et Heo B. Dilution and removal of dissolved metals from acid mine drainage along Imgok Creek, Korea. *Appl. Geochem.* **16**, 1041-1053 (2001).
- [28] DE VILLERS J., SQUILBIN M., YOURASSOWSKY C., 2005. Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface: cadre général Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement / Observatoire des Données de l'Environnement, 16p.
- [29] LEYNAUD G. (1968). Les pollutions thermiques, influence de la température sur la vie aquatique. B.T.I. Ministère de l'agriculture, 224-881.
- [30] Yoon J, Cao X, Zhou Q, Ma LQ. 2006. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Sci. Total Environ.* **368(2-3): 456-464**.
- [31] FLEISCHER. M., 1974. Iodine. *Geochemistry and the Environment*. Vol. 1. The relationship of Selected Trace Elements to Health and disease. NAS. Washington. USA, 26 pp.
- [32] Godin et al 1984, Vangravel et al. Modeling of soil contamination by air borne Lead and cadmium around several Emission, 98p.
- [33] Kabata-Pendias A. et Pendias H., 2001. *Trace elements in soils and plants*. Boca Raton, CRC Press Inc. 3^{ème} Ed. 315 p.
- [34] Sterckeman, T., Douay, F., Proix, N. & Fourrier, H. (2002) Contamination des sols vers la profondeur à Noyelles-Godault et Aubry. In: *Un point sur...les éléments traces métalliques dans les sols approches fonctionnelles et spatiales*. INRA. Editions. Paris 565p.
- [35] Chassin P., Baize D., Cambier Ph. et Sterckeman T., 1997, *Les éléments traces métalliques et la qualité des sols : impact à moyen et à long termes*, Chambres d'Agriculture, Supplément au n° 856, pp. 35-39.
- [36] Atibu, K.E., Devarajan, N., Thevenon, F., Mwanamoki, P.M., Tshibanda, J.B., Mpiana, T.P., Prabakar, K., Mubedi, I.J., Wildi, W., Poté, J., 2013. Concentration of metals in surface water and sediment of Luilu and Musonoie Rivers, Kolwezi-Katanga, Democratic Republic of Congo. Art. 26, 1-7.